

CONSOLIDATED VERSION

VERSION CONSOLIDÉE



**Power transformers –
Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air**

**Transformateurs de puissance –
Partie 3: Niveaux d'isolement, essais diélectriques et distances d'isolement
dans l'air**



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2018 IEC, Geneva, Switzerland

All rights reserved. Unless otherwise specified, no part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester. If you have any questions about IEC copyright or have an enquiry about obtaining additional rights to this publication, please contact the address below or your local IEC member National Committee for further information.

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'IEC ou du Comité national de l'IEC du pays du demandeur. Si vous avez des questions sur le copyright de l'IEC ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de l'IEC de votre pays de résidence.

IEC Central Office
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel.: +41 22 919 02 11
info@iec.ch
www.iec.ch

About the IEC

The International Electrotechnical Commission (IEC) is the leading global organization that prepares and publishes International Standards for all electrical, electronic and related technologies.

About IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC. Please make sure that you have the latest edition, a corrigenda or an amendment might have been published.

IEC Catalogue - webstore.iec.ch/catalogue

The stand-alone application for consulting the entire bibliographical information on IEC International Standards, Technical Specifications, Technical Reports and other documents. Available for PC, Mac OS, Android Tablets and iPad.

IEC publications search - webstore.iec.ch/advsearchform

The advanced search enables to find IEC publications by a variety of criteria (reference number, text, technical committee,...). It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Stay up to date on all new IEC publications. Just Published details all new publications released. Available online and also once a month by email.

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing 21 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in 16 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

IEC Glossary - std.iec.ch/glossary

67 000 electrotechnical terminology entries in English and French extracted from the Terms and Definitions clause of IEC publications issued since 2002. Some entries have been collected from earlier publications of IEC TC 37, 77, 86 and CISPR.

IEC Customer Service Centre - webstore.iec.ch/csc

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre: sales@iec.ch.

A propos de l'IEC

La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est la première organisation mondiale qui élabore et publie des Normes internationales pour tout ce qui a trait à l'électricité, à l'électronique et aux technologies apparentées.

A propos des publications IEC

Le contenu technique des publications IEC est constamment revu. Veuillez vous assurer que vous possédez l'édition la plus récente, un corrigendum ou amendement peut avoir été publié.

Catalogue IEC - webstore.iec.ch/catalogue

Application autonome pour consulter tous les renseignements bibliographiques sur les Normes internationales, Spécifications techniques, Rapports techniques et autres documents de l'IEC. Disponible pour PC, Mac OS, tablettes Android et iPad.

Recherche de publications IEC - webstore.iec.ch/advsearchform

La recherche avancée permet de trouver des publications IEC en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...). Elle donne aussi des informations sur les projets et les publications remplacées ou retirées.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Restez informé sur les nouvelles publications IEC. Just Published détaille les nouvelles publications parues. Disponible en ligne et aussi une fois par mois par email.

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne de termes électroniques et électriques. Il contient 21 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 16 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

Glossaire IEC - std.iec.ch/glossary

67 000 entrées terminologiques électrotechniques, en anglais et en français, extraites des articles Termes et Définitions des publications IEC parues depuis 2002. Plus certaines entrées antérieures extraites des publications des CE 37, 77, 86 et CISPR de l'IEC.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions contactez-nous: sales@iec.ch.

CONSOLIDATED VERSION

VERSION CONSOLIDÉE



**Power transformers –
Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air**

**Transformateurs de puissance –
Partie 3: Niveaux d'isolement, essais diélectriques et distances d'isolement
dans l'air**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 29.180

ISBN 978-2-8322-5516-2

**Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor.
Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.**

REDLINE VERSION

VERSION REDLINE



**Power transformers –
Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air**

**Transformateurs de puissance –
Partie 3: Niveaux d'isolement, essais diélectriques et distances d'isolement
dans l'air**

CONTENTS

FOREWORD.....	4
INTRODUCTION.....	6
1 Scope.....	7
2 Normative references.....	7
3 Terms and definitions	7
4 General	8
5 Highest voltage for equipment and rated insulation level.....	10
6 Transformers with re-connectable windings.....	11
7 Dielectric tests.....	12
7.1 Overview	12
7.2 Test requirements.....	13
7.2.1 General	13
7.2.2 Test voltage levels	14
7.2.3 Test sequence	17
7.3 Test requirements for specific transformers	17
7.3.1 Tests for transformers with $U_m \leq 72,5$ kV.....	17
7.3.2 Tests on transformers with $72,5$ kV < $U_m \leq 170$ kV	18
7.3.3 Tests on Transformers with $U_m > 170$ kV.....	19
7.4 Assigning U_m and test voltages to the neutral terminal of a winding	20
7.4.1 Transformers with $U_m \leq 72,5$ kV	20
7.4.2 Transformers with $U_m > 72,5$ kV	20
8 Dielectric tests on transformers that have been in service	20
9 Insulation of auxiliary wiring (AuxW).....	21
10 Applied voltage test (AV).....	21
11 Induced voltage tests (IVW and IVPD)	22
11.1 General	22
11.2 Induced voltage withstand test (IVW)	22
11.3 Induced voltage test with partial discharge measurement (IVPD)	23
11.3.1 General	23
11.3.2 Test duration and frequency.....	23
11.3.3 Test sequence	23
11.3.4 Partial discharge (PD) measurement.....	24
11.3.5 Test acceptance criteria.....	25
12 Line terminal AC withstand test (LTAC).....	25
13 Lightning impulse tests (LI, LIC, LIN, LIMT).....	26
13.1 Requirements for all lightning impulse tests	26
13.1.1 General	26
13.1.2 Tap positions	26
13.1.3 Records of tests.....	26
13.1.4 Test connections.....	27
13.2 Full wave lightning impulse test (LI)	28
13.2.1 Wave shape, determination of test voltage value and tolerances	28
13.2.2 Tests on transformers without non-linear elements.....	29
13.2.3 Tests on transformers with non-linear elements.....	30
13.3 Chopped wave lightning impulse test (LIC).....	31

13.3.1	Wave shape.....	31
13.3.2	Tests on transformers without non-linear elements.....	31
13.3.3	Tests on transformers with non-linear elements.....	32
13.4	Lightning impulse test on a neutral terminal (LIN).....	33
13.4.1	General	33
13.4.2	Waveshape.....	33
13.4.3	Test sequence	34
13.4.4	Test criteria	34
14	Switching impulse test (SI).....	34
14.1	General	34
14.2	Test connections	34
14.3	Waveshape	35
14.4	Test sequence.....	35
14.5	Test criteria	35
15	Action following test failure	36
16	External clearances in air.....	36
16.1	General	36
16.2	Clearance requirements.....	37
Annex A (informative)	Application guide for partial discharge measurements on transformers	40
Annex B (informative)	Overvoltage transferred from the high-voltage winding to a low-voltage winding	45
Annex C (informative)	Information on transformer insulation and dielectric tests to be supplied with an enquiry and with an order.....	47
Annex D (informative)	Neutral insulation voltage level calculation	50
Annex E (informative)	Basis for dielectric tests, insulation levels and clearances	53
Bibliography	56
Figure 1	– Time sequence for the application of test voltage for induced voltage test with partial discharge measurement (IVPD)	24
Figure A.1	– Calibration circuit for partial discharge measurement using the test tap of condenser type bushing.....	41
Figure A.2	– Circuit for partial discharge measurement using a high-voltage coupling capacitor.....	42
Figure B.1	– Equivalent circuit for capacitive transfer of overvoltage	46
Table 1	– Requirements and tests for different categories of transformers based on the U_m of the highest voltage windings.....	14
Table 2	– Test voltage levels (1 of 2).....	15
Table 3	– Test voltage levels used in special cases	16
Table 4	– Minimum clearances in air (1 of 2)	38

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

POWER TRANSFORMERS –**Part 3: Insulation levels, dielectric tests
and external clearances in air**

FOREWORD

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as "IEC Publication(s)"). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC itself does not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC is not responsible for any services carried out by independent certification bodies.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

DISCLAIMER

This Consolidated version is not an official IEC Standard and has been prepared for user convenience. Only the current versions of the standard and its amendment(s) are to be considered the official documents.

This Consolidated version of IEC 60076-3 bears the edition number 3.1. It consists of the third edition (2013-07) [documents 14/745/FDIS and 14/749/RVD] and its amendment 1 (2018-03) [documents 14/947/FDIS and 14/952/RVD]. The technical content is identical to the base edition and its amendment.

In this Redline version, a vertical line in the margin shows where the technical content is modified by amendment 1. Additions are in green text, deletions are in strikethrough red text. A separate Final version with all changes accepted is available in this publication.

International Standard IEC 60076-3 has been prepared by IEC technical committee 14: Power transformers.

This third edition of IEC 60076-3 constitutes a technical revision. The main changes from the previous edition are as follows:

- Three categories of transformer are clearly identified together with the relevant test requirements, these are summarised in Table 1.
- Switching impulse levels are defined for all $U_m > 72,5\text{kV}$.
- The procedure for Induced voltage tests with PD has been revised to ensure adequate phase to phase test voltages.
- The AC withstand test has been redefined (LTAC instead of ACSD).
- Induced voltage tests are now based on U_r rather than U_m .
- New requirements for impulse waveshape (k factor) have been introduced.
- Tables of test levels have been merged and aligned with IEC 60071-1:2010.
- Additional test levels have been introduced for $U_m > 800\text{kV}$.
- A new Annex E has been introduced, which sets out the principles used in assigning the tests, test levels and clearances in air.

This publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 2.

A list of all the parts in the IEC 60076 series, under the general title *Power transformers*, can be found on the IEC website.

The committee has decided that the contents of the base publication and its amendment will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC web site under "<http://webstore.iec.ch>" in the data related to the specific publication. At this date, the publication will be

- reconfirmed,
- withdrawn,
- replaced by a revised edition, or
- amended.

IMPORTANT – The 'colour inside' logo on the cover page of this publication indicates that it contains colours which are considered to be useful for the correct understanding of its contents. Users should therefore print this document using a colour printer.

INTRODUCTION

This part of IEC 60076 specifies the insulation requirements and the corresponding insulation tests with reference to specific windings and their terminals. It also recommends external clearances in air (Clause 16).

The insulation levels and dielectric tests which are specified in this standard apply to the internal insulation only. Whilst it is reasonable that the rated withstand voltage values which are specified for the internal insulation of the transformer should also be taken as a reference for its external insulation, this may not be true in all cases. A failure of the non-self-restoring internal insulation is catastrophic and normally leads to the transformer being out of service for a long period, while an external flashover may involve only a short interruption of service without causing lasting damage. Therefore, it may be that, for increased safety, higher test voltages are specified by the purchaser for the internal insulation of the transformer than for the external insulation of other components in the system. When such a distinction is made, the external clearances should be adjusted to fully cover the internal insulation test requirements.

Annex E sets out some of the principles used in assigning the tests, test levels and clearances in air to the transformer according to the highest voltage for equipment U_m .

POWER TRANSFORMERS –

Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air

1 Scope

This International Standard applies to power transformers as defined by and in the scope of IEC 60076-1. It gives details of the applicable dielectric tests and minimum dielectric test levels. Recommended minimum external clearances in air between live parts and between live parts and earth are given for use when these clearances are not specified by the purchaser.

For categories of power transformers and reactors which have their own IEC standards, this standard is applicable only to the extent in which it is specifically called up by cross reference in the other standards.

2 Normative references

The following documents, in whole or in part, are normatively referenced in this document and are indispensable for its application. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60050-421, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 421: Power transformers and reactors*

IEC 60060-1, *High-voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements*

IEC 60060-2, *High-voltage test techniques – Part 2: Measuring systems*

IEC 60071-1, *Insulation co-ordination – Part 1: Definitions, principles and rules*

IEC 60076-1, *Power transformers – Part 1: General*

IEC 60137, *Insulated bushings for alternating voltages above 1 000 V*

IEC 60270, *High-voltage test techniques – Partial discharge measurements*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC 60076-1, IEC 60050-421 and the following apply.

3.1

highest voltage for equipment applicable to a transformer winding

U_m

highest r.m.s. phase-to-phase voltage in a three-phase system for which a transformer winding is designed in respect of its insulation

3.2 rated voltage of a winding

U_r

voltage assigned to be applied, or developed at no-load, between the terminals of an untapped winding, or a tapped winding connected on the principal tapping, for a three-phase winding it is the voltage between line terminals

Note 1 to entry: The rated voltages of all windings appear simultaneously at no-load when the voltage applied to one of them has its rated value.

Note 2 to entry: For single-phase transformers intended to be connected in star to form a three-phase bank or to be connected between the line and the neutral of a three phase system, the rated voltage is indicated as the phase-to-phase voltage, divided by $\sqrt{3}$, for example $400/\sqrt{3}$ kV.

Note 3 to entry: For single phase transformers intended to be connected between phases of a network, the rated voltage is indicated as the phase-to-phase voltage.

Note 4 to entry: For the series winding of a three-phase series transformer, which is designed as an open winding, the rated voltage is indicated as if the windings were connected in star.

[SOURCE: IEC 60076-1:2011, 3.4.3]

3.3 rated insulation level

set of rated withstand voltages which characterise the dielectric strength of the insulation

3.4 rated withstand voltage

value of the assigned test voltage applied in one of the standard dielectric tests that proves that the insulation complies with the assigned test voltage

3.5 uniform insulation of a transformer winding

insulation of a transformer winding that has all its ends connected to terminals with the same rated insulation level

3.6 non-uniform insulation of a transformer winding

insulation of a transformer winding when it has a neutral terminal end for direct or indirect connection to earth, and is designed with a lower insulation level than that assigned to the line terminal

Note 1 to entry: Non-uniform insulation may also be termed graded insulation.

4 General

The insulation requirements for power transformers and the corresponding insulation tests are given with reference to specific windings and their terminals.

For liquid-immersed or gas-filled transformers, the requirements apply to the internal insulation only. Any additional requirements or tests regarding external insulation which are deemed necessary shall be subject to agreement between manufacturer and purchaser. If the purchaser does not specify any particular requirements for external clearances then the provisions of Clause 16 shall apply. If the purchaser intends to make the connections to the transformer in a way which may reduce the clearances provided by the transformer alone, this should be indicated in the enquiry.

Bushings shall be subject to separate type and routine tests according to IEC 60137 (including appropriate bushing test levels for the particular transformer test level), which verify their phase-to-earth insulation, external as well as internal.

When a transformer is specified for operation at an altitude higher than 1 000 m, clearances shall be designed accordingly. It may then be necessary to select bushings designed for higher insulation levels than otherwise required for operation at lower altitudes, see Clause 16 of this standard and IEC 60137.

The manufacturer may shield the bushing terminals if necessary during the dielectric tests but any shielding of the earthed parts closest to the terminals shall form part of the transformer structure in-service except for shielding required only during partial discharge measurement.

Bushings and tap-changers are specified, designed and tested in accordance with the relevant IEC standards. The dielectric tests on the complete transformer constitute a check on the correct application and installation of these components. In the case of tap-changers which according to IEC 60214-1 are not subjected to dielectric routine tests at the tap-changer manufacturer's works then the tests performed according to this standard also serve as the only dielectric tests routinely performed on this component.

The temperature of the insulation system shall not be less than 10 °C during the tests, but temperatures higher than those given in IEC 60076-1 may be used.

The transformer shall be completely assembled as in service in respect of all elements that might influence the dielectric strength of the transformer. It is normally assumed that the insulating liquid or gas is not circulated during the tests and coolers do not need to be assembled. Any equipment designed to collect or detect free gas produced by faults in the insulation shall be installed and monitored during the tests. If free gas is detected during any test, the nature and cause of the gas shall be investigated and any further actions shall be agreed between purchaser and manufacturer.

NOTE 1 External overvoltage protection devices such as surge arresters do not need to be assembled and bushing spark gaps can be removed or their spacing increased to avoid operation during the tests.

NOTE 2 It is common practice for larger transformers for oil samples to be taken for dissolved gas analysis before and after dielectric tests.

Liquid immersed transformers shall be tested with the same type (mineral, ester, silicone, etc.) and specification (with respect to the properties that might affect the test performance) of liquid that it will contain in service.

NOTE 3 Some purchasers can require that the insulating liquid be circulated on OD cooled transformers during an IVPD test to detect the possibility of static electrification, but this is a very specific requirement and is not covered by this standard.

Transformers for cable box connection or direct connection to metal-enclosed SF₆ installations should be designed so that temporary connections can be made for dielectric tests, using temporary bushings, if necessary. By agreement between manufacturer and purchaser, the service liquid to SF₆ bushings may be replaced by appropriate liquid to air bushings for test, in this case the design of the end of the bushing inside the transformer including the positions of the live parts and the clearances of the substitute bushings inside the transformer shall be the same (within the normal variation of dimensions of the bushing associated with manufacturing tolerances) as those of the in-service bushings.

When the manufacturer intends to use non-linear elements (for example surge arresters or spark gaps), built into the transformer or tap-changer or externally fitted, for the limitation of overvoltage transients, this shall be brought to the purchaser's attention by the manufacturer at the tender and order stage and shall be indicated on the transformer rating plate circuit diagram.

If any terminals of the transformer are to be left open when the transformer is energised in service then consideration needs to be given to the possibility of a transferred voltage occurring on the open terminals, see Annex B. During the lightning impulse tests all non-tested line and neutral terminals are normally connected to earth, see Clause 13.

5 Highest voltage for equipment and rated insulation level

A value of highest voltage for equipment U_m (see Clause 3) is assigned to both the line and neutral end of each winding, see IEC 60076-1.

The rules for dielectric testing depend on the value of U_m . When rules about tests for different windings in a transformer are in conflict, the rule for the winding with the highest U_m value shall apply for the whole transformer.

Series windings (for example found in autotransformers and phase shifting transformers) where the rated voltage of the winding is less than the rated voltage of the system, shall be assigned a value of U_m corresponding to the rated voltage of the highest voltage system to which the winding is connected.

Standardized values of U_m are listed in Table 2. Unless otherwise specified, the value to be used for a transformer winding is the one equal to, or nearest above, the value of the rated voltage of the winding.

NOTE 1 Single-phase transformers intended for connection in star to form a three-phase bank are designated by phase-to-phase rated voltage divided by $\sqrt{3}$, for example $400/\sqrt{3}$ kV. The phase-to-phase value determines the choice of U_m in this case, consequently, $U_m = 420$ kV (see also IEC 60076-1). The same principle applies to single-phase transformers intended for use in a single phase system in that the maximum phase to earth voltage is multiplied by $\sqrt{3}$ to obtain the equivalent U_m in order to define the test voltages.

NOTE 2 For transformer windings intended to be used for example in railway supply applications where two opposite phase to earth voltages are supplied, U_m relates to the phase to phase voltage unless otherwise specified.

NOTE 3 It might happen that certain tapping voltages are chosen slightly higher than a standardized value of U_m , but the system to which the winding will be connected has a system highest voltage which stays within the standard value. The insulation requirements are to be coordinated with actual conditions, and therefore this standard value can be accepted as U_m for the transformer, and not the nearest higher value.

NOTE 4 In certain applications with very special conditions the specification of other combinations of withstand voltages can be justified. In such cases, general guidance should be obtained from IEC 60071-1.

NOTE 5 In certain applications, delta-connected windings are earthed through one of the external terminals. In those applications, a higher withstand voltage with respect to the highest voltage for equipment U_m can be required for this winding and would need to be agreed between manufacturer and purchaser.

The highest voltage for equipment U_m and the rated insulation level (the set of assigned rated withstand voltages) determine the dielectric characteristics of a transformer. These characteristics are verified by a set of dielectric tests, see Clause 7.

The value of U_m and the rated insulation level which are assigned to each winding of a transformer are part of the information to be supplied with an enquiry and with an order. If there is a winding with non-uniform insulation, the assigned U_m and the rated insulation level of the neutral terminal may also be specified by the purchaser, see 7.4.

The rated insulation level shall be characterised as follows:

U_m / SI / LI / LIC / AC with the associated values (see examples below) for the line terminals of each winding

If the winding does not have an assigned SI or LIC withstand level then the abbreviation is omitted from the rating so for terminals without an assigned switching impulse withstand level or chopped wave lightning impulse withstand level and for neutral terminals the abbreviation would be:

U_m / LI / AC together with the associated values

If the neutral terminal of a winding has the same rated insulation level as the line terminal then the rated insulation level of the neutral does not need to be shown separately.

The abbreviations here and in the examples below have the following meaning:

- SI is the rated switching impulse withstand voltage level for the line terminals of the winding with the highest U_m ;
- LI is the rated lightning impulse withstand voltage level for the terminal of each individual winding;
- LIC is the rated lightning impulse withstand voltage level for the line terminals of each individual winding if a chopped wave lightning impulse test was performed;
- AC is the highest rated AC withstand voltage level to earth designed for the terminals of each winding.

NOTE 6 The AC is the value for which the transformer is designed, this is generally the highest AC voltage required to be achieved on test.

- HV high voltage;
- LV low voltage;
- MV medium voltage (intermediate voltage IEC 60076-1);
- N neutral.

The rated withstand voltages for all windings shall appear on the rating plate.

The principles of the standard abbreviated notation are shown in some examples below.

EXAMPLE 1

Transformer with a nominal rated voltage of 66 / 11 kV U_m (HV) = 72,5 kV and U_m (LV) = 12 kV, both uniformly insulated, Y connected, the rating plate would read:

HV U_m 72,5 / LI 325 / AC 140 kV
LV U_m 12 / LI 75 / AC 28 kV

EXAMPLE 2

U_m (HV) line = 245 kV, Y connected (220 kV rated voltage);

U_m (HV) neutral = 52 kV;

U_m (MV) line = 72,5 kV, uniform insulation, Y connected (LIC not specified);

U_m (LV) line = 24 kV, D connected LIC not required.

The rating plate would read:

HV U_m 245 / SI 750 / LI 950 / LIC 1045 / AC 395 kV
HVN U_m 52 / LI 250 / AC 95 kV
MV U_m 72,5 / LI 325 / AC 140 kV
LV U_m 24 / LI 125 / AC 50 kV

6 Transformers with re-connectable windings

Unless otherwise specified, windings which are specified to be capable of being connected in more than one configuration for service shall be tested in each configuration.

7 Dielectric tests

7.1 Overview

The dielectric capability of the transformer insulation is verified by dielectric tests. The following is a general explanation of the different tests.

– **Full wave lightning impulse test for the line terminals (LI)**, see 13.2

The test is intended to verify the capability of the transformer to withstand fast rise time transients in service typically associated with lightning strikes. The test verifies the withstand strength of the transformer under test, when the impulse is applied to its line terminals. The test contains high frequency voltage components and produces non-uniform stresses in the winding under test different to those for an alternating voltage test.

– **Chopped wave lightning impulse test for the line terminals (LIC)**, see 13.3

As well as covering the intention of the LI test, this test is intended to verify the capability of the transformer to withstand some high frequency phenomena that may occur in service. For this test the lightning impulse test includes both full wave impulses and impulses chopped on the tail to produce a very high rate of change of voltage. The chopped wave test voltage impulse has a higher peak value and contains higher frequency components than the full wave impulse.

~~NOTE 1 According to this standard the LIC test is specified for each winding separately. For example, if a routine LIC test is required by this standard on the highest voltage winding this would not lead automatically to LIC tests being required on other winding(s) with $U_m \leq 170$ kV unless LIC tests are specified specifically for these windings by the purchaser.~~

– **Lightning impulse test for the neutral terminal (LIN)**, see 13.4

The test is intended to verify the impulse withstand voltage of the neutral terminal and its connected winding(s) to earth and other windings, and along the winding(s) under test.

– **Switching impulse test for the line terminal (SI)**, see Clause 14

The test is intended to verify the capability of the transformer to withstand slow rise time transient voltages typically associated with switching operations in service. The test verifies the switching impulse withstand strength of the line terminals and the connected winding(s) to earth and other windings. The test also verifies the withstand strength between phases and along the winding(s) under test. This is a single-phase test. The voltage is inductively distributed through all windings of the transformer, line terminals are open circuit for the test and the line terminals of the tested phase experience a voltage during the test approximately determined by the transformer turns ratio.

The voltage distribution in the tested phase is similar to that experienced during an induced voltage withstand test.

– **Applied voltage test (AV)**, see Clause 10

The test is intended to verify the alternating voltage withstand strength of the line and neutral terminals and their connected windings to earth and other windings. The voltage is applied to all the terminals of a winding, including the neutral, simultaneously so there is no turn-to-turn voltage.

– **Line terminal AC withstand voltage test (LTAC)**, see Clause 12

The test is intended to verify the alternating voltage (AC) withstand strength of each line terminal to earth. During the test, voltage appears at one or more of the line terminals. The test allows the line terminals of a transformer with non-uniform insulation to be tested at the applied voltage test level applicable to the line terminals.

– **Induced voltage withstand test (IVW)**, see 11.2

The test is intended to verify the alternating voltage withstand strength of each line terminal and its connected winding(s) to earth and other windings, along the winding(s) under test and the withstand strength between phases. The test is performed with the transformer

connected as for service. During the test, symmetrical voltages appear at all the line terminals and between turns, with no voltage at the neutral. The test is performed with a three phase voltage on three phase transformers.

– **Induced voltage test with PD measurement (IVPD)**, see 11.3

This test is intended to verify that the transformer will be free of harmful partial discharges under normal operating conditions. The test voltage is applied in the same way as the voltage that the transformer will experience in service. During the test, symmetrical voltages appear at all the line terminals and between turns, with no voltage at the neutral. The test is performed with a three phase voltage on three phase transformers.

– **Auxiliary wiring insulation test (AuxW)**, see Clause 9

This test verifies the insulation of the auxiliary wiring of the transformer that is not connected to the windings.

– **Lightning impulses applied to two or more terminals simultaneously (LIMT)**, see 13.1.4.3

This test verifies that the transformer can withstand the internal voltage rises that may occur if two or more terminals are subjected to a lightning impulse simultaneously. The test is only applicable to some special types of transformer with either a series winding that may be shorted in service (for example some phase shifting transformers with an on-load bypass) or where impulses on two or more terminals may occur simultaneously in service.

NOTE-2 This test is also referred to as a 'double-ended lightning impulse test'.

7.2 Test requirements

7.2.1 General

The requirements for dielectric tests, both the required tests and the test voltage levels, depend on the highest voltage for equipment U_m for the highest voltage winding of the particular transformer. The required tests are summarised in Table 1 and specific requirements are given in 7.3.

NOTE Lightning impulses applied to two or more line terminals simultaneously is a special test for only a few special types of transformer irrespective of U_m and is not included in the table for clarity.

Any additional tests above the requirements of this standard and the test voltage levels shall be specified by the purchaser at the time of enquiry and order since they may affect the transformer design (see Annex C).

Reference shall be made to IEC 60060-1 for details of the tests. Where tolerances on test parameters and values are not specifically given in this standard then the values given in IEC 60060-1 shall be used.

Table 1 – Requirements and tests for different categories of transformers based on the U_m of the highest voltage windings

Insulation	$U_m \leq 72,5 \text{ kV}$	$72,5 \text{ kV} < U_m \leq 170 \text{ kV}$		$U_m > 170 \text{ kV}$
	Uniform	Uniform	Non-uniform	Uniform and non-uniform
Full wave lightning impulse test for the line terminals (LI)	Type	Routine	Routine	Not applicable (included in LIC)
Chopped wave lightning impulse test for the line terminals (LIC)	Special	Special	Special	Routine
Lightning impulse test for the neutral terminals (LIN)	Special	Special	Special	Special
Switching impulse test for the line terminal (SI)	Not applicable	Special	Special	Routine
Applied voltage test (AV)	Routine	Routine	Routine	Routine
Induced voltage withstand test (IVW)	Routine	Routine	Routine	Not applicable
Induced voltage test with PD measurement (IVPD)	Special ^a	Routine ^a	Routine ^a	Routine
Line terminal AC withstand voltage test (LTAC)	Not applicable	Special	Routine ^b	Special
Auxiliary wiring insulation test (AuxW)	Routine	Routine	Routine	Routine
^a The requirements of the IVW test can be incorporated in the IVPD test so that only one test is required. ^b The LTAC test for this category of transformers can be replaced by a switching impulse test by agreement between manufacturer and purchaser.				

7.2.2 Test voltage levels

Levels of standard test voltages, identified by the highest voltage for equipment U_m of a winding are given in Table 2. The choice between the different levels of test voltages in these tables depends on the severity of overvoltage conditions to be expected in the system and on the importance of the particular installation. Guidance may be obtained from IEC 60071-1.

All test voltages are phase to earth.

The lowest values given in Table 2 for a particular value of U_m represent the minimum test voltage levels and shall be used if nothing else is specified. In general the values given in each row in Table 2 are co-ordinated. If only a lightning impulse level is specified then the other values on the same row shall be used. The purchaser may specify any value higher than the minimum for the particular U_m for each test, preferably standard values for coordination, but not necessarily the values from a single row in Table 2. If higher levels are specified this shall be stated in the enquiry and order.

If, under special circumstances, the minimum levels given in Table 2 are considered too high by the purchaser then the values in Table 3 may be used. The values in Table 3 may only be used if special precautions have been taken to avoid overvoltage conditions beyond the capability of the transformer and either extensive studies have been completed or the values used represent proven existing practice applicable to the installation.

NOTE Certain installation conditions, particularly where energisation of the transformer is from the remote end of a cable or a long overhead line, can lead to severe exposure to overvoltages which might be frequent and repetitive. In such cases, higher test voltages, lightning impulse, switching impulse and other tests on individual units could be agreed between manufacturer and purchaser. For example a winding with a $U_m < 1,1 \text{ kV}$ might be tested at the values appropriate to a winding with a U_m of 3,6 kV. The specific voltage-time characteristic of the overvoltage is an important consideration when deciding the type and level of the test required to assure satisfactory operation.

In particular, failures have been reported at $U_m = 36$ kV and below where the transformer is energised/de-energised by a vacuum type circuit breaker from the remote end of a cable because a resonant condition might exist causing re-ignitions and repetitive transients. In certain cases increasing the insulation level might not be sufficient and other methods such as the installation of a snubber circuit could be considered. Further information is contained in IEEE C57.142:2010 and CIGRE report 12-14.

Table 2 – Test voltage levels (1 of 2)

Highest Voltage for equipment winding U_m kV	Full Wave Lightning Impulse (LI) kV	Chopped Wave Lightning Impulse (LIC) kV	Switching impulse (SI) kV	Applied voltage or line terminal AC withstand (AV) (LTAC) kV
<1,1	–	–	–	3
3,6	20	22	–	10
	40	44	–	10
7,2	60	66	–	20
	75 ^a	83 ^a	–	20
12	75	83	–	28
	95	105	–	28
	110 ^a	121 ^a	–	34 ^a
17,5	95	105	–	38
	125 ^a	138 ^a	–	38
24	125	138	–	50
	145	160	–	50
	150 ^a	165 ^a	–	50
36	170	187	–	70
	200 ^a	220 ^a	–	70
52	250	275	–	95
72,5	325	358	–	140
	350 ^a	385 ^a	–	140
100	450	495	375 ^a	185
123	550	605	460 ^a	230
145	550	605	460 ^a	230
	650	715	540 ^a	275
170	650	715	540 ^a	275
	750	825	620 ^a	325
245	850	935	700 ^a	360
	950	1 045	750 ^a	395
	1 050	1 155	850 ^a	460
300	950	1 045	750	395
	1 050	1 155	850	460
362	1 050	1 155	850	460
	1 175	1 290	950	510
420	1 175	1 290	950	510
	1 300	1 430	1 050	570
	1 425	1 570	1 175 ^a	630

Table 2 (2 of 2)

Highest Voltage for equipment winding U_m kV	Full Wave Lightning Impulse (LI) kV	Chopped Wave Lightning Impulse (LIC) kV	Switching impulse (SI) kV	Applied voltage or line terminal AC withstand (AV) (LTAC) kV
550	1 300	1 430	1 050	570
	1 425	1 570	1 175	630
	1 550	1 705	1 300 ^a	680
	1 675 ^a	1 845 ^a	1 390 ^a	-
800	1 800	1 980	1 425	-
	1 950	2 145	1 550	-
	2 050 ^a	2 255 ^a	1 700 ^a	-
	2 100	2 310	1 675 ^a	-
1 100	1 950	2 145	1 425	-
	2 250	2 475	1 800	-
1 200	2 250	2 475	1 800	-

^a These values are not given in IEC 60071-1:2011 for the particular value of U_m but are included either because they represent common practice in some parts of the world or for some switching impulse levels, because they represent a co-ordinated value for a particular value of lightning impulse level.

Table 3 – Test voltage levels used in special cases

Highest Voltage for equipment winding U_m kV	Full Wave Lightning Impulse (LI) kV	Chopped Wave Lightning Impulse (LIC) kV	Switching impulse (SI) kV	Applied voltage or line terminal AC withstand (AV) (LTAC) kV
7,2	40	44	-	20
12	60	66	-	28
17,5	75	83	-	38
24	95	105	-	50
36	145	160	-	70
60 ^a	280 ^a	308 ^a	230 ^a	115 ^a
123 ^b	450 ^b	495 ^b	375 ^a	185 ^b
170 ^b	550 ^b	605 ^b	460 ^a	230 ^b
245	650 ^b	715 ^b	550 ^a	275 ^b
	750 ^b	825 ^b	620 ^a	325 ^b
300	850	935	750	395
362	950	1 045	850	395
420	1 050	1 155	850	460
550	1 175	1 290	950	510

^a These values are not given in IEC 60071-1:2011 for the particular value of U_m but are included because they represent existing practice in some parts of the world.

^b these values require special consideration, refer to IEC 60071-1:2011

7.2.3 Test sequence

The tests shall be performed in the sequence given below:

- a) lightning impulse tests (LI, LIC, LIN, LIMT);
- b) switching impulse (SI);
- c) applied voltage test (AV);
- d) line terminal AC withstand test (LTAC);
- e) induced voltage withstand test (IVW);
- f) induced voltage test with partial discharge measurement (IVPD).

NOTE This is a comprehensive list, not all these tests will be applicable to a particular transformer.

By agreement between the manufacturer and purchaser, the switching impulse test may be performed before the lightning impulse test.

If an IVPD test is to be performed then by agreement between the manufacturer and purchaser, the test sequence may be varied except that the IVPD test shall be the last dielectric test.

7.3 Test requirements for specific transformers

7.3.1 Tests for transformers with $U_m \leq 72,5$ kV

7.3.1.1 Routine tests

- a) Applied voltage test (AV)

An applied voltage test shall be performed according to the method given in Clause 10 on each separate winding of the transformer. Test voltages are given in Table 2.

NOTE Transformers with $U_m \leq 72,5$ kV are expected to have uniform winding insulation to satisfy this test.

- b) Induced voltage withstand test (IVW)

An induced voltage withstand test shall be performed according to the method given in 11.2 with a (phase to earth) test voltage of $(2 \times U_r) / \sqrt{3}$. If agreed by the purchaser this test may be substituted by an IVPD test with an enhancement voltage of $(2 \times U_r) / \sqrt{3}$ see 7.3.1.3 a).

7.3.1.2 Type tests

Full wave lightning impulse test (LI)

A full wave lightning impulse test shall be carried out on the line terminals using the method given in 13.1 and 13.2. Test voltages are given in Table 2.

7.3.1.3 Special tests

- a) Induced voltage test with partial discharge measurement (IVPD)

If specified by the purchaser, a test shall be carried out according to the method given in 11.3, with an enhancement (phase to earth) voltage level of $(1,8 \times U_r) / \sqrt{3}$ and a PD measurement voltage of $(1,58 \times U_r) / \sqrt{3}$. Alternative higher voltage levels may be used if specified by the purchaser. In particular an enhancement voltage of $(\sqrt{3} \times U_m) / \sqrt{3}$ and a PD measurement voltage of $(1,5 \times U_m) / \sqrt{3}$ may be used if higher.

If an enhancement voltage level of $(2 \times U_r) / \sqrt{3}$ is used this test can substitute for the routine induced voltage withstand test.

A shorter duration at the PD measurement voltage may be agreed between manufacturer and purchaser, a duration of 5 min is recommended.

- b) Chopped wave lightning impulse test (LIC)

If specified by the purchaser the full wave lightning impulse test shall be substituted by a chopped wave lightning impulse test according to the method given in 13.1 and 13.3.

The extension of the lightning impulse test to include impulses chopped on the tail as a special test is recommended in cases where the transformer is directly connected to GIS by means of liquid to SF6 bushings or when the transformer is protected by rod gaps.

c) Lightning impulse test on the neutral terminal (LIN)

If specified by the purchaser a full wave lightning impulse test shall be carried out on the neutral terminal according to the method given in 13.1 and 13.4. This normally applies if the neutral is not directly connected to earth in service.

d) Lightning impulses applied to multiple line terminals simultaneously (LIMT)

If specified by the purchaser an additional lightning impulse test on two or more terminals connected together shall be performed according to the method given in 13.1 with the test connections given in 13.1.4.3. If not otherwise specified the type of test is LI.

7.3.2 Tests on transformers with $72,5 \text{ kV} < U_m \leq 170 \text{ kV}$

7.3.2.1 Routine tests

a) Full wave lightning impulse test (LI)

A full wave lightning impulse test shall be carried out on the line terminals using the method given in Clause 13 Test voltages are given in Table 2.

b) Applied voltage test (AV)

An applied voltage test in accordance with the method given in Clause 10 shall be performed on each separate winding of the transformer. Test voltages are given in Table 2 for transformers with uniform insulation. For transformers with non-uniform insulation the test shall be carried out at the test voltage for the neutral terminal see 7.4.2.

c) Induced voltage withstand test (IVW)

An induced voltage withstand test shall be performed according to the method given in 11.2 with a (phase to earth) test voltage of $(2 \times U_r) / \sqrt{3}$. If agreed by the purchaser this test may be substituted by an IVPD test with an enhancement voltage $(2 \times U_r) / \sqrt{3}$, see e) below.

d) Line terminal AC withstand voltage test for non-uniformly insulated transformers (LTAC)

For windings with non-uniform insulation this test shall be performed at the test level given for the applied voltage test applicable to the line terminal in Table 2 using the method given in Clause 12. This test may be omitted if a switching impulse test is performed by agreement between manufacturer and purchaser.

e) Induced voltage test with partial discharge measurement (IVPD)

A test shall be carried out according to the method given in 11.3, with an enhancement (phase to earth) voltage level of $(1,8 \times U_r) / \sqrt{3}$ and a PD measurement voltage of $(1,58 \times U_r) / \sqrt{3}$. Alternative higher voltage levels may be used if specified by the purchaser. In particular an enhancement voltage of $(\sqrt{3} \times U_m) / \sqrt{3}$ and a PD measurement voltage of $(1,5 \times U_m) / \sqrt{3}$ may be used if higher.

If an enhancement voltage level of $(2 \times U_r) / \sqrt{3}$ is used this test can substitute for the routine induced voltage withstand test.

7.3.2.2 Special tests

a) Switching impulse test (SI)

If specified by the purchaser a switching impulse test using the method given in Clause 14 shall be performed on the line terminals. The test voltage is given in Table 2. If this test is carried out, then the Line Terminal AC Withstand Test (LTAC) may be omitted by agreement.

b) Chopped wave lightning impulse test (LIC)

If specified by the purchaser the full wave lightning impulse test shall be substituted by a chopped wave lightning impulse test according to the method given in 13.1 and 13.3.

The extension of the lightning impulse test to include impulses chopped on the tail as a special test is recommended in cases where the transformer is directly connected to GIS by means of liquid to SF6 bushings or when the transformer is protected by rod gaps.

c) Line terminal AC withstand voltage test (LTAC)

If specified by the purchaser for windings with uniform insulation, this test shall be performed at the test level given for the applied voltage test applicable to the line terminal in Table 2 using the method given in Clause 12.

d) Lightning impulse test on the neutral terminal (LIN)

If specified by the purchaser a full wave lightning impulse test shall be carried out on the neutral terminal. This normally applies if the neutral is not directly connected to earth in service.

e) Lightning impulses applied to multiple line terminals simultaneously (LIMT)

If specified by the purchaser an additional lightning impulse test on two or more terminals connected together shall be performed according to the method given in 13.1 with the test connections given in 13.1.4.3. If not otherwise specified the type of test is LI.

7.3.3 Tests on Transformers with $U_m > 170$ kV

7.3.3.1 Routine tests

a) Chopped wave lightning impulse test (LIC)

A chopped wave lightning impulse test shall be carried out on ~~the~~ all line terminals with a $U_m > 170$ kV using the method given in Clause 13. A lightning impulse test (LI) shall be carried out on all line terminals with $U_m \leq 170$ kV using the method given in Clause 13. Test voltages are given in Table 2. If required by the purchaser in the contract, LIC tests shall additionally be carried out on line terminals with $U_m \leq 170$ kV.

b) Switching impulse test (SI)

A switching impulse test using the method given in Clause 14 shall be performed on the line terminals. The test voltage is given in Table 2.

c) Applied voltage test (AV)

An applied voltage test shall be performed in accordance with the method given in Clause 10 on each separate winding of the transformer. Test voltages are given in Table 2 for transformers with uniform insulation. For transformers with non-uniform insulation the test shall be carried out at the test voltage for the neutral terminal see 7.4.2.

d) Induced voltage test with partial discharge measurement (IVPD)

A test shall be carried out using the method given in 11.3, with an enhancement (phase to earth) voltage level of $(1,8 \times U_r) / \sqrt{3}$ and a one hour PD measurement voltage of $(1,58 \times U_r) / \sqrt{3}$. Alternative higher voltage levels may be used if specified by the purchaser. In particular an enhancement voltage of $(\sqrt{3} \times U_m) / \sqrt{3}$ and a one hour PD measurement voltage of $(1,5 \times U_m) / \sqrt{3}$ may be used if higher.

NOTE For three phase transformers, the voltage between the phases at the IVPD-enhancement level can be higher than the phase to earth AC withstand voltages given in Table 2 – Test voltage levels.

7.3.3.2 Special tests

a) Lightning impulse test on the neutral terminal (LIN)

If specified by the purchaser a full wave lightning impulse test shall be carried out on the neutral terminal. This normally applies if the neutral is not directly connected to earth in service.

b) Line terminal AC withstand voltage test for non-uniformly insulated windings (LTAC)

If specified by the purchaser this test shall be performed at the test level given for the applied voltage test applicable to the line terminal in Table 2 using the method given in Clause 12.

c) **Lightning impulses applied to multiple line terminals simultaneously (LIMT)**

If specified by the purchaser an additional lightning impulse test on two or more terminals connected together shall be performed according to the method given in 13.1 with the test connections given in 13.1.4.3. If not otherwise specified the type of test is LIC.

7.4 Assigning U_m and test voltages to the neutral terminal of a winding

7.4.1 Transformers with $U_m \leq 72,5$ kV

The neutral shall be tested at the applied voltage test level for the line terminals. If a lightning impulse test on the neutral terminal is specified then the test level shall be given in the enquiry and order.

NOTE Transformers with $U_m \leq 72,5$ kV need to be designed with uniform winding insulation to satisfy the test requirements.

7.4.2 Transformers with $U_m > 72,5$ kV

7.4.2.1 Directly earthed neutral terminal

If the neutral terminal is to be permanently connected to earth in service, either directly or through a current transformer, but without any intentionally added impedance in the connection then the applied voltage test voltage shall be at least 38 kV ($U_m \geq 17,5$ kV). Higher test levels may be specified.

No impulse test on the neutral terminal is recommended but it may be specified.

7.4.2.2 Neutral terminal not directly earthed

The U_m and test voltages for the neutral terminal shall be given by the purchaser at the time of enquiry and order. The U_m of the neutral depends on whether the neutral terminal is intended to be left open or earthed via an impedance (see Annex D). The value of U_m and the test voltages shall preferably be selected from Table 2. U_m shall in no case be less than 17,5 kV.

If a lightning impulse test on the neutral terminal is specified, then the test level shall be given in the enquiry and order, and the rated impulse withstand voltage of the neutral terminal shall be verified by the test described in 13.4. A chopped wave lightning impulse test on the neutral is not applicable.

8 Dielectric tests on transformers that have been in service

Any transformer that is to be regarded as complying with this standard in the same way as a new transformer (for example following a warranty repair or complete rewind and refurbishment intended to restore the transformer to the 'as new' condition) shall be subject to all the routine tests required by this standard for the transformer at 100 % of the required test voltage level after the repair or refurbishment is complete.

Any transformer that is repaired to restore its functionality (for example after a breakdown following many years in service) but is still to be regarded as compliant with this standard shall be subject to the tests described in this standard necessary to verify the repair at a test voltage of between 80 % and 100 % of the original test voltage level. As a general guide any new part of a repaired transformer should be tested at 100 %, but 80 % of the original test voltage level may be regarded as an adequate test voltage level for verifying that used parts or components are suitable for continued use. Where both old and new parts are tested at the same time then an agreement on the test voltage level shall be reached. The IVPD test shall be performed at

100 % of the original test voltage level. The partial discharge criteria may need to be modified depending on the circumstances of the test and this shall be subject to agreement.

9 Insulation of auxiliary wiring (AuxW)

The wiring for auxiliary power, and control circuitry shall be subjected to a 1 min AC separate source test of 2 kV to earth. The test is passed if no voltage collapse or other sign of breakdown occurs. The test shall be carried out at the manufacturer's works, unless the transformer is to be installed on-site by the manufacturer in which case the test may be performed on-site instead of in the factory. Wiring disconnected or removed for transport which has been subject to a 2 kV test at the factory shall be tested at site following erection using either a repeat of the 2 kV AC test or a 1 kV DC insulation resistance measurement with a minimum measured resistance of 1 M Ω .

The wiring for current transformer secondary windings shall be tested at 2,5 kV AC to earth for 1 min. The test shall be carried out at the manufacturer's works. If the current transformer knee-point voltage exceeds 2 kV AC the test shall be performed at 4 kV AC. The test is passed if no voltage collapse or other sign of breakdown occurs.

Motors and other apparatus for auxiliary equipment shall fulfil insulation requirements according to the relevant IEC standard (which are generally lower than the value specified for the wiring alone, and which may sometimes make it necessary to disconnect them in order to test the circuits). All solid state and microprocessor based devices shall be excluded from the test circuit. All three phase undervoltage relays and withdrawable type devices shall be removed from the test circuit.

NOTE It is normal practice for all the auxiliary wiring to be checked on-site at 1 kV DC for 1 min before energisation.

10 Applied voltage test (AV)

The test shall be carried out on each separate winding of the transformer in turn.

The full test voltage shall be applied for 60 s between all accessible terminals of the winding under test connected together and all accessible terminals of the remaining windings, core, frame and tank or casing of the transformer, connected to earth.

The test shall be made with an approximately sinusoidal single-phase alternating voltage at not less than 80 % of the rated frequency. The peak value of voltage shall be measured. The peak value divided by $\sqrt{2}$ shall be equal to the test value.

NOTE Approximately sinusoidal can be taken to mean that the peak value divided by $\sqrt{2}$ does not differ from the r.m.s value of the waveform by more than about 5 % (see IEC 60060-1), but wider deviations may be accepted.

The test shall commence at a voltage not greater than one-third of the specified test value, and the voltage shall be increased to the test value as rapidly as is consistent with measurement. At the end of the test, the voltage shall be reduced rapidly to less than one-third of the test value before switching off.

The test is successful if no collapse of the test voltage occurs.

For windings with non-uniform insulation, the test is carried out with the test voltage specified for the neutral terminal.

In transformers where windings having different U_m values are connected together within the transformer (usually auto-transformers), the test voltages shall be determined by the insulation of the common neutral and its assigned U_m .

11 Induced voltage tests (IVW and IVPD)

11.1 General

The test shall be carried out with any accessible neutral terminals and any other terminals that are normally at earth potential in service earthed. For three phase transformers a symmetrical three phase test voltage shall be used. Any line terminals not connected to the test supply shall be left open.

NOTE 1 When voltage is induced in a winding with no neutral connection, the voltages with respect to earth at each terminal of this winding will depend on the capacitances to earth and other windings. Any flashover from one of the line terminals to earth during the test can result in voltages exceeding the applied voltage test level appearing at the other terminals of the winding. Suitable precautions can be required to take account of this possibility.

During the test, the test voltage appropriate to a winding without voltage variation shall appear at the terminals of that winding so that the voltages between turns and between phases will have the same ratio between test voltage and rated voltage. The voltage shall either be measured on the highest voltage terminals, or if this is not practical the voltage shall be measured at the terminals of the transformer connected to the supply.

For transformers with tapplings, the test shall be carried out with the transformer on principal tap unless otherwise specified or agreed by the purchaser.

If the purchaser requires a specific test voltage for lower voltage windings higher than the voltage determined in this clause then this shall be clearly stated in the enquiry and tender and an agreement reached on the method of test and the test voltages that will appear on the higher voltage windings which may consequently exceed the specified test voltages.

The test shall be performed with the transformer excited exactly as it will be for service. The voltage may be induced from any winding or from a special winding or taps provided for test purposes.

An alternating voltage shall be applied to the terminals of one winding of the transformer. The form of the voltage shall be as nearly as possible sinusoidal and its frequency shall be sufficiently above the rated frequency to avoid excessive magnetizing current during the test.

The peak value, as defined in IEC 60060-1 divided by $\sqrt{2}$ and the r.m.s. value of the induced test voltage shall be measured and the lower of the peak value divided by $\sqrt{2}$ and the r.m.s. value shall be taken as the test value.

11.2 Induced voltage withstand test (IVW)

The test time at full test voltage shall be 60 s for any test frequency up to and including twice the rated frequency, unless otherwise specified. When the test frequency exceeds twice the rated frequency, the test time in seconds of the test shall be:

$$120 \times \frac{\text{rated frequency}}{\text{test frequency}}, \text{ but not less than } 15 \text{ s}$$

The test shall commence at a voltage not greater than one-third of the specified test value, and the voltage shall be increased to the test value as rapidly as is consistent with measurement. At the end of the test, the voltage shall be reduced rapidly to less than one-third of the test value before switching off.

The test is successful if no collapse of the test voltage occurs.

11.3 Induced voltage test with partial discharge measurement (IVPD)

11.3.1 General

When a particular type of bushing is specified by the purchaser that is expected to have a partial discharge level that will prevent accurate partial discharge measurements of the transformer on test it is permitted to exchange the bushings for a partial discharge free type during the testing of the transformer.

11.3.2 Test duration and frequency

The test time at the enhancement voltage shall be 60 s in case $U_m \leq 800$ kV and 300 s in case $U_m > 800$ kV for any test frequency up to and including twice the rated frequency, unless otherwise specified. When the test frequency exceeds twice the rated frequency, the test time in seconds of the test shall be:

$$120 \times \frac{\text{rated frequency}}{\text{test frequency}}, \text{ but not less than 15 s for } U_m \leq 800 \text{ kV}$$

or

$$600 \times \frac{\text{rated frequency}}{\text{test frequency}}, \text{ but not less than 75 s for } U_m > 800 \text{ kV}$$

The duration of the test, except for the enhancement level, shall be independent of the test frequency

11.3.3 Test sequence

The test sequence shall be as follows:

- a) The voltage shall be switched on at a voltage not higher than $(0,4 \times U_r)/\sqrt{3}$.
- b) The voltage shall be raised to $(0,4 \times U_r)/\sqrt{3}$ and a background PD measurement shall be made and recorded.
- c) The voltage shall be raised to $(1,2 \times U_r)/\sqrt{3}$ and held there for a minimum duration of 1 min and only long enough to make a stable PD measurement.
- d) The PD level shall be measured and recorded.
- e) The voltage shall be raised to the one hour PD measurement voltage and held there for a minimum duration of 5 min and only long enough to make a stable PD measurement.
- f) The PD level shall be measured and recorded.
- g) The voltage shall be raised to the enhancement voltage and held there for the test time in 11.3.2.
- h) Immediately after the test time, the voltage shall be reduced without interruption to the one hour PD measurement voltage.
- i) The PD level shall be measured and recorded.
- j) The voltage shall be held at the one hour PD measurement voltage for a duration of at least one hour following the PD measurement.
- k) The PD level shall be measured and recorded every 5 min during the one hour period.
- l) After the last PD measurement in the one hour period the voltage shall be reduced to $(1,2 \times U_r)/\sqrt{3}$ and held there for a minimum duration of 1 min and only long enough to make a stable PD measurement.

- m) The PD level shall be measured and recorded.
- n) The voltage shall be reduced to $(0,4 \times U_r) / \sqrt{3}$ and the background PD level shall be measured and recorded.
- o) The voltage shall be reduced to a value below $(0,4 \times U_r) / \sqrt{3}$.
- p) The voltage shall be switched off.

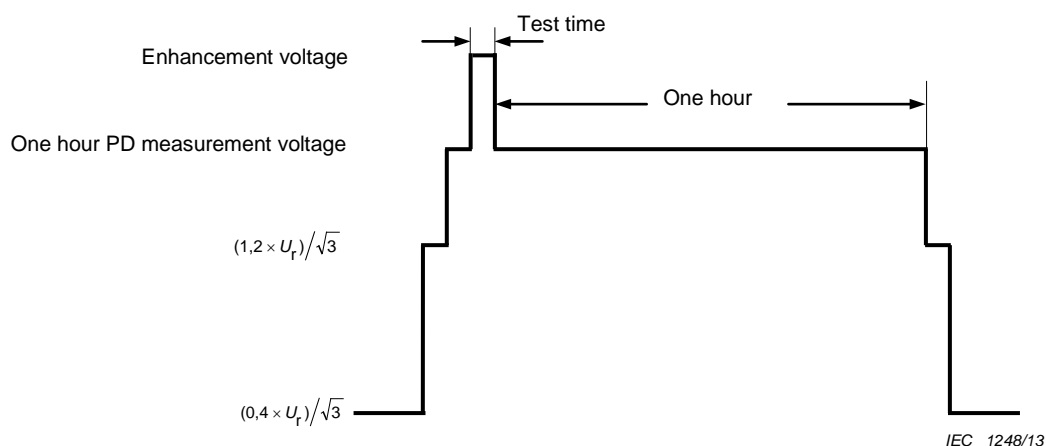
The partial discharge level shall be continuously observed on at least one measuring channel for the entire duration of the test.

During the test sequence the inception and extinction voltages of any significant PD activity should be noted to aid the evaluation of the test result if the test criteria are not met.

NOTE It can also be helpful to record the PD pattern (phase angle, apparent charge and number) of any significant PD activity to aid evaluation.

Enhancement voltage level and one hour PD measurement voltage are given in 7.3.1.3, 7.3.2.1 and 7.3.3.1 depending on the U_m of the transformer.

The main features of the test sequence are illustrated in Figure 1.



NOTE Enhancement voltage level and one hour PD measurement voltage are given in 7.3.1.3, 7.3.2.1 and 7.3.3.1

Figure 1 – Time sequence for the application of test voltage for induced voltage test with partial discharge measurement (IVPD)

11.3.4 Partial discharge (PD) measurement

Partial discharges shall be measured by a method according to IEC 60270.

Each PD measurement channel including the associated bushing or coupling capacitor shall be calibrated in terms of apparent charge (pC) according to the method given in IEC 60270.

The PD measurement shall be given in pC and shall refer to the highest steady-state repetitive impulses indicated by the measuring instrument.

Occasional bursts of high partial discharge level may be disregarded.

For each required PD measurement step in the test sequence, PD measurements shall be made and recorded on all the line terminals equipped with bushings with a $U_m \geq 72,5$ kV, during the test, however if there are more than six such terminals then only six measurements need to be made (one on each of the highest voltage terminals) unless otherwise specified.

NOTE Bushings with $U_m \geq 72,5$ kV are equipped with test taps according to IEC 60137 which can be used for the measurement, if this test is specified as a special test for transformers with a $U_m < 72,5$ kV then the method of measurement will have to be agreed between the manufacturer and purchaser.

11.3.5 Test acceptance criteria

The test can only be considered valid if the measured background PD level does not exceed 50 pC at both the beginning and the end of the test. For tests on shunt reactors a background PD level of up to 100pC may be accepted.

NOTE The higher background level for shunt reactors is because filtering of the test supply might not be possible where high current and high voltage is required.

The test is successful if all the following criteria are fulfilled:

- a) no collapse of the test voltage occurs;
- b) none of the PD levels recorded during the one hour period exceed 250 pC;
- c) the PD levels measured during the one hour period do not exhibit any rising trend and no sudden sustained increase in the levels occur during the last 20 min of the test;
- d) the measured PD levels during the one hour period do not increase by more than 50 pC;
- e) the PD level measured at a voltage level of $(1,2 \times U_T)/\sqrt{3}$ after the one hour period does not exceed 100 pC.

If the criteria c) or d) are not met, the one hour period may be extended and these criteria will be considered to have been met if they are fulfilled for a continuous period of one hour.

As long as no breakdown occurs, and unless very high partial discharges are sustained for a long time, the test is regarded as non-destructive. A failure to meet the partial discharge acceptance criteria shall therefore not warrant immediate rejection, but lead to consultation between purchaser and manufacturer about further investigations. Suggestions for such procedures are given in Annex A.

12 Line terminal AC withstand test (LTAC)

The test shall be arranged so that the test voltage appears between the tested terminal and earth. Each phase terminal of the tested winding shall be tested in turn. The test time, frequency and voltage application shall be as given for the induced voltage withstand test see 11.2.

For transformers with taps and a non-uniformly insulated lower voltage winding, the tap position for test shall be selected so that when the required test voltage appears on the highest voltage winding terminals, the voltage appearing on the lower voltage winding terminals shall be as close as possible to the required applied test value. For transformers with a uniformly insulated lower voltage winding subject to an applied voltage test, the tap position may be chosen by the manufacturer.

The test is successful if no collapse of the test voltage occurs.

NOTE This test is intended only as a withstand test for each line terminal of a non-uniformly insulated transformer to earth, it is not intended to test the phase to phase or turn to turn insulation so the test arrangement can be made in any convenient way, for example with voltage at the neutral to reduce the turn to turn voltage and the test will normally be carried out as three single phase tests. Under normal circumstances the switching impulse test fully covers the intent of this test. If required by the purchaser partial discharge measurements can be made during this test.

13 Lightning impulse tests (LI, LIC, LIN, LIMT)

13.1 Requirements for all lightning impulse tests

13.1.1 General

General definitions of terms related to impulse tests and requirements for test circuits are given in IEC 60060-1. General definitions of terms related to performance tests and routine checks on approved measuring devices are given in IEC 60060-2. Further information is given in IEC 60076-4.

For liquid-immersed transformers, the test voltage is normally of negative polarity, because this reduces the risk of erratic external flashovers in the test circuit. One, more or all of the impulses may be specified by the purchaser to be of positive polarity. If positive impulses are required by the purchaser this shall be stated in the enquiry and order. If a mixture of impulse polarities are used then additional reference impulses will be required and the test sequence shall be agreed between the manufacturer and purchaser.

Before an impulse of opposite polarity is applied, sufficient time should be allowed for any residual charge to dissipate.

13.1.2 Tap positions

If the tapping range is $\pm 5\%$ or less and the rated power of the transformer is $\leq 2\,500$ kVA then, the lightning impulse tests shall be made with the transformer connected on the principal tapping.

If the tapping range is larger than $\pm 5\%$ or the rated power of the transformer is $> 2\,500$ kVA then, unless otherwise agreed, the two extreme tappings and the principal tapping shall be used, one tapping for each of the three individual phases of a three-phase transformer or the three single-phase transformers designed to form a three-phase bank.

Alternatively if specified by the purchaser and in special cases such as one single phase transformer, or multiple tap-changers, or when the tapping-range is not symmetrical, the tap-position which gives the highest internal voltages (determined either by calculation or by performing low voltage impulse measurements) shall be used. If different tap-positions give highest internal voltages in different parts of the insulation then by agreement those different tap positions may be tested, one on each phase of a three phase transformer.

NOTE Particular attention is drawn to the difference between the raise and lower positions at the change-over tap position(s) of a reversing type tapping winding or of a coarse-fine type tapping winding as these give different internal voltages.

In the case of a coarse-fine type tapping winding, if the tap-changer diverter is provided with a non-linear element or arcing gap, which might operate if the transformer is tested on a particular tap-position, then an alternative tap-position may be chosen. Guidance is given in IEC 60076-4.

13.1.3 Records of tests

The applied test voltage shall be recorded using a measurement system according to IEC 60060-2. The records obtained shall clearly show the applied voltage impulse shape (front time, time-to-half value and amplitude).

The recorded curve and the extreme value of the recorded curve (as defined in IEC 60060-1) shall be presented in the test record.

The value of the test voltage (after the application of any filtering or correction for overshoot, U_t see IEC 60060-1) shall be reported in the test record.

At least one more measurement channel shall be used. In most cases an oscillogram of the current flowing to earth from the tested winding (neutral current) or the capacitive probe current, i.e. the current transferred to the non-tested and shorted winding, will represent the best sensitivity for fault indication. The current flowing from tank to earth, or the transferred voltage in a non-tested winding, are examples of alternative suitable measuring quantities. The detection method chosen shall be agreed between manufacturer and purchaser.

Further recommendations about failure detection, suitable time-base durations, etc. are given in IEC 60076-4.

13.1.4 Test connections

13.1.4.1 Test connections during tests on line terminals

The impulse test sequence is applied to each of the line terminals of the tested winding in succession. The other line terminals of the transformer shall be earthed directly or, if needed to achieve the required waveshape, through an impedance. The impedance shall not exceed the surge impedance of the connected line (if a value is supplied by the purchaser) or 400 Ω whichever is lower. In all circumstances, the voltage appearing during the impulse test at the other line terminals shall not be more than 75 % of their rated lightning impulse withstand voltage for star-connected windings, or 50 % for delta-connected windings. The lowest value of impedance at each terminal needed to achieve the required waveshape shall be used.

If the winding has a neutral terminal, the neutral shall be earthed directly or through a low impedance such as a current measuring shunt. The tank shall be earthed. If the required waveshape cannot be obtained without the use of a resistor between neutral and earth, then an additional complete impulse test sequence shall be applied. In this case the first impulse test sequence tests the winding at the full voltage without the resistor but the required waveshape may not be achieved and the second sequence with the resistor achieves the waveshape. Chopped waves, if required, would not be repeated in the second sequence.

When a transformer is fitted with internal non-linear elements such as surge arresters which will limit the voltage on internal parts during the impulse test then the provisions of 13.2.3 apply. Any such internal non-linear elements which are present in the service condition shall be present during the tests. External non-linear elements and other external voltage control elements such as capacitors shall be disconnected for test.

The impulse circuit and measuring connections shall remain unchanged during reference and full voltage tests.

Exceptions from this main procedure are given in 13.3.2 and 13.3.3.

NOTE If an impulse test is required by the purchaser on an LV winding with $U_m \leq 1,1$ kV then this is normally applied to all the LV terminals (including the LV neutral) connected together with the higher voltage terminals earthed.

13.1.4.2 Test connections for lightning impulse on the neutral

Lightning impulses are applied directly to the neutral with all other terminals earthed.

When a transformer is fitted with internal non-linear elements such as surge arresters which will limit the voltage on internal parts during the impulse test then the provisions of 13.2.3 apply. Any such internal non-linear elements which are present in the service condition shall be present during the tests. External non-linear elements shall be disconnected for test.

For transformers having a tapped winding near the neutral end of the winding, the tapping connection with the maximum turns ratio shall be chosen for the impulse test, if not otherwise agreed between purchaser and manufacturer.

The impulse circuit and measuring connections shall remain unchanged during reference and full voltage tests.

13.1.4.3 Test connections for lightning impulses applied to multiple line terminals simultaneously (LIMT)

The purchaser shall specify the terminals which are to be connected together for this test.

Lightning impulses shall be applied simultaneously to the specified line terminals connected together with the other terminals earthed. The test levels and details of the test arrangement shall be agreed. The test shall be carried out on each phase in turn.

NOTE The voltages appearing within the winding during this test can significantly exceed the terminal voltages during this test.

13.2 Full wave lightning impulse test (LI)

13.2.1 Wave shape, determination of test voltage value and tolerances

The test impulse shall be a full standard lightning impulse: $1,2 \pm 30 \% / 50 \mu\text{s} \pm 20 \%..$

The test voltage value shall be the test voltage value as defined in IEC 60060-1 (after the test voltage function is applied). If the maximum relative overshoot magnitude is 5 % or less, the test voltage value may be taken as the extreme value as defined in IEC 60060-1.

The tolerance on the test voltage value is $\pm 3 \%$.

It is important that the manufacturer assesses the adequacy of the test equipment to achieve a waveshape within the tolerances for the particular combination of transformer and test equipment at the bid stage and has a reasonable expectation of meeting the requirements. In circumstances where the manufacturer believes that it is not reasonably possible to meet the waveshape because of the transformer characteristics and the variations to the waveshape allowed in the following paragraphs will need to be applied then this shall be clearly stated in the tender. The value of the effective energy of the impulse generator shall be made available to the purchaser on request.

NOTE 1 The minimum impulse generator energy required to meet the tail time (50 μs) during an impulse test on a transformer can be estimated by using the following equation (this equation is only a guide and might underestimate the energy required. Information from previous experience of testing similar transformers can be used if available):

$$E_{\min} = \frac{100 \times 2\pi \times f \times (t_2)^2}{z \times U^2} \times \left(\frac{U_{LI}}{\eta} \right)^2 \times S_r$$

where

- E_{\min} is the minimum energy required from the impulse generator in joules;
- f is the rated frequency of the transformer in hertz;
- t_2 is the tail time in seconds; t_2 equal 50×10^{-6} s;
- z is the short circuit impedance in % seen from the impulse terminal see IEC 60076-1;
- U is the winding rated voltage in volts, phase-to-phase;
- U_{LI} is the full wave lightning impulse test voltage of the tested winding in volts;
- η is the impulse generator efficiency per unit; $\eta = 1,0$;
- S_r is the three-phase power rating in volt-amperes for which the impedance 'z' is defined.

If the standard impulse shape cannot reasonably be obtained because of low winding inductance or high capacitance to earth and the resulting impulse shape is oscillatory so that the relative overshoot magnitude exceeds 5 % then for windings that will receive a chopped wave lightning impulse test, the front time may be increased to reduce the overshoot. In all cases with $U_m \leq 800$ kV the front time shall not exceed 2,5 μs . If the relative overshoot magnitude exceeds 5 % at the full wave voltage level, then a test voltage function shall be

applied in accordance with IEC 60060-1 to determine the test voltage value. It is permissible to apply the requirements of IEC 60060-1 Annex B to the evaluation of the parameters of the lightning impulse irrespective of the overshoot value.

NOTE 2 This clause gives two methods of dealing with an overshoot of more than 5 %. The front time can be increased, but if $1,2 \mu\text{s} + 30 \%$ is exceeded then chopped waves are required to provide a high frequency test. Alternatively or in addition, the peak voltage of the impulse (maximum value of the recorded curve) is increased if the overshoot exceeds 5 % and the frequency of oscillation is higher than about 100 kHz by the application of the test voltage function in accordance with IEC 60060-1.

For transformers with a $U_m > 800 \text{ kV}$ there may be cases where a front time of less than $2,5 \mu\text{s}$ cannot be reasonably achieved because of a very high capacitance to earth. In these cases a longer front time may be accepted by agreement between purchaser and manufacturer.

If the minimum tail time is not achieved then by agreement between manufacturer and purchaser a shorter tail time may be accepted but the test voltage shall be increased by 1 % for each $2 \mu\text{s}$ by which the tail time is less than $40 \mu\text{s}$. The minimum allowable tail time is $20 \mu\text{s}$. In the case of the low voltage winding of generator step-up transformers where the connection is arranged so that a direct lightning impulse cannot occur in service then this requirement may be varied by agreement.

Further guidance may be obtained from IEC 60076-4.

13.2.2 Tests on transformers without non-linear elements

13.2.2.1 Test sequence

The test sequence shall consist of:

- a) one reference impulse of a voltage between 50 % and 70 % of the full test voltage
- b) three subsequent impulses at full voltage.

If, during any of these applications, an external flashover in the circuit or across a bushing spark gap occurs, or if the recording fails on any of the specified measuring channels, that application shall be disregarded and a further application made.

NOTE Additional impulses at amplitudes not higher than the reference impulse voltage level can be used, these do not need to be shown in the test report.

13.2.2.2 Test acceptance criteria

The test is successful if there are no significant differences between voltage and current transients recorded from the reference impulse and those recorded at the full test voltage.

NOTE The detailed interpretation of the test records and the discrimination between marginal differences and differences indicating failure requires a great deal of skill and experience. Further information is given in IEC 60076-4.

If there is a voltage collapse or deviation and it is agreed between the manufacturer and purchaser that the test is not immediately failed, the test sequence shall be completed and then the full test sequence repeated using the original reference impulse. If any further voltage collapse or deviation is observed then the test is failed.

Additional observations during the test (abnormal sounds, etc.) may be used to confirm the interpretation of the records, but they do not constitute evidence in themselves.

13.2.3 Tests on transformers with non-linear elements

13.2.3.1 Test sequence

If non-linear elements or surge arresters are built into the transformer for the limitation of transferred overvoltage transients, they may operate during the test procedure and this may cause differences between impulse records made at different voltages. There will be a threshold voltage at which the differences caused by the non-linear elements start to appear and the test sequence shall include at least one record below this threshold.

The test sequence shall consist of:

- a) one reference impulse at between 50 % and 60 % of the full test voltage;
- b) one reference impulse at between 60 % and 75 % of the full test voltage;
- c) one reference impulse at between 75 % and 90 % of the full test voltage;
- d) three consecutive 100 % full wave impulses;
- e) a comparison impulse at as nearly as possible the same voltage as c) above;
- f) a comparison impulse at as nearly as possible the same voltage as b) above;
- g) a comparison impulse at as nearly as possible the same voltage as a) above.

The reference impulse voltages shall be at least 10 % (of the 100 % level) different from each other.

If none of the 100 % full wave records differ from the lowest voltage record of the reference impulse records, then impulses e), f) and g) above may be omitted.

NOTE Additional impulses at amplitudes not higher than the reference impulse voltage level can be used, these do not need to be shown in the test report.

If, during any of these applications, an external flashover in the circuit or across a bushing spark gap should occur, or if the recording should fail on any of the specified measuring channels, that application shall be disregarded and a further application made.

13.2.3.2 Test criteria

The test is successful if there are no significant differences between voltage and current transients recorded from the lowest voltage reference impulse and those recorded at the full test voltage.

If this is not the case then the records of current and voltage from the following impulses shall be compared:

- a) and g)
- b) and f)
- c) and e)
- all the 100 % level impulse records.

The test is successful if there is no significant difference between the compared records (beyond that which can reasonably be explained by small differences in the test voltage) and any changes between successive records are progressive and smooth, consistent with the proper operation of the non-linear element.

NOTE Further information is given in IEC 60076-4.

If there is a voltage collapse or deviation and it is agreed between the manufacturer and purchaser that the test is not immediately failed, the test sequence shall be completed and then the full test sequence repeated using the original reference impulse. If any further voltage collapse or deviation is observed then the test is failed.

Additional observations during the test (abnormal sounds, etc.) may be used to confirm the interpretation of the records, but they do not constitute evidence in themselves.

13.3 Chopped wave lightning impulse test (LIC)

13.3.1 Wave shape

The wave shape of the full wave impulses shall be as given in 13.2.1. The chopped wave lightning impulse shall have a time to chopping between 3 μs and 6 μs . The time to first voltage zero after the instant of chopping shall be as short as possible. The test shall be made without the deliberate addition of impedance in the chopping circuit, but if the overswing observed during a reduced voltage application is more than 30 % then the minimum impedance required to bring the overswing below 30 % may be added to the chopping circuit.

A time to chopping of between 2 μs and 3 μs can be accepted by agreement provided that the peak value of the lightning impulse wave is achieved before the chop.

NOTE Transformers are normally designed to withstand an overswing to the opposite polarity of 30 % of the amplitude of the chopped wave lightning impulse. If the transformer is to be tested by a third party the overswing is to be limited to this value.

Usually, the same settings of the impulse generator and measuring equipment are used, and only the chopping gap equipment is added.

Different time bases may be used to record the chopped wave lightning impulses.

It is recommended to use a triggered-type chopping gap with adjustable timing, although a plain rod-rod gap is allowed.

The peak value of the chopped wave lightning impulse shall be as given in Table 2.

13.3.2 Tests on transformers without non-linear elements

13.3.2.1 Test sequence

The test is combined with the full impulse test in a single sequence. Unless otherwise specified the order of the different impulse applications shall be:

- a) one full wave reference impulse at between 50 % and 70 % of the full wave lightning impulse test voltage;
- b) one full wave impulse at the full wave lightning impulse test voltage;
- c) two chopped impulses at the chopped wave lightning impulse test voltage;
- d) two full wave impulses at the full wave lightning impulse test voltage.

The same types of measuring channels and oscillographic records are specified as for the full-wave impulse test.

NOTE Additional impulses (full or chopped) at amplitudes not higher than the reference impulse voltage level can be used, these do not need to be shown in the test report

If, during any of these applications, an external flashover in the circuit or across a bushing spark gap should occur, or if the recording should fail on any of the specified measuring channels, that application shall be disregarded and a further application made.

As far as possible the same time to chop shall be used for all chopped wave lightning impulses in the sequence.

13.3.2.2 Test criteria

The test is successful if there are no significant differences between voltage and current transients recorded from the reference reduced level full impulse and those recorded at the full test voltage including the chopped impulses up to the time of chop. In the case of the chopped impulses differences after the chopping time may be due to minor variations in the performance and timing of the chopping gap.

NOTE The detailed interpretation of the test records and the discrimination between marginal differences and differences indicating failure requires a great deal of skill and experience. Further information is given in IEC 60076-4.

If there is a voltage collapse or deviation and it is agreed between the manufacturer and purchaser that the test is not immediately failed the test sequence shall be completed and then the full test sequence repeated using the original reference impulse. If any further voltage collapse or deviation is observed then the test is failed.

Additional observations during the test (abnormal sounds, etc.) may be used to confirm the interpretation of the records, but they do not constitute evidence in themselves.

13.3.3 Tests on transformers with non-linear elements

13.3.3.1 Test sequence

The test is combined with the full impulse test in a single sequence.

If non-linear elements or surge diverters are built into the transformer for the limitation of transferred overvoltage transients, they may operate during the test procedure and this may cause differences between impulse records made at different voltages. There will be a threshold voltage at which the differences caused by the non-linear elements start to appear and the test sequence shall include at least one record below this threshold.

The test sequence shall consist of:

- a) one full wave reference impulse at between 50 % and 60 % of the full wave lightning impulse test voltage;
- b) one full wave reference impulse at between 60 % and 75 % of the full wave lightning impulse test voltage;
- c) one full wave reference impulse at between 75 % and 90 % of the full wave lightning impulse test voltage;
- d) one full wave impulse at the full wave lightning impulse test voltage;
- e) two chopped impulses at the chopped wave lightning impulse test voltage;
- f) two full wave impulses at the full wave lightning impulse test voltage;
- g) a comparison impulse at as nearly as possible the same voltage as c) above;
- h) a comparison impulse at as nearly as possible the same voltage as b) above;
- i) a comparison impulse at as nearly as possible the same voltage as a) above.

The reference impulse voltages shall be at least 10 % (of the 100 % level) different from each other.

If none of the 100 % full wave records differ from the lowest voltage of the reference impulse record then impulses g), h) and i) above may be omitted.

The time interval between the application of the last chopped wave and the first full wave after the chop waves shall be as short as practicable.

NOTE Additional impulses (full or chopped) at amplitudes not higher than 75 % of the full level can be used, these do not need to be shown in the test report.

If, during any of these applications, an external flashover in the circuit or across a bushing spark gap should occur, or if the recording should fail on any of the specified measuring channels, that application shall be disregarded and a further application made.

The same types of measuring channels and oscillographic records are specified as for the full-wave impulse test.

As far as possible the same time to chop shall be used for all chopped impulses in the sequence.

13.3.3.2 Test criteria

The test is successful if there are no significant differences between voltage and current transients recorded from the lowest voltage reference impulse and those recorded at the full test voltage including the chopped wave impulses up to the time of chop. In the case of the chopped impulses differences after the chopping time may be due to minor variations in the performance and timing of the chopping gap.

If this is not the case then the records of current and voltage from the following impulses shall be compared:

- a) and i);
- b) and h);
- c) and g);
- all the 100 % level impulse records;
- both the chopped wave records up to the time of chop.

The test is successful if there is no significant difference between the compared records (beyond that which can reasonably be explained by small differences in the test voltage) and any changes between successive records should be progressive and smooth, consistent with the proper operation of the non-linear element.

NOTE 1 Further information is given in IEC 60076-4.

If there is a voltage collapse or deviation and it is agreed between the manufacturer and purchaser that the test is not immediately failed, the test sequence shall be completed and then the full test sequence repeated using the original reference impulse. If any further voltage collapse or deviation is observed then the test is failed.

Additional observations during the test (abnormal sounds, etc.) may be used to confirm the interpretation of the records, but they do not constitute evidence in themselves.

NOTE 2 The information given in IEC 60076-4 with reference to waveshape evaluation is based on the visual observation of oscillographic records. Under certain circumstances it might be appropriate to evaluate the waveshape parameters of non-standard waveshapes and perform the interpretation of deviations manually rather than relying completely on software tools.

13.4 Lightning impulse test on a neutral terminal (LIN)

13.4.1 General

Full wave lightning impulses at the impulse voltage level specified for the neutral are applied directly to the neutral with all other terminals earthed.

13.4.2 Waveshape

The wave shape of the full wave impulses shall be as given in 13.2.1 except that the duration of the front may be up to a maximum of 13 μ s.

13.4.3 Test sequence

The test sequence shall be as given in 13.2.2.1 for transformers without a non-linear element and 13.2.3.1 for transformers with a non-linear element.

13.4.4 Test criteria

The test criteria shall be as given in 13.2.2.2 for transformers without a non-linear element and 13.2.3.2 for transformers with a non-linear element.

14 Switching impulse test (SI)

14.1 General

During switching impulse tests, the voltages developed across different windings are approximately proportional to the ratio of numbers of turns.

The switching impulse test voltage shall be as specified for the winding with the highest U_m value. If the ratio between the windings is variable by tapplings, the tapplings shall be used to bring the test voltage for the winding with lower U_m as close as possible to the corresponding test value given in Table 2. The windings with lower U_m values may not receive their full test voltage; this shall be accepted. If lower voltage windings do not have a switching impulse level given in Table 2 then the manufacturer may choose the tap position for test unless otherwise specified by the purchaser.

In a three-phase transformer, the voltage developed between line terminals during the test shall be approximately 1,5 times the voltage between line and neutral terminals.

14.2 Test connections

The impulses are applied either directly from the impulse voltage source to a line terminal of the highest voltage winding, or to a lower voltage winding so that the test voltage is inductively transferred to the highest voltage winding. The specified test voltage shall appear between the line terminal of the highest voltage winding and earth. The voltage shall be measured at the line terminal of the highest voltage winding.

A three-phase transformer shall be tested phase by phase.

Star connected windings with the neutral brought out shall be earthed at the neutral terminal either directly or through a low impedance such as a current measuring shunt. A voltage of opposite polarity and about half amplitude appears on the two remaining line terminals which may be connected together but not connected to earth. To limit the voltage of opposite polarity to approximately 50 % of the applied level, it is permissible to connect high resistance damping resistors (5 k Ω to 20 k Ω) to earth at the non-tested phase terminals.

For delta connected windings the terminal corresponding to the end of the phase under test shall be earthed either directly or through a small measuring impedance, the other terminals shall be open circuit. Tests on a three-phase transformer shall be arranged so that a different terminal of the delta is earthed for each phase test. Delta connected windings with more than three terminals brought out shall have the delta closed for the test.

For a single phase transformer with one or more windings which will have both ends connected to a line in service and with a switching impulse test specified, then the switching impulse test shall be applied to both ends of the winding.

For a star connected winding with a neutral connection not brought out and not connected to earth internally, it is not always possible to achieve the appropriate test voltages by earthing

one or more line terminals, in this case the test connection shall be agreed between manufacturer and purchaser.

Bushing spark gaps may be removed or their spacing increased to prevent sparkover during the test.

14.3 Waveshape

The test voltage is normally of negative polarity to reduce the risk of erratic external flashover in the test circuit.

The voltage impulse shall have a time to peak (T_p as defined in IEC 60060-1) of at least 100 μs , a time above 90 % (T_d as defined in IEC 60060-1) of the specified amplitude of at least 200 μs , and a time to zero (T_z as defined in IEC 60060-1) of a minimum of 1 000 μs .

NOTE 1 The impulse wave shape is purposely different from the standard waveshape of 250 / 2 500 μs recommended in IEC 60060-1, since IEC 60060-1 is intended for equipment without a saturable magnetic circuit. The time to peak is chosen to be long enough to give an essentially linear voltage distribution along the winding.

The time to zero can be increased by inducing a remnant flux into the core of opposite direction to that induced during the test before each full-voltage test impulse. This is normally accomplished by applying impulses of similar shape but opposite polarity at a voltage not exceeding 70 % of the full test level, but other methods may be used. A time to zero of less than 1 000 μs is permissible if as far as practicable full reverse saturation of the core is achieved.

NOTE 2 During the test considerable flux is developed in the magnetic circuit. The impulse voltage can be sustained up to the instant when the core reaches saturation and the magnetizing impedance of the transformer becomes drastically reduced.

For test objects without a magnetic core or with a gapped core design, it is permissible to have a time to zero of less than 1 000 μs . See IEC 60076-4.

14.4 Test sequence

The test sequence shall consist of one reference impulse of a voltage between 50 % and 70 % of the full test voltage and three impulses at full voltage. Sufficient reverse polarity applications shall be made before each full impulse to ensure the magnetization of the core is similar before each full wave impulse in order to make the time to first zero as uniform as possible.

NOTE If the core does not saturate during the full voltage applications then reverse polarity applications might not be required.

Oscillographic records shall be made of the impulse wave-shape on the line terminal under test and the current between the tested winding and earth. If during any of these applications an external flashover in the circuit or across a bushing spark gap should occur, or if the recording should fail on any of the specified measuring channels, that application shall be disregarded and a further application made.

14.5 Test criteria

The test is successful if there is no sudden collapse of voltage or discontinuity in the voltage or current indicated on the oscillographic records.

Additional observations during the test (abnormal sounds, etc.) may be used to confirm the oscillographic records, but they do not constitute evidence in themselves.

NOTE Successive oscillograms might differ because of the influence of magnetic saturation on impulse duration.

15 Action following test failure

If the transformer fails any of the dielectric tests then the complete sequence of dielectric tests shall be repeated at the full level following repair. However, under circumstances where it is clear that some parts of the transformer that have been fully tested are not involved in the failure or repair, then at the discretion of the purchaser these parts may not need to be tested again. Particular account needs to be taken of the possibility of contamination or internal transients having damaged other parts of the transformer.

If a transformer fails to meet its test requirements and the fault is in a bushing, provided that the purchaser is satisfied that the transformer is not in any way affected by the failure, it is permissible to replace this bushing and continue the test on the transformer to completion without delay.

If a test failure occurs as the result of a flashover external to the transformer, then the particular test may be repeated and if successful the test sequence may be completed and no repeat of previously successful tests is required.

16 External clearances in air

16.1 General

This part of the standard is applicable when clearances in air are not specified by the purchaser. Where such clearances are specified, the manufacturer may use higher values if required for test.

Clearance in air is understood as the shortest distance between any metallic part of the bushing terminal and any part of the transformer, taking a line which does not pass through the bushing insulator.

This standard is not applicable to the clearance between parts of the bushing itself and the length of the bushing may need to be greater than the given clearances to pass the required tests on the bushing.

This standard does not consider the risk from intrusion of birds and other animals.

The line to earth clearance figures given in this standard are based on those given in IEC 60071-1 for a rod to structure electrode configuration for < 850 kV lightning impulse level and the conductor to structure clearance for higher lightning impulse levels. The highest clearance determined by switching impulse or lightning impulse is used. The phase-to-phase clearances are based on those given in IEC 60071-1 for a conductor-to-conductor electrode structure based on the switching impulse level with a phase-to-phase divided by phase-to-earth value of 1,5. It is therefore assumed that at ≥ 850 kV lightning impulse level the bushing ends and any connections normally have rounded electrode shapes.

It is assumed that conductor clamps with their associated shield electrodes are suitably shaped so that they do not reduce the flashover voltage. It is also assumed that the arrangement of incoming conductors does not reduce the effective clearances provided by the transformer itself. The design shall provide for suitable conductors to be connected to the bushing terminals leading away from the transformer without infringing the clearances given in this document.

If the purchaser intends to make the connection in a particular way which is likely to reduce the effective clearances, this shall be stated in the enquiry.

In general, the provision of adequate clearances in air becomes technically difficult mainly at high system voltages, particularly for relatively small units, or when the installation space is restricted. The principle followed in this standard is to provide minimum, non-critical clearances

which are satisfactory without further discussion or proof under various system conditions and in different climates. Other clearances based on past or current practice shall be subject to agreement between purchaser and manufacturer.

The recommended clearances are referred to the rated withstand voltages of the internal insulation of the transformer, unless otherwise specified in the enquiry and order. When the clearances of the transformer are equal to or larger than the values specified in this standard and the bushings have properly selected ratings according to IEC 60137, then the external insulation of the transformer shall be regarded as satisfactory without further testing.

NOTE 1 The impulse withstand strength of the external insulation is polarity dependant, in contrast to what is assumed for the internal insulation. The tests prescribed for the internal insulation of the transformer do not automatically verify that the external insulation is satisfactory. The recommended clearances are dimensioned for the more onerous polarity (positive).

NOTE 2 It is recognised that in some countries, clearances can be different if based on LI and AC withstand voltages only.

NOTE 3 If a clearance smaller than that according to the paragraph above is to be used, a type test either using the general methods given in Clauses 10 to 14 of this standard using the test voltages applicable to the transformer, or the tests given in another standard (for example IEC 62271-1) applicable to the connected substation equipment might be required on an arrangement simulating the actual clearance.

If the transformer is specified for operation at an altitude higher than 1 000 m, the clearance requirements shall be increased by 1 % for every 100 m by which the altitude exceeds 1 000 m.

Requirements are given for the following clearances:

- clearance phase-to-earth and phase-to-neutral;
- clearance phase-to-phase between phases of the same winding;
- clearance between a line terminal of the high voltage winding and a line terminal of a lower voltage winding (see 16.2).

It follows from the above that the recommended values are in effect minimum values. The design clearances shall be stated on the outline drawing. These are nominal values subject to normal manufacturing tolerances and they have to be selected so that the actual clearances will be at least equal to the specified values.

These statements shall be taken as proof that the transformer complies with the recommendations of this standard, or with the modified values which may have been agreed for the particular contract.

16.2 Clearance requirements

The clearance requirements are given in Table 4 for each value of lightning and switching impulse voltage for each value of U_m .

The phase-to-phase clearance applies only between line terminals of the same winding, the phase to earth clearance applies to all other distances including to the line terminals of other windings and neutral terminals.

Table 4 – Minimum clearances in air (1 of 2)

Highest Voltage for equipment U_m kV	Full Wave Lightning Impulse (LI) kV	Switching impulse (SI) kV	Minimum air clearance	
			Line to earth mm	Phase to phase mm
<1,1	-	-		
3,6	20	-	60	60
	40	-	60	60
7,2	60	-	90	90
	75 ^a	-	120	120
12	75	-	120	120
	95	-	160	160
	110 ^a	-	200 ^a	200 ^a
17,5	95	-	160	160
	125 ^a	-	220	220
24	125	-	220	220
	145	-	270	270
	150 ^a	-	280 ^a	280 ^a
36	170	-	320	320
	200 ^a	-	380	380
52	250	-	480	480
72,5	325	-	630	630
	350 ^a	-	630	630
100	450	375 ^a	900	900
123	550	460 ^a	1 100	1 100
145	550	460 ^a	1 100	1 100
	650	540 ^a	1 300	1 500 ^a
170	650	540 ^a	1 300	1 500 ^a
	750	620 ^a	1 500	1 700 ^a
245	850	700 ^a	1 600	2 100 ^a
	950	750 ^a	1 700	2 300
	1 050	850 ^a	1 900	2 600
300	950	750	1 700	2 300
	1 050	850	1 900	2 600
362	1 050	850	1 900	2 600
	1 175	950	2 200	3 100
420	1 175	950	2 200	3 100
	1 300	1 050	2 600	3 600
	1 425	1 175 ^a	3 100	4 200
550	1 300	1 050	2 600	3 600
	1 425	1 175	3 100	4 200
	1 550	1 300 ^a	3 600	5 000 ^a
	1 675 ^a	1 390 ^a	4 000 ^a	5 600 ^a

Table 4 (2 of 2)

Highest Voltage for equipment U_m kV	Full Wave Lightning Impulse (LI) kV	Switching impulse (SI) kV	Minimum air clearance	
			Line to earth mm	Phase to phase mm
800	1 800	1 425	4 200	5 800 ^a
	1 950	1 550	4 900	6 700 ^a
	2 050 ^a	1 700 ^a	5 800 ^a	7 900 ^a
	2 100	1 675 ^a	5 600	7 700 ^a
1 100	1 950	1 425	b	b
	2 250	1 800	6 300	c
1 200	2 250	1 800	6 300	c

^a These values are not given in IEC 60071-1:2011 for the particular value of U_m but are included either because they represent common practice in some parts of the world or for some switching impulse levels, and clearances because they represent a co-ordinated value for a particular value of lightning impulse level.

^b No clearance values are given for this value of rated insulation level because it is not applicable to air insulation according to IEC 60071-1.

^c No value of phase-phase clearance is given as transformers with this value of rated insulation level are usually single phase.

Annex A (informative)

Application guide for partial discharge measurements on transformers

A.1 General

This annex is particularly applicable to the partial discharge measurements made during induced voltage test with partial discharge measurement (IVPD) according to 11.3 but it may be applied to any other partial discharge measurements made.

A partial discharge (PD) is an electric discharge that only partially bridges electrically stressed insulation. In a transformer, such a partial discharge causes a transient change of the voltage to earth at every externally available winding terminal.

Measuring impedances are connected effectively between the earthed tank and the terminals, usually through a bushing tap or through a separate coupling capacitor, as detailed in A.2.

The actual charge transferred at the site of a partial discharge cannot be measured directly, instead the apparent charge q as defined in IEC 60270 is measured at the terminal as determined by a suitable calibration, see A.2.

A particular partial discharge gives rise to different values of apparent charge at different terminals of the transformer. The comparison of simultaneously collected indications at different terminals may give information about the location of the partial discharge source within the transformer, see A.5.

The acceptance test procedure specified in 11.3 calls for measurements of apparent charge at the winding line terminals.

A.2 Connection of measuring and calibration circuits – Calibration procedure

The measuring technique and equipment is described in IEC 60270.

The principle of the measurement is to determine the voltage change at the terminal caused by the injection of a calibrated amount of charge. The voltage change is measured using a series coupling capacitance (usually a condenser type bushing) and a measuring impedance. The normal arrangement for transformer tests is to have the measuring impedance directly connected to the bushing test tap.

The measuring equipment may be connected to the measuring impedance by a matched coaxial cable. The impedance of the cable and the matched input impedance of the measuring instrument may form part of the measuring impedance. Some systems use a fiber optic cable between the measuring impedance and the recording equipment. Normally the measuring impedance, the cable and the measuring instrument are supplied together so that the overall performance of the measuring system is optimised.

During the measurement of partial discharge between a line terminal of a winding and the earthed tank, the normal arrangement is to install the measuring impedance Z_m between the condenser bushing test tap and the earthed flange of the bushing, see Figure A.1. If a test tap is not provided, it is also possible to insulate the bushing flange from the tank and use it as the measuring terminal. The capacitances between the central conductor and the measuring terminal, and between the measuring terminal and earth, act as a capacitive voltage divider for the partial discharge signal. The calibration is therefore made between the top terminal of the

bushing and earth. As much of the de-energised test circuit as possible should be connected to the terminal during calibration to take account of additional capacitance and any filter circuits.

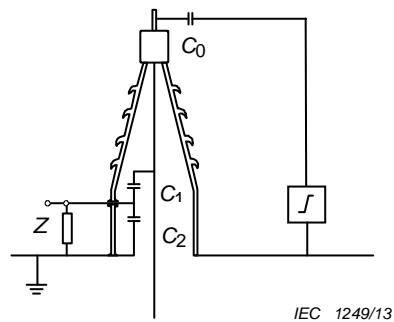


Figure A.1 – Calibration circuit for partial discharge measurement using the test tap of condenser type bushing

If PD measurements need to be made at a terminal where a bushing test tap or insulated flange is not available then a separate high-voltage coupling capacitor is used. A partial discharge free capacitor is required and its capacitance value C should be suitably large in comparison with the calibration generator capacitance C_0 (see IEC 60270 for specific requirements). The measuring impedance (with a protective gap) is connected between the low voltage terminal of the capacitor and earth, see Figure A.2.

The calibration of the complete measuring system is made by the injection of a known charge into the transformer terminal. According to IEC 60270, a calibration generator consists of a step voltage pulse generator with short rise time and a small series capacitor of known capacitance C_0 . C_0 should be small in comparison to C_1 (see IEC 60270 for specific requirements regarding rise time and the choice of C_0). When this generator is connected between the transformer terminal and earth the injected charge from the pulse generator will be:

$$q_0 = U_0 \times C_0$$

where

- q_0 is the calibration apparent charge
- U_0 is the voltage step chosen to give the required q_0
- C_0 is the value of the series capacitance

The calibration level q_0 should be representative of the specified discharge level limit (usually between 50 % and 200 %). Additional measurements using the calibrator at different values of q_0 may be useful to check the operation of the measuring instrument.

It is convenient if the calibration generator has a repetition frequency synchronised to the power frequency so that the resulting pulse can be viewed on an instrument also synchronised to the power frequency.

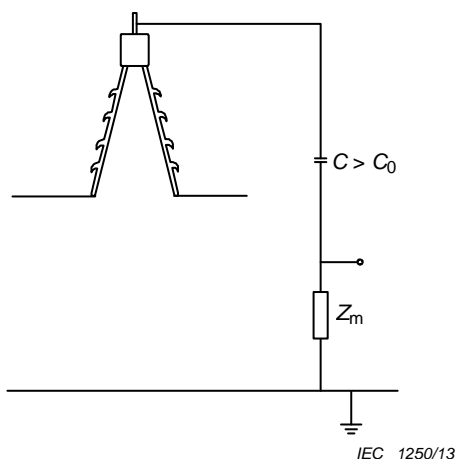


Figure A.2 – Circuit for partial discharge measurement using a high-voltage coupling capacitor

To avoid errors the leads between the terminal and the calibrator and between the calibrator and earth (at the bushing flange) should be kept as short as practicable. The calibration pulse generator should preferably be battery-operated and have small physical dimensions for convenient use at the transformer terminals.

This method of calibration provides for measurement of apparent charge at the terminal, which is the basis of this standard, but it does not give the real value of a partial discharge occurring away from the terminal because the transmission path between the discharge and the terminal is not included in the calibration.

A.3 Instruments, frequency range

The characteristics of the measuring instruments should be as specified in IEC 60270.

A graphical display of any detected partial discharge is generally useful, particularly because it offers a possibility of discriminating between true partial discharge in the transformer and certain forms of external disturbances. This is based on rate of repetition, point on the wave, polarity differences, etc.

The level of partial discharge should be observed continuously or at frequent intervals throughout the test period. Continuous recording of the signal is not obligatory.

Measuring systems for partial discharges are classified as narrow-band or wideband systems. A narrow-band system operates with a bandwidth of about 10 kHz or less at a certain tuning frequency (for example, radio noise meters). A wideband system utilises a relatively large ratio between lower and upper limits of the frequency band, for example 50 kHz to 800 kHz.

By the use of a narrow-band system, interference from local broadcasting stations may be avoided by suitably adjusting the mid-band frequency, but a check has to be made to show that winding resonances near the measuring frequency do not greatly affect the measurement. The narrow-band instrument should be operated at a frequency no higher than 500 kHz, and preferably less than 300 kHz. There are two reasons for this. First, the transmission of the discharge pulse entails a high attenuation of the higher frequency components, and second, when applying a calibration pulse to the line terminal, the pulse is likely to excite local oscillations at and near the terminal, and this will complicate the calibration when mid-band frequencies greater than 500 kHz are used.

A wideband measuring system is less critical as to attenuation and response to different pulse shapes, but is more receptive to disturbances in test locations without electromagnetic

shielding. Band-stop or other types of filters may be used to reduce the interference from external influences such as radio transmitters.

The choice of measuring bandwidth does not affect the partial discharge pulse pattern and the statistical behaviour of the discharge which can be used to identify the discharge source.

In summary a wide-band measuring system is the first preference because of the greater chance of detecting a partial discharge, the bandwidth should not be less than 100 kHz. A narrow band system may be required in certain circumstances to eliminate interference. Care should however be taken over the choice of measuring centre frequency to ensure a reasonable sensitivity to PD in the transformer.

A.4 Procedure after an unsuccessful test

In 11.3.5 PD level acceptance criteria are given. If there has been no voltage collapse, but the test has been unsuccessful because of a PD level above the acceptance criteria then the test shall initially be regarded as non-destructive and the test object should not be rejected immediately upon such a result, but further investigations should be undertaken to identify and locate the partial discharge source.

A further important consideration is whether phase correlated partial discharges are sustained below the operating voltage level, when triggered at the test level, because such partial discharges are most likely to be detrimental to the transformer in service.

The testing environment should first be investigated to find any obvious sign of irrelevant sources of partial discharges. This should be followed by consultations between the manufacturer and purchaser to agree on further supplementary tests or other action to show either the presence of serious partial discharge, or that the transformer is satisfactory for service operation.

Below are some suggestions which may be useful during the above courses of action.

- Investigation as to whether the indications are truly correlated to the test sequence or just represent coincident, irrelevant sources. This is often facilitated by oscillographic monitoring or recording of the pattern of the partial discharges, external disturbances may for example be identified by their being asynchronous with the test voltage.
- Investigation as to whether the partial discharge may be transmitted from the supply source. Low-pass filters on the supply leads to the transformer under test can help in such cases.
- Investigation to determine whether the partial discharge source is within the transformer or outside (spitting from objects at floating potential in the hall, from live parts in air, or from sharp edges on earthed parts of the transformer). As the test concerns the internal insulation, provisional electrostatic shielding on the outside is permitted and recommended.
- Investigation of the probable location of the source(s) in terms of the electrical circuit diagram of the transformer, for example single phase and applied voltage tests may be useful. There are several known and published methods to locate discharges. One is based on correlation of readings and calibrations at different pairs of terminals (in addition to the obligatory readings between line terminals and earth). It is also possible to identify individual pulse shapes during the test with corresponding calibration waveforms, if records from wideband circuits are used. A particular case is the identification of partial discharge in the dielectric of the capacitance graded bushings.
- Investigation by acoustic or ultrasonic detection of the location of the source(s) within the tank.
- Investigation of the location and nature of the source using ultra high frequency electromagnetic sensors introduced into the tank.

- Determination of the probable physical nature of the source by conclusions drawn from variation with test voltage level, hysteresis effect, pulse pattern along the test voltage wave, development of the partial discharge with time, etc.
- Partial discharge in the insulation system may be caused by insufficient drying or insufficient liquid impregnation, generally this will be apparent from the pattern of the partial discharge. Re-processing of the transformer, or a period of rest, and subsequent repetition of the test may therefore be tried in this case.
- Even a limited exposure to a relatively high partial discharge may lead to local cracking of oil or liquid and temporarily reduced extinction and re-inception voltages, but the original conditions may be self-restored in a matter of hours.
- Relatively limited variation of the partial discharge level with voltage increase, a partial discharge pattern typical of a floating particle in the electrical field and an absence of an increase of level with time, may be accepted as evidence that the transformer is suitable for service. In this case it may be agreed to repeat the test, possibly with extended duration, and possibly with an increased voltage level, as this may reduce the discharge level over time.
- Traces of partial discharges visible after untanking are usually not found unless the transformer has been exposed for a considerable duration of time to levels which are very high in comparison with the acceptance limit. Such a procedure may be the last resort if other means of improving the behaviour of the transformer or identifying the source have failed.

Annex B (informative)

Overvoltage transferred from the high-voltage winding to a low-voltage winding

B.1 General

The problem of transferred overvoltage is treated from a system point of view in IEC 60071-2. The information given below concerns only problems associated with the transformer itself under particular conditions of service. The transferred overvoltages to be considered are either transient surges or overvoltages.

NOTE It is the responsibility of the purchaser to define the loading of a low-voltage winding. If no information can be given, the manufacturer can provide information about the expected transferred voltages when the low-voltage terminals are open-circuited, and about the values of resistors or capacitors which are needed to keep the voltages within acceptable limits.

B.2 Transfer of surge voltage

B.2.1 General

A study of particular transformer installation with regard to transferred surge overvoltages is, in general, justified only for large generator transformers, which have a large voltage ratio, and for large high-voltage system transformers with a low-voltage tertiary winding.

As single phase auto transformers are tested separately, the transferred voltages appearing on the tertiary terminals when the transformers are connected as a three-phase bank needs to be considered

In order to ensure that the transferred voltages do not exceed the specified level, or to confirm that surge arresters are not required, transferred surge measurements can be made using a low voltage recurrent surge generator. Alternatively these measurements can be made at a reduced voltage during impulse tests.

It is convenient to distinguish between two mechanisms of surge transfer, namely capacitive transfer and inductive transfer.

B.2.2 Capacitive transfer

The capacitive transfer of overvoltage to a low-voltage winding may in the first approximation be described as a capacitive voltage division. The simplest equivalent circuit as seen from the low-voltage winding consists of an electromotive force (e.m.f.) source in series with a transfer capacitance C_t , see Figure B.1.

The equivalent e.m.f. is a fraction s of the incoming surge on the high-voltage side. C_t is of the order of 10^{-9} F; s and C_t are not well-defined quantities but dependent on the shape of the surge front. They can be determined together by oscillographic measurements. Pre-calculation is uncertain.

A loading of the secondary terminals with switchgear, short cables or added capacitors (a few nF), which act as lumped capacitance C_s directly on the terminals (even during the first microsecond), will reduce the transferred overvoltage peak. Longer cables or busbars are represented by their characteristic impedance. The resulting shape of secondary overvoltage will normally have the character of a short (microsecond) peak, corresponding to the front of the incoming surge.

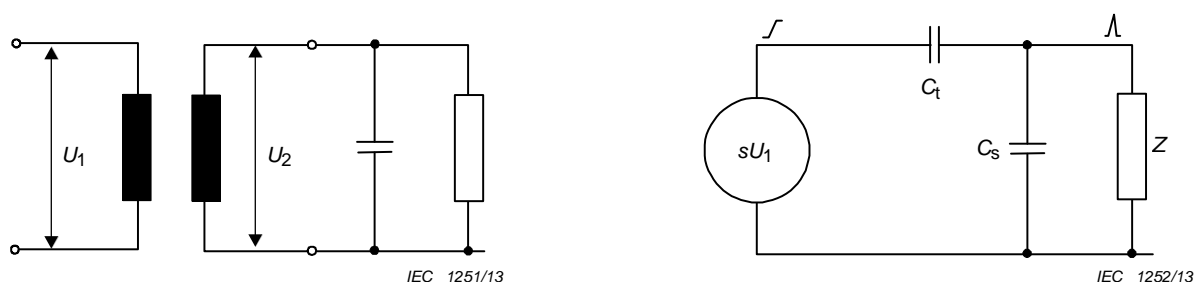


Figure B.1 – Equivalent circuit for capacitive transfer of overvoltage

B.2.3 Inductive transfer

The inductive transfer of surge voltage depends on the flow of surge current in the high-voltage winding.

If no external loading is applied to the secondary winding, the voltage transient usually has a superimposed damped oscillation with a frequency determined by leakage inductance and winding capacitances.

A reduction of the inductively transferred overvoltage component can be effected either by resistive damping through a surge diverter or by modification of the oscillation with capacitive loading. If capacitors are used, the capacitance value has usually to be of the order of tenths of microfarads. (They will therefore automatically eliminate the capacitively transferred component as long as the circuit inductance is low.)

The transformer parameters which are involved in inductive surge transfer are better defined and less dependent on rate of rise (or frequency) than those involved in capacitive transfer. For further information, see the literature on the subject.

B.3 Power-frequency transferred overvoltage

If a low-voltage winding which is physically adjacent to the high-voltage winding is left without connection to earth or with only a high-impedance connection to earth while the high-voltage winding is energised, there is a risk of power frequency overvoltage by capacitance division.

The risk is obvious for a single-phase winding, but it can also exist for a three-phase winding if the primary winding voltage becomes asymmetric, as occurs during earth faults. In particular circumstances, resonance conditions may arise.

Tertiary windings and stabilizing windings in large transformers are also subjected to the same risk. It is the responsibility of the purchaser to prevent a tertiary winding from being accidentally left with too high an impedance to earth. A stabilizing winding should normally be arranged for permanent connection to earth (tank) either externally or internally.

The overvoltage is determined by capacitances between windings and between windings and earth. These can be measured at low frequency from the terminal of the transformer in different combinations, and they can also be calculated with sufficient accuracy.

Annex C (informative)

Information on transformer insulation and dielectric tests to be supplied with an enquiry and with an order

C.1 General

For each winding of the transformer the following information should be supplied with the enquiry and order according to the U_m of the winding.

NOTE Although SI and IVW can be specified for a lower voltage winding on a transformer the values might not be achieved during the test depending on the ratio of the transformer.

It is recommended that test connections and procedures should be discussed at the time of placing the order or at the design review stage, particularly with regard to the connection for induced withstand voltage tests on complicated transformers with non-uniformly insulated high-voltage windings ~~(see 12.3, note)~~ and the method to be used for impulse tests on high-power low-voltage windings and neutral terminals (see ~~13.3~~ 13.1.4). The application of non-linear protection devices, built into the transformer is to be indicated by the manufacturer at the enquiry and at the order stage, and should be shown in the connection diagram on the rating plate.

C.2 For transformers and windings with $U_m \leq 72,5$ kV

In all cases:

- value of U_m ;
- value of U_r ;
- applied voltage test level (AV);
- full wave lightning impulse test level (LI).

In special cases:

- whether partial discharge measurements are required and whether this is to be done with the induced voltage test or separately, and whether it is to be done on only one unit (type test unit) or all units. The length of time at the PD measurement voltage should be given if this is less than one hour;
- whether a lightning impulse test is required on any or all units to be supplied under the order rather than just on the first unit of the design;
- whether chopped wave lightning impulse tests are required and whether it is to be done on only the first or on all units;
- whether a lightning impulse test on the neutral terminal is required and whether it is to be done on only the first or on all units;
- whether a lightning impulse applied to multiple line terminals simultaneously is required and whether it is to be done on only the first or on all units;
- clearances in air if different from the clearances given in Clause 16.

The values of U_m , LI and AV should preferably be chosen from a single line of Table 2 as they will then be a co-ordinated set, however it is permissible to choose values from different lines within the same U_m or from a higher U_m to match existing system insulation co-ordination. The LIC value, if specified, should be taken from the same line in Table 2 as the LI value. Any mix of values coming from different lines may result in over design in respect of some parameters.

C.3 For transformers and windings with $72,5 \text{ kV} < U_m \leq 170 \text{ kV}$

In all cases:

- value of U_m ;
- value of U_r ;
- applied voltage test level;
- full wave lightning impulse test level.

Additionally for transformers with non-uniform insulation:

- line terminal AC test level or the switching impulse test level if specified as an alternative;

In special cases:

- whether alternative higher voltage levels are to be used for the induced voltage test with partial discharge measurement and whether it can be combined with the IVW test;
- whether chopped wave lightning impulse tests are required and whether it is to be done on only the first or on all units;
- whether a lightning impulse test on the neutral terminal is required and whether it is to be done on only the first or on all units;
- whether the required test voltage for the induced test voltage differs from twice rated voltage;
- whether a switching impulse test is required and whether it is to be done on only the first or on all units and whether the SI test replaces the LTAC test;
- whether a lightning impulse applied to multiple line terminals simultaneously is required and whether it is to be done on only the first or on all units;
- whether a line terminal AC withstand voltage test is required for transformers with non-uniformly insulated windings and if so the test voltage required;
- clearances in air if different from the clearances given in Clause 16.

The values of U_m , LI, AV, and if specified LTAC and SI should preferably be chosen from a single line of Table 2 as they will then be a co-ordinated set, however it is permissible to choose values from different lines within the same U_m or from a higher U_m to match existing system insulation co-ordination. The LIC value, if specified, should be taken from the same line in Table 2 as the LI value. Any mix of values coming from different lines may result in over design in respect of some parameters.

C.4 For transformers and windings $U_m > 170 \text{ kV}$

In all cases:

- value of U_m ;
- value of U_r ;
- lightning impulse test level;
- switching impulse test level;
- applied voltage test level.

In special cases:

- whether alternative higher voltage levels are to be used for the induced voltage test with partial discharge measurement;
- whether a lightning impulse test on the neutral terminal is required and whether it is to be done on only the first or on all units;

- whether a lightning impulse applied to multiple line terminals simultaneously is required and whether it is to be done on only the first or on all units;
- whether a line terminal AC withstand voltage test is required for transformers with non-uniformly insulated windings and if so the test voltage required;
- clearances in air if different from the clearances given in Clause 16.

The values of U_m , LI, SI, AV and if specified, LTAC should preferably be chosen from a single line of Table 2 as they will then be a co-ordinated set, however it is permissible to choose values from different lines within the same U_m or from a higher U_m to match existing system insulation co-ordination. The LIC value should be taken from the same line in Table 2 as the LI value. Any mix of values coming from different lines may result in over design in respect of some parameters.

Annex D (informative)

Neutral insulation voltage level calculation

D.1 General

The recommendations in this annex allow the determination of the minimum withstand voltage for the neutral terminal of a transformer with non-uniform insulation which is not directly earthed. To control fault levels or for other reasons the neutral terminal may be connected to earth through a considerable impedance (for example an arc-suppression reactor, earthing reactor or resistor).

The determination of the withstand voltage of the neutral terminals of a transformer designed for use with a separate neutral end voltage regulating transformer is not covered by this annex.

When the neutral terminal is not directly earthed, an overvoltage protective device shall be installed between the neutral terminal and earth in order to limit transient voltages. It is the responsibility of the purchaser to select the overvoltage protective device, to determine its impulse protection level, and to specify the corresponding impulse withstand voltage for the neutral terminal of the transformer.

NOTE For non-uniform insulation the manufacturer might design the winding with a higher than specified neutral insulation level because of the line terminal withstand test (special test).

The AC withstand voltage shall be higher than the maximum overvoltage arising under system fault conditions. There should be a margin between the impulse level of the neutral terminal and the operating voltage of the protective device, both of these voltages shall be above the maximum voltage arising under system fault conditions. The formulae below give guidance for the calculation of the maximum voltages which can occur at a neutral terminal earthed through an impedance.

D.2 Neutral fault current calculation

The maximum neutral fault current I_{fault} for a two winding three phase transformer (single phase earth fault on a star connected winding) can be calculated according to the following formula:

$$I_{\text{fault}} = \frac{3 \times E}{(Z_{1t} + Z_{1s} + Z_{2t} + Z_{2s} + Z_{0t} + Z_{0s}) + 3 \times Z_N + 3 \times Z_{\text{fault}}}$$

where

- E is the phase to earth voltage taken as $U_m/\sqrt{3}$ in V
- Z_{1s} is the positive sequence impedance of the network in Ω
- Z_{2s} is the negative sequence impedance of network in Ω
- Z_{0s} is the zero sequence impedance of the network in Ω
- Z_{1t} is the positive sequence impedance of the transformer in Ω
- Z_{2t} is the negative sequence impedance of the transformer in Ω
- Z_{0t} is the zero sequence impedance of the transformer in Ω (including any tertiary or stabilizing winding)
- Z_N is the impedance between the neutral and earth in Ω

Z_{fault} is the fault impedance in Ω (taken as zero)

NOTE As a guide, in accordance with common practice to calculate the worst case, the following values might be used:

$$\begin{aligned} E &= U_m / \sqrt{3} \\ Z_{1s} &= 0 \\ Z_{2s} &= 0 \\ Z_{0s} &= 0 \\ Z_{\text{fault}} &= 0 \end{aligned}$$

D.3 Minimum insulation level

D.3.1 Applied voltage minimum insulation level

The minimum AV level for the neutral should be chosen from Table 2 of this standard to be greater than $U_{\text{ACneutral}}$ Where:

$$U_{\text{ACneutral}} = I_{\text{fault}} \times Z_{\text{N}}$$

D.3.2 Minimum impulse level

The impulse level should be chosen to provide a margin above the operating level of the protective device, which should be chosen so that it does not operate under system short-circuit fault conditions. The highest asymmetrical peak voltage under these conditions is given by

$$U_{\text{neutral max}} = U_{\text{ACneutral}} \times K_v \times \sqrt{2}$$

where

K_v is the voltage asymmetry factor.

In the case of a purely resistive Z_{N} , K_v is the same as the current asymmetry factor k as defined in IEC 60076-5, but for an inductive Z_{N} , K_v will be lower because of the DC component of current. The factor K_v can be taken as 2 in the worst case of a very high transformer X/R and a small resistive Z_{N} but will be < 2 in practical cases. In the case of a purely inductive Z_{N} , K_v can be taken as 1,05 as this represents the worst case with a transformer X/R of about 7. It is recommended that $U_{\text{neutral max}}$ is calculated using a system model.

D.4 Example

A transformer connected Ynd11 with a rated HV voltage of 155 kV (i.e. U_m is 170 kV) and a rated power of 100 MVA with a 12 % positive sequence impedance on a 100 MVA base and a zero sequence impedance of 10,8 %, and with the HV neutral earthed through a 39 Ω reactor will experience the following fault current in the HV neutral for an HV line to earth fault considering an infinite short circuit power of the network:

$$I_{\text{fault}} = \frac{3 \times E}{(Z_{1t} + Z_{1s} + Z_{2t} + Z_{2s} + Z_{0t} + Z_{0s}) + 3 \times Z_{\text{N}} + 3 \times Z_{\text{fault}}}$$

$$I_{\text{fault}} = \frac{3 \times 170\,000 / \sqrt{3}}{(28,83 + 0 + 28,83 + 0 + 25,95 + 0) + 3 \times 39 + 0} \text{ A}$$

$$I_{\text{fault}} = 1\,468 \text{ A}$$

which gives a voltage of:

$$U_{ACneutral} = I_{fault} \times Z_N$$

$$U_{ACneutral} = 1\,468 \times 39\text{ V}$$

$$U_{ACneutral} = 57\,243\text{ V}$$

therefore the minimum AV level from Table 2 is 70 kV

Assuming $K_V = 1,05$ for a reactive neutral impedance, the highest voltage on the neutral under system fault conditions is:

$$U_{neutral\ max} = 57\,243 \times 1,05 \times \sqrt{2}\text{ V}$$

$$U_{neutral\ max} = 85,0\text{ kV}$$

Since the protective device should not operate at a peak level of 85 kV its highest continuous AC level should not be less than $85/\sqrt{2}\text{ kV} = 60,1\text{ kV}$. A suitable surge arrester for this voltage (10 second withstand) has a 10 kA protective level of 140 kV and allowing a margin on this gives an LI level of 170 kV for the neutral.

A lightning impulse level of 170 kV corresponds to a U_m of 36 kV and this would be specified for the neutral.

Annex E (informative)

Basis for dielectric tests, insulation levels and clearances

E.1 General

It is the intention of this standard that the line to earth, neutral to earth, phase to phase and turn to turn insulation of the transformer shall be properly tested.

Depending on the voltage level and on the type of transformer different tests have been selected to achieve this, and appropriately coordinated test voltage levels are given in Table 2.

This annex summarises the rules, which prevailed during the revision of this standard. In general the revision has been aimed at simplifying the required testing and clarifying the requirements without increasing or reducing the overall level of testing, which is considered to have given good performance in service over many years.

E.2 Tests

E.2.1 Tests for transformers with $U_m \leq 72,5$ kV

These transformers include distribution transformers, which are often produced in large quantities of a particular design. The testing of such transformers should remain quick and affordable.

As all transformers and windings with a U_m of 72,5 kV and below are produced with uniform insulation, the line to earth and neutral to earth insulation are both verified during the applied voltage test (AV).

The induced test withstand (IVW), therefore, only needs to check the turn to turn insulation, and as in the previous edition a test at twice the normal operating voltage have been considered as offering a sufficient margin.

The design of the phase to phase and phase to earth insulation is also proven with the lightning impulse (LI) test but in order to limit the testing equipment necessary for this category of transformer the lightning impulse test has been retained as a type rather than a routine test.

The chopped wave lightning impulse test (LIC) is not regarded as necessary in general. This test is defined as a special test available at the request of the purchaser for use only when there are particularly onerous service conditions.

The induced test with partial discharge measurement (IVPD) has been considered also as too costly and too long for general application on these transformers, and furthermore its goals are covered by the IVW and AV tests. This test is defined as a special test available if required possibly with a reduced duration at the request of the purchaser for use when there are special service conditions.

E.2.2 Tests for transformers with a $72,5$ kV < $U_m \leq 170$ kV

Transformers in this middle range are generally built to order but because of the higher powers transmitted, requirements for higher quality checks are included. As both uniform and non-uniform insulation can be specified the list of tests has been prepared to accommodate both possibilities.

The neutral to earth insulation and for uniformly insulated transformers the line to earth insulation is proven with the applied voltage test (AV). For non-uniform insulation as the test level is limited by the neutral insulation it is insufficient to prove the line to earth insulation. For this reason a line terminal AC (LTAC) test is routine for non-uniformly insulated transformers, but this can be replaced by agreement with a switching impulse (SI) test so that this class of transformer can be tested in a similar manner to larger units.

The phase-to-phase and phase to earth insulation is also tested with the routine lightning impulse (LI) test. The chopped wave lightning impulse test is a special test for these voltage levels to be specified only when required by the purchaser for particular service conditions.

To test the turn-to-turn insulation and phase-to-phase insulation, an induced voltage withstand test (IVW) at twice rated voltage and an induced voltage test with partial discharge measurement (IVPD) are specified as routine tests. In order to shorten the test time and not to reproduce twice the same type of dielectric stress in the transformer, the opportunity to combine these tests is given as the enhancement of the IVPD test gives similar stresses to the IVW and both are made in a configuration similar to the service conditions.

E.2.3 Tests for transformers with $U_m > 170$ kV

This category of transformer covers the largest transmission and generation transformers. The limited number of units as well as the necessary quality checks for these large and important units leads to the following tests:

To check the insulation to earth an applied voltage test is required as a routine test.

The IVPD test checks the quality of the turn to turn and line to earth and phase to phase insulation connected in the service condition. The switching impulse test (SI) proves the phase to phase and line to earth withstand. It is considered therefore that a separate induced voltage withstand test is not necessary but the enhancement voltage of the IVPD test can be increased if desired for example to twice rated voltage.

Lightning impulse tests including chopped waves are included as a routine test for these transformers as it is considered important to prove the ability of the transformer to withstand impulses including those containing higher frequency components.

For the purchaser who wishes to further test the line to earth insulation with an AC test, the single phase line terminal AC test (LTAC) can be specified as a special test. This test is derived from the previous induced voltage withstand test.

E.3 Test voltages

The test voltages contained in Table 2 have been established based on IEC 60071-1. All values below the acceptable limits given in this insulation coordination standard have been excluded from Table 2, but Table 3 has been introduced with lower values which may be used to co-ordinate with existing practice. Table 2 continues to give a range of possible test voltage values for each U_m to allow the specification of a transformer to match a particular system requirement, whilst providing a minimum standard.

The general rule, which prevailed when establishing the values given in Table 2 is based on the behaviour of insulation containing cellulose-based solid insulation and mineral oil. The studies made on this type of insulation have shown that the switching impulse withstand (SI) is usually between 0,8 and 0,85 times the lightning impulse withstand. IEEE C57.12.00-2010 gives figures based on a ratio of 0,83.

In Table 2 the values were rounded up whenever this did not introduce an excessive bias to the general rule.

The induced voltage withstand (IVW) of the line to earth is usually around 50 % of the switching impulse voltage i.e. about 40 % to 43 % of the lightning impulse withstand voltage (LI). The values in Table 2 have been set using this general principle and the standardized figures for the IVW present in the IEC 60071-1. Except for U_m below 36 kV where the practices in use are somewhat different, the general rule is followed with only limited discrepancies to reflect existing practice.

The $(1,58 \times U_r) / \sqrt{3}$ value for the PD measurement level is $1,5 \times U_r$ plus 5 % and is the level used in IEEE C57.12.00-2010 $(1,8 \times U_r) / \sqrt{3}$ is $1,7 \times U_r$ plus 5 % to account for the changed basis from U_m to U_r and to harmonise with IEEE C57.12.00-2010.

E.4 Clearances

The values given in the line to earth column of Table 4 are the highest of those given in IEC 60071-1:2011 for the relevant lightning impulse or switching impulse level. Rod to structure values have been used for lightning impulse levels ~~≤ 750 kV~~ < 850 kV and conductor to structure values above 750 kV. Where figures are not given in IEC 60071-1 they have been obtained by linear interpolation rounded to the nearest 10 mm or 100 mm.

The values given in the phase-phase clearance column of Table 4 have been obtained by re-basing the conductor to conductor values given in IEC 60071-1:2011 to a phase to phase divided by phase to earth value of 1,5 which is relevant to transformers with a delta winding. Where exact figures are not available from IEC 60071-1 a third order polynomial regression was used to interpolate between the figures re-based to a phase to phase divided by phase to earth value of 1,5. An example of the re-basing would be the clearance of 7 200 mm at 1 425 kV and 1,7 is taken to be equivalent to 1 615 kV and 1,5.

Bibliography

IEC 60071-2, *Insulation co-ordination – Part 2: Application guide*

IEC 60076-4, *Power transformers – Part 4: Guide to the lightning impulse and switching impulse testing – Power transformers and reactors*

IEC 60214-1, *Tap-changers – Part 1: Performance requirements and test methods*

IEC 61083-1, *Instruments and software used for measurement in high-voltage impulse tests – Part 1: Requirements for instruments*

IEC 61083-2, *Instruments and software used for measurement in high-voltage impulse tests – Part 2: Requirements for software*

IEC 62271-1, *High-voltage switchgear and controlgear – Part 1: Common specifications*

IEEE C57.12.00-2010, *Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers*

IEEE C57.142-2010, *IEEE guide to describe the occurrence and mitigation of switching transients induced by transformers, switching device and system interaction*

CIGRÉ-report 12-14 (1984), *Resonance behaviour of high voltage transformers*. Paper presented in the name of Study Committee 12 by Working Group 12.07

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	60
INTRODUCTION	62
1 Domaine d'application	63
2 Références normatives	63
3 Termes et définitions	63
4 Généralités	64
5 Tension la plus élevée pour le matériel et niveau d'isolement assigné	66
6 Transformateurs avec enroulements reconnectables	68
7 Essais diélectriques	68
7.1 Vue d'ensemble	68
7.2 Exigences d'essai	70
7.2.1 Généralités	70
7.2.2 Niveaux de tension d'essai	71
7.2.3 Séquence d'essai	74
7.3 Exigences d'essai concernant les transformateurs spécifiques	74
7.3.1 Essais pour transformateurs avec $U_m \leq 72,5$ kV	74
7.3.2 Essais sur transformateurs avec $72,5$ kV < $U_m \leq 170$ kV	76
7.3.3 Essais sur transformateurs avec $U_m > 170$ kV	77
7.4 Attribution de valeurs de tensions U_m et d'essai à la borne neutre d'un enroulement	78
7.4.1 Transformateurs avec $U_m \leq 72,5$ kV	78
7.4.2 Transformateurs avec $U_m > 72,5$ kV	78
8 Essais diélectriques sur des transformateurs ayant déjà été mis en service	78
9 Isolement des circuits auxiliaires (AuxW)	79
10 Essai de tension appliquée (AV)	79
11 Essais de tension induite (IVW et IVPD)	80
11.1 Généralités	80
11.2 Essai de tenue de tension induite (IVW)	81
11.3 Essai de tension induite avec mesure des décharges partielles (IVPD)	81
11.3.1 Généralités	81
11.3.2 Durée et fréquence d'essai	81
11.3.3 Séquence d'essai	81
11.3.4 Mesure des décharges partielles (DP)	83
11.3.5 Critères d'acceptation de l'essai	83
12 Essai de tenue de tension alternative d'une borne de ligne (LTAC)	84
13 Essais au choc de foudre (LI, LIC, LIN, LIMT)	84
13.1 Exigences concernant tous les essais au choc de foudre	84
13.1.1 Généralités	84
13.1.2 Positions des prises	85
13.1.3 Enregistrements des essais	85
13.1.4 Connexions d'essai	86
13.2 Essai au choc de foudre en onde pleine (LI)	87
13.2.1 Forme d'onde, détermination de la valeur de la tension d'essai et des tolérances	87
13.2.2 Essais sur les transformateurs sans éléments non linéaires	88

13.2.3	Essais sur les transformateurs avec éléments non linéaires	89
13.3	Essai au choc de foudre en onde coupée (LIC)	90
13.3.1	Forme d'onde.....	90
13.3.2	Essais sur les transformateurs sans éléments non linéaires	91
13.3.3	Essais sur les transformateurs avec éléments non linéaires	91
13.4	Essai au choc de foudre sur une borne neutre (LIN)	93
13.4.1	Généralités	93
13.4.2	Forme d'onde.....	93
13.4.3	Séquence d'essai.....	93
13.4.4	Critères d'essai.....	93
14	Essai au choc de manœuvre (SI)	93
14.1	Généralités.....	93
14.2	Connexions d'essai.....	94
14.3	Forme d'onde	94
14.4	Séquence d'essai	95
14.5	Critères d'essai.....	95
15	Mesure prise suite à un défaut en essais.....	95
16	Distances d'isolement dans l'air	96
16.1	Généralités.....	96
16.2	Exigences concernant les distances d'isolement	97
Annexe A (informative) Guide d'application pour les mesures de décharges partielles sur les transformateurs		100
Annexe B (informative) Surtension transmise de l'enroulement haute tension à un enroulement basse tension.....		105
Annexe C (informative) Informations concernant l'isolation du transformateur et les essais diélectriques à fournir avec un appel d'offres et avec une commande.....		108
Annexe D (informative) Calcul du niveau de tension avec isolement des bornes neutres		111
Annexe E (informative) Base applicable aux essais diélectriques, niveaux d'isolement et distances d'isolement		114
Bibliographie		117
Figure 1 – Séquence d'application de la tension d'essai pour la tension induite avec mesure de décharges partielles (IVPD).....		83
Figure A.1 – Circuit d'étalonnage pour la mesure des décharges partielles utilisant la prise d'essai d'une traversée à condensateur		101
Figure A.2 – Circuit pour mesure des décharges partielles utilisant un condensateur de liaison haute tension		102
Figure B.1 – Circuit équivalent pour la transmission capacitive de surtension.....		106
Tableau 1 – Exigences et essais pour différentes catégories de transformateurs basés sur l'enroulement à haute tension le plus élevé U_m		71
Tableau 2 – Niveaux de tension d'essai (1 de 2).....		72
Tableau 3 – Niveaux de tension d'essai utilisés dans des cas particuliers		74
Tableau 4 – Distances minimales d'isolement dans l'air (1 de 2).....		98

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE –

**Partie 3: Niveaux d'isolement, essais diélectriques
et distances d'isolement dans l'air**

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de l'IEC). L'IEC a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, l'IEC – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de l'IEC"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'IEC, participent également aux travaux. L'IEC collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de l'IEC concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de l'IEC intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de l'IEC se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de l'IEC. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que l'IEC s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; l'IEC ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de l'IEC s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de l'IEC dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de l'IEC et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) L'IEC elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de l'IEC. L'IEC n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à l'IEC, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de l'IEC, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de l'IEC ou de toute autre Publication de l'IEC, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de l'IEC peuvent faire l'objet de droits de brevet. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

DÉGAGEMENT DE RESPONSABILITÉ

Cette version consolidée n'est pas une Norme IEC officielle, elle a été préparée par commodité pour l'utilisateur. Seules les versions courantes de cette norme et de son(s) amendement(s) doivent être considérées comme les documents officiels.

Cette version consolidée de l'IEC 60076-3 porte le numéro d'édition 3.1. Elle comprend la troisième édition (2013-07) [documents 14/745/FDIS et 14/749/RVD] et son amendement 1 (2018-03) [documents 14/947/FDIS et 14/952/RVD]. Le contenu technique est identique à celui de l'édition de base et à son amendement.

Dans cette version Redline, une ligne verticale dans la marge indique où le contenu technique est modifié par l'amendement 1. Les ajouts sont en vert, les suppressions sont en rouge, barrées. Une version Finale avec toutes les modifications acceptées est disponible dans cette publication.

La Norme internationale IEC 60076-3 a été établie par le comité d'études 14 de l'IEC: Transformateurs de puissance.

Cette troisième édition de l'IEC 60076-3 constitue une révision technique. Les modifications principales par rapport à l'édition antérieure sont les suivantes:

- Trois catégories de transformateurs sont clairement identifiées ainsi que les exigences d'essais correspondantes, elles sont résumées dans le Tableau 1.
- Les niveaux de tenue au choc de manœuvre sont définis pour toutes les valeurs de $U_m > 72,5\text{kV}$.
- La procédure d'essais de tension induite avec PD a été révisée pour garantir des tensions d'essais entre phase adéquates.
- L'essai de tenue en tension alternative a été redéfini (LTAC à la place de ACSD).
- Les niveaux d'essais de tenue en tension induite sont à présent fondés sur U_r plutôt que sur U_m .
- De nouvelles exigences relatives à la forme de l'onde de choc (facteur k) ont été introduites.
- Les tableaux des niveaux d'essai ont été fusionnés et leurs valeurs alignés sur celles de l'IEC 60071-1:2010.
- Des niveaux d'essai supplémentaires ont été introduits pour $U_m > 800\text{kV}$.
- Une nouvelle Annexe E a été introduite, qui fixe certains des principes utilisés pour le choix des essais, des niveaux d'essai et des distances d'isolement dans l'air.

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/IEC, Partie 2.

Une liste de toutes les parties de la série IEC 60076, présentées sous le titre général *Transformateurs de puissance*, peut être consultée sur le site web de l'IEC.

Le comité a décidé que le contenu de la publication de base et de son amendement ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives à la publication recherchée. A cette date, la publication sera

- reconduite,
- supprimée,
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

IMPORTANT – Le logo "colour inside" qui se trouve sur la page de couverture de cette publication indique qu'elle contient des couleurs qui sont considérées comme utiles à une bonne compréhension de son contenu. Les utilisateurs devraient, par conséquent, imprimer cette publication en utilisant une imprimante couleur.

INTRODUCTION

La présente partie de l'IEC 60076 spécifie les exigences d'isolement et d'essais diélectriques correspondants en faisant référence aux enroulements spécifiques et à leurs bornes. Elle recommande également les distances d'isolement dans l'air (Article 16).

Les niveaux d'isolement et les essais diélectriques qui sont spécifiés dans la présente norme s'appliquent uniquement à l'isolation interne. Il convient que les valeurs de tension de tenue assignée spécifiées pour l'isolation interne du transformateur soient également choisies comme référence pour son isolation externe, mais ceci peut ne pas être vrai dans tous les cas. Un défaut de l'isolation interne non auto-régénératrice est catastrophique et conduit normalement à une mise hors service du transformateur pour une longue période, tandis qu'un claquage externe peut entraîner seulement une courte interruption de service sans causer de dommage durable. Par conséquent, il est possible que soient spécifiées par l'acheteur pour accroître la sûreté de fonctionnement, des tensions d'essai plus élevées pour l'isolation interne du transformateur, que pour l'isolation externe des autres composants du réseau. Lorsqu'une telle distinction est faite, il convient que les distances d'isolement externes soient ajustées afin de satisfaire pleinement aux exigences d'essai de l'isolation interne.

L'Annexe E énonce certains des principes utilisés pour le choix des essais, des niveaux d'essai et des distances d'isolement dans l'air des transformateurs en fonction de la tension la plus élevée pour le matériel U_m .

TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE –

Partie 3: Niveaux d'isolement, essais diélectriques et distances d'isolement dans l'air

1 Domaine d'application

La présente Norme internationale s'applique aux transformateurs de puissance définis dans le domaine d'application de l'IEC 60076-1. Elle fournit les détails des essais diélectriques et des niveaux d'essai diélectriques minimum applicables. Des distances d'isolement dans l'air minimales recommandées entre les parties sous tension et entre ces dernières et la terre sont précisées pour être utilisées lorsque ces distances dans l'air ne sont pas spécifiées par l'acheteur.

Pour les catégories de transformateurs de puissance et de bobines d'inductance qui disposent d'une norme IEC qui leur est propre, la présente norme est applicable uniquement dans la mesure où il y est fait explicitement référence dans les autres normes.

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités en référence de manière normative, en intégralité ou en partie, dans le présent document et sont indispensables pour son application. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

IEC 60050-421, *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) – Chapitre 421: Transformateurs de puissance et bobines d'inductance*

IEC 60060-1, *Techniques des essais à haute tension – Partie 1: Définitions et exigences générales*

IEC 60060-2, *Techniques des essais à haute tension – Partie 2: Systèmes de mesure*

IEC 60071-1, *Coordination de l'isolement – Partie 1: Définitions, principes et règles*

IEC 60076-1, *Transformateurs de puissance – Partie 1: Généralités*

IEC 60137, *Traversées isolées pour tensions alternatives supérieures à 1 000 V*

IEC 60270, *Techniques des essais à haute tension – Mesures des décharges partielles*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions donnés dans les normes IEC 60076-1, IEC 60050-421, ainsi que les suivants s'appliquent.

3.1

tension la plus élevée pour le matériel applicable à un enroulement de transformateur

U_m

tension efficace vraie (r.m.s) la plus élevée entre phases, dans un réseau triphasé, pour laquelle est conçue l'isolation de l'enroulement du transformateur

3.2 tension assignée d'un enroulement

U_r

tension spécifiée pour être appliquée ou développée en fonctionnement à vide entre les bornes d'un enroulement sans prise, ou d'un enroulement avec prise connecté à la prise principale, pour un enroulement triphasé, il s'agit de la tension entre les bornes de ligne

Note 1 à l'article: Les tensions assignées de tous les enroulements, apparaissent simultanément en fonctionnement à vide, lorsque la tension appliquée à l'un d'entre eux est à sa valeur assignée.

Note 2 à l'article: Dans le cas des transformateurs monophasés destinés à être connectés en étoile pour construire un groupe triphasé, ou à être connectés entre la ligne et le neutre d'un système triphasé, la tension assignée est indiquée par la tension entre phases divisée par $\sqrt{3}$, par exemple $400/\sqrt{3}$ kV.

Note 3 à l'article: Dans le cas des transformateurs monophasés destinés à être connectés entre les phases d'un réseau, la tension assignée est indiquée par la tension entre phases.

Note 4 à l'article: Pour l'enroulement série d'un transformateur série triphasé, qui est conçu avec des enroulements de phase indépendants, la tension assignée est indiquée comme si les enroulements de phases étaient connectés en étoile.

[SOURCE: IEC 60076-1:2011, 3.4.3]

3.3 niveau d'isolement assigné

ensemble de tensions de tenue assignées qui caractérisent la rigidité diélectrique de l'isolation

3.4 tension de tenue assignée

valeur de la tension d'essai appliquée dans l'un des essais diélectriques normalisés qui démontre que l'isolation satisfait à la tension d'essai assignée

3.5 isolement uniforme d'un enroulement de transformateur

isolement d'un enroulement de transformateur dont toutes les extrémités connectées aux bornes ont le même niveau d'isolement assigné

3.6 isolement non uniforme d'un enroulement de transformateur

isolement de l'enroulement d'un transformateur dont l'extrémité neutre est prévue pour être connectée directement ou indirectement à la terre, et qui est conçue avec un niveau d'isolement inférieur à celui attribué à la borne de ligne

Note 1 à l'article: L'isolement non uniforme peut également être désignée par le terme "isolement graduée".

4 Généralités

Les exigences concernant l'isolement des transformateurs de puissance et les essais d'isolement correspondants sont indiqués en référence à des enroulements spécifiques et à leurs bornes.

Pour les transformateurs immergés dans un liquide ou à isolation gazeuse, les exigences s'appliquent uniquement à l'isolement interne. Les exigences ou les essais additionnels éventuels concernant l'isolement externe qui sont jugés nécessaires doivent faire l'objet d'un accord entre le constructeur et l'acheteur. Lorsque l'acheteur ne spécifie aucune exigence particulière concernant les distances d'isolement dans l'air, les dispositions de l'Article 16 doivent alors s'appliquer. Si l'acheteur a l'intention de réaliser le branchement du transformateur d'une manière qui peut réduire les distances d'isolement dans l'air du transformateur seul, il convient que cela soit indiqué dans l'appel d'offres.

Les traversées doivent être soumises séparément à des essais de type et à des essais individuels de série conformément à l'IEC 60137 (y compris les niveaux d'essai des traversées adaptés au niveau d'essai de transformateur spécifique), qui consistent à vérifier leur isolation phase-terre, tant externe qu'interne.

Lorsqu'un transformateur est spécifié pour être mis en service à une altitude supérieure à 1 000 m, les distances d'isolement dans l'air doivent être conçues en conséquence. Il peut être alors nécessaire de choisir des traversées conçues pour des niveaux d'isolement plus élevés que ceux requis pour un fonctionnement à des altitudes moins élevées, voir l'Article 16 de la présente norme et l'IEC 60137.

Le constructeur peut protéger par un déflecteur les extrémités des traversées, si nécessaire, au cours des essais diélectriques, mais tous les déflecteurs installés sur les parties à la terre les plus proches des traversées doivent faire partie intégrante de la structure du transformateur en service, à l'exception des déflecteurs requis uniquement lors de la mesure des décharges partielles.

Les traversées et les changeurs de prises sont spécifiés, conçus et soumis à essai conformément aux normes IEC qui leur sont applicables. Les essais diélectriques effectués sur le transformateur complet, constituent une vérification que le choix et l'installation de ces composants sont satisfaisants. Dans le cas de changeurs de prises qui, selon l'IEC 60214-1, ne sont pas soumis à des essais individuels diélectriques dans l'usine du constructeur de changeurs de prises, les essais effectués selon la présente norme constituent également les seuls essais diélectriques individuels de série effectués sur ce composant.

La température du système d'isolement ne doit pas être inférieure à 10 °C pendant les essais, mais des températures plus élevées que celles données dans l'IEC 60076-1 peuvent être acceptées.

Le transformateur doit être assemblé entièrement comme en service, vis à vis de tous les éléments susceptibles d'influer sur sa tenue diélectrique. Il est habituellement admis que le liquide ou le gaz isolant ne circule pas pendant les essais, il n'est donc pas nécessaire de monter les réfrigérants. Tout équipement ou matériel conçu pour recueillir ou détecter un gaz libre produit par des défauts d'isolement, doit être installé et surveillé pendant les essais. Lorsque la présence de gaz libre est détectée au cours de l'un des essais, la nature et l'origine de production du gaz doivent être analysées et toute action ultérieure éventuelle doit faire l'objet d'un accord entre l'acheteur et le constructeur.

NOTE 1 Les dispositifs de protection contre les surtensions externes tels que les parafoudres n'ont pas besoin d'être assemblés et les éclateurs de traversée peuvent être enlevés ou leur écartement augmenté pour éviter un fonctionnement au cours des essais.

NOTE 2 Il est de pratique courante pour les grands transformateurs, de procéder à des prises d'échantillon d'huile afin d'analyse des gaz dissous, avant et après les essais diélectriques pour analyser les gaz dissous.

Les transformateurs immergés dans un liquide doivent être soumis aux essais avec le même type de liquide (minéral, ester, silicone, etc.) et répondant aux mêmes spécifications (eu égard aux propriétés susceptibles d'affecter les résultats des essais) que celui qu'ils contiendront en service.

NOTE 3 Certains acheteurs peuvent exiger que le liquide isolant circule dans des transformateurs refroidis par circulation dirigée de liquide (OD) au cours de l'essai IVPD afin de détecter la tendance à l'électrification statique, ceci constituant une exigence très spécifique n'est pas couvert par la présente norme.

Il convient de concevoir les transformateurs raccordés par boîtes à câbles ou par connexion directe à des installations sous enveloppe métallique isolée au SF₆ de telle sorte que des connexions temporaires puissent être utilisées pour les essais diélectriques, en utilisant des traversées provisoires si nécessaire. Par accord entre le constructeur et l'acheteur, les traversées définitives liquide vers SF₆ peuvent être remplacé par des traversées liquide vers air pour les essais, dans ce cas, la conception de l'extrémité intérieure au transformateur de la traversée, y compris les positions des parties sous tension et les distances d'isolement des

traversées de remplacement, doit être identique (dans la limite des variations normales des dimensions de la traversée liées aux tolérances de fabrication), à celle des traversées utilisées en service.

Lorsque le constructeur a l'intention d'utiliser des éléments non linéaires (par exemple, des parafoudres ou des éclateurs), intégrés au transformateur ou au changeur de prises, ou disposés à l'extérieur, afin de limiter les surtensions transitoires, cela doit être porté à la connaissance de l'acheteur au moment de l'appel d'offres et de la commande, et doit par ailleurs être indiqué sur le schéma de circuits de la plaque signalétique du transformateur.

Lorsque des bornes du transformateur doivent être laissées non connectées lorsque ce dernier est mis sous tension en service, il est alors nécessaire de tenir compte de la possibilité d'un transfert de tension au niveau des bornes non connectées, voir Annexe B. Lors des essais au choc de foudre, toutes les bornes de ligne et neutres non soumises à l'essai sont reliées normalement à la terre, voir Article 13.

5 Tension la plus élevée pour le matériel et niveau d'isolement assigné

Une valeur de tension la plus élevée pour le matériel U_m (voir Article 3) est attribuée tant à l'extrémité de ligne, qu'à l'extrémité neutre de chaque enroulement, voir l'IEC 60076-1.

Les règles applicables aux essais diélectriques dépendent de la valeur de U_m . Lorsque les règles concernant les essais pour les différents enroulements d'un transformateur sont en contradiction, la règle relative à l'enroulement disposant de la valeur de U_m la plus élevée doit s'appliquer pour le transformateur dans son ensemble.

Les enroulements série (que l'on trouve, par exemple, dans les autotransformateurs et les transformateurs déphaseurs) dont la tension assignée est inférieure à celle du réseau, doivent avoir valeur de U_m correspondant à la tension assignée la plus élevée du réseau auquel l'enroulement est connecté.

Les valeurs normalisées de U_m sont énumérées dans le Tableau 2. Sauf spécification contraire, la valeur à utiliser pour un enroulement de transformateur est celle qui est égale, ou immédiatement supérieure, à la valeur de la tension assignée de l'enroulement.

NOTE 1 Les transformateurs monophasés destinés au couplage étoile pour former un banc triphasé sont désignés par leur tension assignée entre phases divisé par $\sqrt{3}$, par exemple $400 / \sqrt{3}$ kV. La valeur entre phases détermine le choix de U_m dans ce cas, et par conséquent, $U_m = 420$ kV (voir également l'IEC 60076-1). Le même principe s'applique aux transformateurs monophasés destinés à être utilisés dans un réseau monophasé, en ce sens que la tension maximale phase-terre est multipliée par $\sqrt{3}$ afin d'obtenir la valeur U_m équivalente de manière à définir les tensions d'essai.

NOTE 2 Pour les enroulements de transformateurs destinés à être utilisés dans les applications d'alimentation de réseaux ferroviaires où deux tensions phase-terre opposées sont fournies, la valeur U_m se rapporte à la tension entre phases, sauf spécification contraire.

NOTE 3 Il peut arriver que certaines tensions de prise soient choisies légèrement supérieures à une valeur normalisée de U_m mais que le réseau auquel l'enroulement sera connecté ait une tension la plus élevée qui reste au inférieure à la valeur normalisée. Les exigences d'isolement sont coordonnées avec les conditions réelles, et cette valeur normalisée peut être acceptée comme valeur de U_m pour le transformateur, et non pas la valeur immédiatement supérieure.

NOTE 4 Dans certaines applications avec des conditions très spéciales, la spécification d'autres combinaisons de tensions de tenue peut être justifiée. Dans de tels cas, il convient de suivre les recommandations générales de l'IEC 60071-1.

NOTE 5 Dans certaines applications, les enroulements couplés en triangle sont mis à la terre sur une des bornes extérieures. Dans ces applications, une tension de tenue plus élevée eu égard à la tension la plus élevée pour le matériel U_m peut être requise pour cet enroulement, et est susceptible de faire l'objet d'un accord entre le constructeur et l'acheteur.

La tension la plus élevée pour le matériel U_m et le niveau d'isolement assigné (ensemble des tensions de tenue assignées définies) déterminent les caractéristiques diélectriques d'un transformateur. Ces caractéristiques sont vérifiées par un ensemble d'essais diélectriques, voir l'Article 7.

La valeur de U_m et le niveau d'isolement assigné qui sont attribués à chaque enroulement d'un transformateur font partie intégrante des informations qui doivent accompagner un appel d'offres et une commande. S'il existe un enroulement à isolation non uniforme, la valeur de U_m attribuée et le niveau d'isolement assigné de l'extrémité neutre peuvent également être spécifiés par l'acheteur, voir 7.4.

Le niveau d'isolement assigné doit être caractérisé comme suit:

U_m / SI / LI / LIC / AC avec les valeurs associées (voir les exemples ci-dessous) pour les bornes de ligne de chaque enroulement

Lorsqu' aucun niveau de tension de tenue SI ou LIC n'est attribué à l'enroulement, alors l'abréviation correspondante est exclue des caractéristiques assignées, et ainsi pour les bornes auxquelles aucun niveau de tension de tenue au choc de manœuvre ou aucun niveau de tension de tenue au choc de foudre en onde coupée n'est attribué, de même que pour les bornes neutres, l'abréviation serait la suivante:

U_m / LI / AC avec les valeurs associées

Lorsque le même niveau d'isolement assigné que celui de la borne de ligne est attribué à la borne neutre d'un enroulement, il n'est alors pas nécessaire de présenter de manière séparée le niveau d'isolement assigné du neutre.

Les abréviations ci-dessus et dans les exemples ci-dessous ont les significations suivantes:

- SI est le niveau de tension de tenue au choc de manœuvre assigné (*Switching Impulse* en anglais) pour les bornes de ligne de l'enroulement avec la valeur de U_m la plus élevée;
- LI est le niveau de tension de tenue au choc de foudre (*Lightning Impulse* en anglais) assigné pour la borne de chaque enroulement;
- LIC est le niveau de tension de tenue au choc de foudre en onde coupée (*Lightning Impulse Chopped wave* en anglais) assigné pour les bornes de ligne de chaque enroulement individuel en cas de réalisation d'un essai au choc de foudre en onde coupée;
- AC est le niveau de tension de tenue alternative (*Alternative Current* en anglais) assigné le plus élevé à la terre, conçu pour les bornes de chaque enroulement.

NOTE 6 La valeur AC est la valeur pour laquelle le transformateur est conçu, il s'agit généralement de la tension alternative la plus élevée qui doit être obtenue en essai.

HT haute tension;

BT basse tension;

MT moyenne tension (tension intermédiaire, IEC 60076-1);

N neutre.

Les tensions de tenue assignées pour tous les enroulements doivent apparaître sur la plaque signalétique.

Les principes des notations abrégées normalisées sont indiqués dans les exemples ci-dessous.

EXEMPLE 1

Transformateur de tensions assignées de 66 / 11 kV U_m (HT) = 72,5 kV et U_m (BT) = 12 kV, tous les deux à isolation uniforme et à couplage Y (étoile), la plaque signalétique serait la suivante:

HT U_m 72,5 / LI 325 / AC 140 kV

BT U_m 12 / LI 75 / AC 28 kV

EXEMPLE 2

U_m (HT) ligne = 245 kV, à couplage Y (étoile) (tension assignée de 220 kV);

U_m (HT) neutre = 52 kV;

U_m (MT) ligne = 72,5 kV, à isolation uniforme et à couplage Y (étoile) (LIC non spécifié);

U_m (BT) ligne = 24 kV, à couplage D (triangle) LIC non requis.

La plaque signalétique serait la suivante:

HT U_m 245 / SI 750 / LI 950 / LIC 1045 / AC 395 kV

HTN U_m 52 / LI 250 / AC 95 kV

MT U_m 72,5 / LI 325 / AC 140 kV

BT U_m 24 / LI 125 / AC 50 kV

6 Transformateurs avec enroulements reconnectables

Sauf spécification contraire, les enroulements spécifiés comme pouvant être connectés selon plus d'une configuration en service doivent être soumis à essai dans chaque configuration.

7 Essais diélectriques

7.1 Vue d'ensemble

L'aptitude diélectrique de l'isolement d'un transformateur est vérifiée par des essais diélectriques. Ce qui suit constitue une explication générale des différents essais.

- **Essai de tenue au choc de foudre en onde pleine pour les bornes de ligne (LI)¹**, voir 13.2

L'essai est destiné à vérifier la capacité du transformateur à résister en service aux tensions transitoires à temps de montée rapide, généralement associés aux coups de foudre. L'essai permet de vérifier la tenue du transformateur en essai, lorsque l'onde de choc est appliquée sur ses extrémités de ligne. L'essai comporte des composantes de tension haute fréquence et génère des contraintes non uniformes dans l'enroulement en essai, différentes de celles générées pour un essai en tension alternative.

- **Essai de tenue au choc de foudre en onde coupée pour les bornes de ligne (LIC)²**, voir 13.3

Cet essai, en plus de couvrir les objectifs de l'essai du choc de foudre en onde pleine, permet également de vérifier la capacité du transformateur à résister à certains phénomènes haute fréquence susceptibles d'apparaître en service. Pour cet essai, l'essai au choc de foudre comprend à la fois des chocs en onde pleine et des chocs en onde coupée sur la queue afin de produire vitesses de changement de tension très élevées. La tension de choc pour l'essai en onde coupée a une valeur de crête plus élevée et comporte des composantes à fréquence plus élevée que le choc en onde pleine.

NOTE 1 – Selon la présente norme, l'essai LIC est spécifié pour chaque enroulement séparément. Par exemple, si la présente norme exige d'effectuer un essai LIC individuel sur l'enroulement à tension la plus élevée, ceci

¹ *Lightning Impulse*, en anglais.

² *Lightning Impulse Chopped wave*, en anglais.

~~n'exigerait pas automatiquement d'effectuer des essais LIC sur un ou sur d'autres enroulements dont la valeur $U_m \leq 170$ kV, à moins que ces essais ne soient spécifiquement indiqués par l'acheteur pour ces enroulements.~~

- **Essai de tenue au choc de foudre pour la borne neutre (LIN)³**, voir 13.4
L'essai est destiné à vérifier la tenue en tension de choc de l'extrémité neutre et du ou des enroulements reliés par rapport à la terre et aux autres enroulements, ainsi que le long du ou des enroulements en essai.
- **Essai de tenue au choc de manœuvre pour la borne de ligne (SI)⁴**, voir l'Article 14
L'essai est destiné à vérifier la capacité du transformateur à résister aux tensions transitoires ayant des temps de montée lent, généralement associées aux manœuvres en service. L'essai permet de vérifier la tenue au choc de manœuvre des extrémités de ligne et du ou des enroulements reliés par rapport à la terre et aux autres enroulements. L'essai permet également de vérifier la tenue entre phases, ainsi que le long du ou des enroulements en essai. Il s'agit d'un essai monophasé. La tension est répartie de manière inductive dans l'ensemble des enroulements du transformateur, les extrémités de ligne sont non connectées pendant l'essai et celles de la phase en essai sont portées par induction à une tension, déterminée approximativement par le rapport du nombre de spires du transformateur.
La répartition de la tension dans la phase soumise à l'essai est similaire à celle apparaissant pendant un essai de tenue de tension induite.
- **Essai par tension appliquée (AV)⁵**, voir l'Article 10
L'essai est destiné à vérifier la tenue en tension alternative des extrémités de ligne et de neutres et des enroulements qui y sont connectés par rapport à la terre et aux autres enroulements. La tension est appliquée simultanément à toutes les bornes d'un enroulement, y compris la borne neutre, excluant ainsi toute tension entre spires.
- **Essai de tenue en tension induite des extrémités de ligne (LTAC)⁶**, voir l'Article 12
L'essai est destiné à vérifier la tenue de tension alternative (AC) de chaque borne de ligne par rapport à la terre; Pendant l'essai, la tension apparaît à une ou plusieurs des bornes de ligne. Cet essai permet aux bornes de ligne d'un transformateur à isolation non uniforme d'être soumises à un essai au niveau d'essai de tension appliquée, correspondant aux extrémités de ligne.
- **Essai de tenue en tension induite (IVW)⁷**, voir 11.2
L'essai est destiné à vérifier la tenue en tension alternative de chaque borne de ligne et du ou des enroulements qui y sont connectés par rapport à la terre et aux autres enroulements et le long du ou des enroulements en essai, ainsi que la tenue entre phases. L'essai est effectué avec le transformateur connecté comme dans des conditions de service. Pendant l'essai, des tensions symétriques apparaissent à toutes les bornes de ligne et entre les spires, aucune tension n'apparaissant toutefois à la borne neutre. L'essai est effectué en appliquant une tension triphasée sur des transformateurs triphasés.
- **Essai de tenue en tension induite avec mesure de décharges partielles (IVPD)⁸**, voir 11.3

³ *Lightning Impulse on Neutral*, en anglais.

⁴ *Switching Impulse*, en anglais.

⁵ *Applied Voltage*, en anglais.

⁶ *Line Terminal AC*, en anglais.

⁷ *Induced Voltage Withstand test*, en anglais.

⁸ *Induced Voltage with Partial Discharge measurement*, en anglais.

Cet essai est destiné à vérifier que le transformateur est exempt de toutes décharges partielles dangereuses dans les conditions normales de fonctionnement. La tension d'essai est appliquée de la même manière que la tension à laquelle est soumis le transformateur en service. Pendant l'essai, des tensions symétriques apparaissent à toutes les bornes de ligne et entre spires, aucune tension n'apparaissant au neutre. L'essai est effectué en appliquant une tension triphasée sur des transformateurs triphasés.

– **Essai d'isolement des circuits auxiliaires (AuxW)**⁹, voir l'Article 9

Cet essai permet de vérifier l'isolement des circuits auxiliaires du transformateur non connecté aux enroulements.

– **Chocs de foudre appliqués simultanément sur deux bornes ou plus (LIMT)**¹⁰, voir 13.1.4.3

Cet essai permet de vérifier que le transformateur peut résister aux surtensions internes susceptibles de se produire lorsque deux bornes ou plus sont soumises simultanément à un choc de foudre. L'essai s'applique uniquement à certains types particuliers de transformateur comportant un enroulement série court-circuitées en service (par exemple, certains transformateurs déphaseurs avec shuntage en charge), ou lorsque des chocs peuvent se produire simultanément en service sur deux bornes ou plus.

NOTE-2 Cet essai est également appelé "essai au choc de foudre appliqué".

7.2 Exigences d'essai

7.2.1 Généralités

Les exigences concernant les essais diélectriques, à savoir les essais requis et les niveaux de tension d'essai, dépendent de la tension la plus élevée pour le matériel U_m pour l'enroulement à tension la plus élevée du transformateur considéré. Les essais requis sont résumés dans le Tableau 1 et les exigences spécifiques sont indiquées en 7.3.

NOTE Les essais de tenue aux chocs de foudre appliqués simultanément sur deux bornes de ligne ou plus constituent un essai spécial uniquement pour quelques types particuliers de transformateur, indépendamment de U_m , et ne figurent pas dans le tableau pour des raisons de clarté.

Les essais supplémentaires éventuels complétant les exigences de la présente norme et les niveaux de tension d'essai doivent être spécifiés par l'acheteur lors de l'appel d'offres et de la commande, car ils sont susceptibles d'affecter la conception du transformateur (voir Annexe C).

Il doit être fait référence à l'IEC 60060-1 pour obtenir les détails des essais. Lorsque la présente norme ne fournit aucune tolérance spécifique concernant les paramètres et les valeurs d'essai, les valeurs indiquées dans l'IEC 60060-1 doivent alors être utilisées.

⁹ *Auxiliary Wiring*, en anglais.

¹⁰ *Lightning Impulse Multi Terminal*, en anglais

Tableau 1 – Exigences et essais pour différentes catégories de transformateurs basés sur l'enroulements haute tension le plus élevé U_m

Isolation	$U_m \leq 72,5 \text{ kV}$	$72,5 \text{ kV} < U_m \leq 170 \text{ kV}$		$U_m > 170 \text{ kV}$
	Uniforme	Uniforme	Non uniforme	Uniforme et non uniforme
Essai au choc de foudre en onde pleine pour les bornes de ligne (LI)	Type	Individuel	Individuel	Non applicable (inclus dans LIC)
Essai au choc de foudre en onde coupée pour les bornes de ligne (LIC)	Spécial	Spécial	Spécial	Individuel
Essai au choc de foudre pour les bornes neutres (LIN)	Spécial	Spécial	Spécial	Spécial
Essai au choc de manœuvre pour la borne de ligne (SI)	Non applicable	Spécial	Spécial	Individuel
Essai de tension appliquée (AV)	Individuel	Individuel	Individuel	Individuel
Essai de tenue en tension induite (IVW)	Individuel	Individuel	Individuel	Non applicable
Essai de tenue en tension induite avec mesure de décharges partielles (IVPD)	Spécial ^a	Individuel ^a	Individuel ^a	Individuel
Essai de tenue en tension induite des extrémités de ligne (LTAC)	Non applicable	Spécial	Individuel ^b	Spécial
Essai d'isolement des circuits auxiliaires (AuxW)	Individuel	Individuel	Individuel	Individuel
^a Les exigences de l'essai IVW peuvent être intégrées à l'essai IVPD, de sorte qu'un seul essai soit requis. ^b Un essai au choc de manœuvre peut, par un accord entre le constructeur et l'acheteur, se substituer à l'essai LTAC pour cette catégorie de transformateurs.				

7.2.2 Niveaux de tension d'essai

Les niveaux des tensions de tenue normalisées, identifiés par la tension la plus élevée pour le matériel U_m d'un enroulement sont donnés dans le Tableau 2. Le choix entre les différents niveaux de tensions d'essai dans ces tableaux dépend de la sévérité des conditions de surtension prévisibles dans le réseau et de l'importance de l'installation particulière. Des indications sont fournies dans l'IEC 60071-1.

Toutes les tensions d'essai sont des tensions phase-terre.

Les valeurs les plus faibles indiquées dans le Tableau 2 pour une valeur particulière de U_m représentent les niveaux de tension d'essai minimum et doivent être appliquées en l'absence de toute autre spécification. Les valeurs indiquées dans chaque ligne du Tableau 2 sont généralement coordonnées. Lorsque seul un niveau de tension de choc de foudre est spécifié, les autres valeurs de la même ligne doivent alors être utilisées. L'acheteur peut spécifier pour chaque essai une valeur supérieure à la valeur minimale pour la valeur de U_m considérée, de préférence des valeurs normalisées et coordonnées, mais pas nécessairement des valeurs issues d'une seule ligne du Tableau 2. Lorsque des niveaux supérieurs sont spécifiés, ceci doit être indiqué dans l'appel d'offres et la commande.

Si, dans des circonstances particulières, l'acheteur considère que les niveaux minimum donnés dans le Tableau 2 sont trop élevés, les valeurs indiquées dans le Tableau 3 peuvent alors être utilisées. Les valeurs indiquées dans le Tableau 3 peuvent être utilisées uniquement si d'une part des mesures de prévention particulières ont été prises pour éviter l'apparition de surtension au-delà de l'aptitude du transformateur, et si d'autre part, soit des études

approfondies ont été menées à bien soit les valeurs utilisées représentent une pratique existante éprouvée applicable à l'installation particulière.

NOTE Certaines conditions d'installation, notamment lorsque la mise sous tension du transformateur s'effectue à partir de l'extrémité distante d'un câble ou d'une ligne aérienne de grande longueur, peuvent entraîner une exposition importante à des surtensions susceptibles d'être fréquentes et répétitives. Dans de tels cas, des tensions d'essais plus élevées, des essais au choc de foudre, des essais au choc de manœuvre et d'autres essais sur des unités particulières pourraient faire l'objet d'un accord entre le constructeur et l'acheteur. Par exemple, un enroulement avec une valeur $U_m < 1,1$ kV pourrait être soumis à des essais aux valeurs correspondantes à un enroulement avec une valeur U_m de 3,6 kV. La caractéristique tension-temps spécifique de la surtension est une considération importante lorsqu'il s'agit de déterminer le type et le niveau de l'essai requis pour garantir un fonctionnement satisfaisant.

Des défaillances ont notamment été signalées à des valeurs de U_m inférieures ou égales à 36 kV, lorsque le transformateur est mis sous/hors tension par un disjoncteur à vide, à partir de l'extrémité distante d'un câble, en raison de l'existence potentielle d'une condition résonante, provoquant des réamorçages et des tensions transitoires répétitives. Dans certains cas, il peut ne pas être suffisant d'accroître le niveau d'isolement, et d'autres méthodes, telles que l'installation d'un circuit amortisseur pourraient être envisagées. Des informations supplémentaires sont fournies dans la norme IEEE C57.142:2010 et le rapport CIGRE 12-14.

Tableau 2 – Niveaux de tension d'essai (1 de 2)

Tension la plus élevée pour l'enroulement du matériel U_m kV	Choc de foudre en onde pleine (LI) kV	Choc de foudre en onde coupée (LIC) kV	Choc de manœuvre (SI) kV	Tension appliquée ou tension de tenue en tension induite des extrémités de ligne (AV) (LTAC) kV
<1,1	–	–	–	3
3,6	20	22	–	10
	40	44	–	10
7,2	60	66	–	20
	75 ^a	83 ^a	–	20
12	75	83	–	28
	95	105	–	28
	110 ^a	121 ^a	–	34 ^a
17,5	95	105	–	38
	125 ^a	138 ^a	–	38
24	125	138	–	50
	145	160	–	50
	150 ^a	165 ^a	–	50
36	170	187	–	70
	200 ^a	220 ^a	–	70
52	250	275	–	95
72,5	325	358	–	140
	350 ^a	385 ^a	–	140
100	450	495	375 ^a	185
123	550	605	460 ^a	230
145	550	605	460 ^a	230
	650	715	540 ^a	275
170	650	715	540 ^a	275
	750	825	620 ^a	325
245	850	935	700 ^a	360
	950	1 045	750 ^a	395
	1 050	1 155	850 ^a	460

Tableau 2 (2 de 2)

Tension la plus élevée pour l'enroulement du matériel U_m kV	Choc de foudre en onde pleine (LI) kV	Choc de foudre en onde coupée (LIC) kV	Choc de manœuvre (SI) kV	Tension appliquée ou tension de tenue en tension induite des extrémités de ligne (AV) (LTAC) kV
300	950	1 045	750	395
	1 050	1 155	850	460
362	1 050	1 155	850	460
	1 175	1 290	950	510
420	1 175	1 290	950	510
	1 300	1 430	1 050	570
	1 425	1 570	1 175 ^a	630
550	1 300	1 430	1 050	570
	1 425	1 570	1 175	630
	1 550	1 705	1 300 ^a	680
	1 675 ^a	1 845 ^a	1 390 ^a	–
800	1 800	1 980	1 425	–
	1 950	2 145	1 550	–
	2 050 ^a	2 255 ^a	1 700 ^a	–
	2 100	2 310	1 675 ^a	–
1 100	1 950	2 145	1 425	–
	2 250	2 475	1 800	–
1 200	2 250	2 475	1 800	–

^a Ces valeurs ne figurent pas dans l'IEC 60071-1:2011 pour la valeur de U_m considérée, mais sont toutefois incluses dans la mesure où elles représentent soit la pratique courante dans certaines régions du monde, soit pour certains niveaux de choc de manœuvre, une valeur coordonnée à la valeur particulière du niveau de choc de foudre.

Tableau 3 – Niveaux de tension d'essai utilisés dans des cas particuliers

Tension la plus élevée pour l'enroulement du matériel U_m kV	Choc de foudre en onde pleine (LI) kV	Choc de foudre en onde coupée (LIC) kV	Choc de manœuvre (SI) kV	Tension appliquée ou tension de tenue en tension induite des extrémités de ligne (AV) (LTAC) kV
7,2	40	44	-	20
12	60	66	-	28
17,5	75	83	-	38
24	95	105	-	50
36	145	160	-	70
60 ^a	280 ^a	308 ^a	230 ^a	115 ^a
123 ^b	450 ^b	495 ^b	375 ^a	185 ^b
170 ^b	550 ^b	605 ^b	460 ^a	230 ^b
245	650 ^b	715 ^b	550 ^a	275 ^b
	750 ^b	825 ^b	620 ^a	325 ^b
300	850	935	750	395
362	950	1 045	850	395
420	1 050	1 155	850	460
550	1 175	1 290	950	510

^a Ces valeurs ne figurent pas dans l'IEC 60071-1:2011 pour la valeur particulière de U_m mais sont toutefois incluses dans la mesure où elles représentent la pratique courante dans certaines régions du monde.

^b Ces valeurs nécessitent une considération particulière, se reporter à l'IEC 60071-1:2011

7.2.3 Séquence d'essai

Les essais doivent être effectués selon l'ordre ci-dessous:

- a) essais au choc de foudre (LI, LIC, LIN, LIMT);
- b) choc de manœuvre (SI);
- c) essai de tension appliquée (AV);
- d) essai de tenue alternative d'une borne de ligne (LTAC);
- e) essai de tenue de tension induite (IVW);
- f) essai de tension induite avec mesure de décharges partielles (IVPD).

NOTE Il s'agit d'une liste exhaustive, et ces essais ne sont pas tous applicables à un transformateur particulier.

Par un accord entre le constructeur et l'acheteur, l'essai au choc de manœuvre peut être effectué avant l'essai au choc de foudre.

Si un essai IVPD doit être effectué, la séquence d'essai peut alors, par accord entre le constructeur et l'acheteur, être modifiée, à l'exception du fait que l'essai IVPD doit être le dernier essai diélectrique.

7.3 Exigences d'essai concernant les transformateurs spécifiques

7.3.1 Essais pour transformateurs avec $U_m \leq 72,5$ kV

7.3.1.1 Essais individuels

- a) Essai par tension appliquée (AV)

Un essai par tension appliquée doit être effectué selon la méthode indiquée à l'Article 10 sur chaque enroulement distinct du transformateur. Les tensions d'essai sont indiquées dans le Tableau 2.

NOTE Les transformateurs avec la valeur $U_m \leq 72,5$ kV sont supposés avoir une isolation d'enroulement uniforme afin de satisfaire à cet essai.

b) Essai de tenue en tension induite (IVW)

Un essai de tenue de tension induite doit être effectué selon la méthode indiquée en 11.2 avec une tension d'essai (phase-terre) de $(2 \times U_r) / \sqrt{3}$. Cet essai peut, lorsque l'acheteur en est d'accord, être remplacé par un essai IVPD avec une tension de pointe de $(2 \times U_r) / \sqrt{3}$, voir 7.3.1.3 a).

7.3.1.2 Essais de type

Essai au choc de foudre en ondes pleines (LI)

Un essai au choc de foudre en ondes pleines doit être effectué sur les bornes de ligne en appliquant la méthode indiquée en 13.1 et 13.2. Les tensions d'essai sont indiquées dans le Tableau 2.

7.3.1.3 Essais spéciaux

a) Essai de tension induite avec mesure des décharges partielles (IVPD)

Lorsque spécifié par l'acheteur, un essai doit être effectué selon la méthode indiquée en 11.3, avec un niveau de tension (phase-terre) de pointe de $(1,8 \times U_r) / \sqrt{3}$ et une tension de mesure de décharges partielles (DP) de $(1,58 \times U_r) / \sqrt{3}$. Des niveaux de tension alternative supérieurs peuvent être utilisés lorsque spécifiés par l'acheteur. Notamment une tension de pointe de $(\sqrt{3} \times U_m) / \sqrt{3}$ et une tension de mesure de DP de $(1,5 \times U_m) / \sqrt{3}$ peuvent être appliquées si elles sont plus élevées.

Lorsqu'un niveau de tension de pointe de $(2 \times U_r) / \sqrt{3}$ est appliqué, cet essai peut remplacer l'essai individuel de tenue de tension induite (IVW).

Une durée plus courte à la tension de mesure DP peut être convenue entre le constructeur et l'acheteur, mais une durée de 5 min est recommandée.

b) Essai au choc de foudre en ondes coupées (LIC)

Lorsque spécifié par l'acheteur, l'essai au choc de foudre en ondes pleines doit être remplacé par un essai au choc de foudre en ondes coupées selon la méthode indiquée en 13.1 et 13.3.

L'extension de l'essai au choc de foudre visant à inclure des chocs en ondes coupées sur la queue est recommandée, en tant qu'essai spécial, dans les cas où le transformateur est directement connecté à un poste sous enveloppe métallique isolé au SF6 par l'intermédiaire de traversées liquide/SF6 ou lorsque le transformateur est protégé par des éclateurs.

c) Essai au choc de foudre sur la borne neutre (LIN)

Lorsque spécifié par l'acheteur, un essai au choc de foudre en ondes pleines doit être effectué sur la borne neutre selon la méthode indiquée en 13.1 et 13.4. Ceci s'applique normalement si la borne neutre n'est pas reliée directement à la terre en service.

d) Chocs de foudre appliqués simultanément sur plusieurs bornes de ligne (LIMT)

Lorsque spécifié par l'acheteur, un essai au choc de foudre supplémentaire sur deux bornes ou plus connectées entre elles doit être effectué selon la méthode indiquée en 13.1, avec les connexions d'essai indiquées en 13.1.4.3. Sauf spécification contraire, le type d'essai est LI.

7.3.2 Essais sur transformateurs avec $72,5 \text{ kV} < U_m \leq 170 \text{ kV}$

7.3.2.1 Essais individuels

a) Essai au choc de foudre en ondes pleines (LI)

Un essai au choc de foudre en ondes pleines doit être effectué sur les bornes de ligne en appliquant la méthode indiquée à l'Article 13. Les tensions d'essai sont données dans le Tableau 2.

b) Essai par tension appliquée (AV)

Un essai par tension appliquée conforme à la méthode indiquée à l'Article 10 doit être effectué sur chaque enroulement distinct du transformateur. Les tensions d'essai sont indiquées dans le Tableau 2 pour les transformateurs à isolation uniforme. Pour les transformateurs à isolation non uniforme, l'essai doit être effectué avec la tension d'essai correspondant à l'extrémité neutre, voir 7.4.2.

c) Essai de tenue de tension induite (IVW)

Un essai de tenue de tension induite doit être effectué selon la méthode indiquée en 11.2 avec une tension d'essai (phase-terre) de $(2 \times U_r) / \sqrt{3}$. Cet essai peut, lorsque l'acheteur en est d'accord, être remplacé par un essai IVPD avec une tension de pointe de $(2 \times U_r) / \sqrt{3}$, voir e) ci-dessous.

d) Essai de tenue en tension induite des extrémités de ligne pour des transformateurs à isolation non uniforme (LTAC),

Pour les enroulements à isolation non uniforme, cet essai doit être effectué au niveau d'essai indiqué pour l'essai de tension appliquée correspondant à l'extrémité de ligne mentionnée dans le Tableau 2, en appliquant la méthode indiquée à l'Article 12. Sur accord entre le constructeur et l'acheteur, cet essai peut être omis lorsqu'un essai au choc de manœuvre est effectué.

e) Essai de tension induite avec mesure de décharges partielles (IVPD)

Un essai doit être effectué selon la méthode indiquée en 11.3, avec un niveau de tension (phase-terre) de pointe de $(1,8 \times U_r) / \sqrt{3}$ et une tension de mesure de décharges partielles (DP) de $(1,58 \times U_r) / \sqrt{3}$. D'autres niveaux de tension supérieurs peuvent être utilisés lorsque spécifiés par l'acheteur. Notamment une tension de pointe de $(\sqrt{3} \times U_m) / \sqrt{3}$ et une tension de mesure de DP de $(1,5 \times U_m) / \sqrt{3}$ peuvent être appliquées si elles sont plus élevées.

Lorsqu'un niveau de tension de pointe de $(2 \times U_r) / \sqrt{3}$ est appliqué, cet essai peut remplacer l'essai individuel de tenue de tension induite (IVW).

7.3.2.2 Essais spéciaux

a) Essai au choc de manœuvre (SI)

Lorsque spécifié par l'acheteur, un essai au choc de manœuvre, en appliquant la méthode indiquée à l'Article 14, doit être effectué sur les bornes de ligne. La tension d'essai est indiquée dans le Tableau 2. Lorsque cet essai est effectué, l'essai de tenue en tension induite des extrémités de ligne (LTAC) peut alors être omis selon accord.

b) Essai au choc de foudre en ondes coupées (LIC)

Lorsque spécifié par l'acheteur, l'essai au choc de foudre en ondes pleines doit être remplacé par un essai au choc de foudre en ondes coupées selon la méthode indiquée en 13.1 et 13.3.

L'extension de l'essai au choc de foudre visant à inclure des chocs en ondes coupées sur la queue est recommandée, en tant qu'essai spécial, dans les cas où le transformateur est directement connecté à un poste sous enveloppe métallique isolé au SF6 par l'intermédiaire de traversées liquide/SF6 ou lorsque le transformateur est protégé par des éclateurs.

c) Essai de tenue en tension induite des extrémités de ligne pour des transformateurs à isolation non uniforme (LTAC),

Lorsque spécifié par l'acheteur, pour les enroulements à isolation non uniforme, cet essai doit être effectué au niveau d'essai indiqué pour l'essai de tension appliquée correspondant à l'extrémité de ligne mentionnée dans le Tableau 2, en appliquant la méthode indiquée à l'Article 12.

d) Essai au choc de foudre sur la borne neutre (LIN)

Lorsque spécifié par l'acheteur, un essai au choc de foudre en ondes pleines doit être effectué sur la borne neutre. Ceci s'applique normalement si la borne neutre n'est pas reliée directement à la terre en service.

e) Chocs de foudre appliqués simultanément sur plusieurs bornes de ligne (LIMT)

Lorsque spécifié par l'acheteur, un essai au choc de foudre supplémentaire sur deux bornes ou plus connectées entre elles doit être effectué selon la méthode indiquée en 13.1, avec les connexions d'essai indiquées en 13.1.4.3. Sauf spécification contraire, le type d'essai est LI.

7.3.3 Essais sur transformateurs avec $U_m > 170$ kV

7.3.3.1 Essais individuels

a) Essai au choc de foudre en ondes coupées (LIC)

Un essai au choc de foudre en ondes coupées doit être effectué sur toutes les bornes de ligne avec une valeur $U_m > 170$ kV en appliquant la méthode indiquée à l'Article 13. Un essai au choc de foudre (LI) doit être effectué sur toutes les bornes de ligne avec une valeur $U_m \leq 170$ kV en appliquant la méthode indiquée à l'Article 13. Les tensions d'essai sont indiquées dans le Tableau 2. Si l'acheteur l'exige dans le contrat, les essais LIC doivent être en outre effectués sur les bornes de ligne avec une valeur $U_m \leq 170$ kV.

b) Essai au choc de manœuvre (SI)

Un essai au choc de manœuvre, en appliquant la méthode indiquée à l'Article 14, doit être effectué sur les bornes de ligne. La tension d'essai est indiquée dans le Tableau 2.

c) Essai par tension appliquée (AV)

Un essai par tension appliquée doit être effectué conformément à la méthode indiquée à l'Article 10 sur chaque enroulement distinct du transformateur. Les tensions d'essai sont indiquées dans le Tableau 2 pour les transformateurs à isolation uniforme. Pour les transformateurs à isolation non uniforme, l'essai doit être effectué avec la tension d'essai correspondant à l'extrémité neutre, voir 7.4.2.

d) Essai de tension induite avec mesure de décharges partielles (IVPD)

Un essai doit être effectué en appliquant la méthode indiquée en 11.3, avec un niveau de tension (phase-terre) de pointe de $(1,8 \times U_T) / \sqrt{3}$ et une tension de mesure des décharges partielles (DP) de $(1,58 \times U_T) / \sqrt{3}$ pendant une heure. Des niveaux de tension alternative supérieurs peuvent être utilisés lorsque spécifiés par l'acheteur. Notamment une tension de pointe de $(\sqrt{3} \times U_m) / \sqrt{3}$ et une tension de mesure des décharges partielles de $(1,5 \times U_m) / \sqrt{3}$ pendant une heure peuvent être appliquées si elles sont plus élevées.

NOTE Pour les transformateurs triphasés, la tension entre les phases au niveau de la pointe de l'essai IVPD peut être supérieure aux tensions de tenue alternatives phase-terre indiquées dans le Tableau 2.

7.3.3.2 Essais spéciaux

a) Essai au choc de foudre sur la borne neutre (LIN)

Lorsque spécifié par l'acheteur, un essai au choc de foudre en onde pleine doit être effectué sur la borne neutre. Ceci s'applique normalement si la borne neutre n'est pas reliée directement à la terre en service.

b) Essai de tenue en tension induite des extrémités de ligne pour des enroulements à isolation non uniforme (LTAC)

Lorsque spécifié par l'acheteur, cet essai doit être effectué au niveau d'essai indiqué pour l'essai de tension appliquée correspondant à l'extrémité de ligne mentionnée dans le Tableau 2, en appliquant la méthode indiquée à l'Article 12.

c) Chocs de foudre appliqués simultanément sur plusieurs bornes de ligne (LIMT)

Lorsque spécifié par l'acheteur, un essai au choc de foudre supplémentaire sur deux bornes ou plus connectées entre elles doit être effectué selon la méthode indiquée en 13.1, avec les connexions d'essai indiquées en 13.1.4.3. Sauf spécification contraire, le type d'essai est LIC.

7.4 Attribution de valeurs de tensions U_m et d'essai à la borne neutre d'un enroulement

7.4.1 Transformateurs avec $U_m \leq 72,5$ kV

Le neutre doit être soumis à un essai par tension appliqué à un niveau de tension identique à celui appliqué pour les extrémités de ligne. Lorsqu'un essai au choc de foudre sur la borne neutre est spécifié, le niveau d'essai doit alors être indiqué dans l'appel d'offres et la commande.

NOTE Les transformateurs dont la valeur $U_m \leq 72,5$ kV, doivent être conçus avec une isolation d'enroulement uniforme afin de satisfaire aux exigences d'essai.

7.4.2 Transformateurs avec $U_m > 72,5$ kV

7.4.2.1 Borne neutre directement mise à la terre

Lorsque la borne neutre doit être reliée de façon permanente à la terre en service, soit directement, soit par l'intermédiaire d'un transformateur de courant, mais sans ajout délibéré d'aucune impédance dans la connexion, la tension d'essai par tension appliquée doit alors être au moins égale à 38 kV ($U_m \geq 17,5$ kV). Des niveaux d'essai supérieurs peuvent être spécifiés.

Aucun essai de tenue au choc de foudre sur la borne neutre n'est recommandé, mais il peut cependant être spécifié.

7.4.2.2 Borne neutre non directement mise à la terre

La valeur U_m et les tensions d'essai applicables à l'extrémité neutre doivent être indiquées par l'acheteur lors de l'appel d'offres et la commande. La valeur U_m de la borne neutre varie suivant que la borne neutre est destinée à rester ouverte ou à être mise à la terre via une impédance (voir Annexe D). La valeur de U_m et les tensions d'essai doivent de préférence être choisies dans le Tableau 2. La valeur U_m ne doit en aucun cas être inférieure à 17,5 kV.

Lorsqu'un essai de tenue au choc de foudre sur la borne neutre est spécifié, le niveau d'essai doit alors être indiqué dans l'appel d'offres et la commande, et la tension de tenue de choc assignée de l'extrémité neutre doit être vérifiée par l'essai décrit en 13.4. Un essai au choc de foudre en onde coupée sur la borne neutre n'est pas applicable.

8 Essais diélectriques sur des transformateurs ayant déjà été mis en service

Tout transformateur devant être considéré comme conforme à la présente norme, de façon identique à un transformateur neuf (par exemple, suite à une réparation couverte par la garantie ou à un rembobinage et une réhabilitation complète destinée à remettre le transformateur dans un état "comme neuf"), doit être soumis une fois la réparation ou la remise à neuf achevées, à l'ensemble des essais individuels qu'exige la présente norme pour ce transformateur, et ce, à une tension égale à 100 % du niveau de la tension d'essai requise..

Tout transformateur réparé afin de recouvrer sa fonctionnalité (par exemple, suite à un claquage après de nombreuses années en service), mais qui doit toujours être considéré comme conforme à la présente norme, doit être soumis aux essais décrits dans la présente

norme, qui sont nécessaires pour vérifier la réparation à une tension d'essai comprise entre 80 % et 100 % du niveau de la tension d'essai d'origine. En règle générale, il convient de soumettre à essai toute nouvelle pièce d'un transformateur réparé, et ce, à une tension de 100 %, une tension de 80 % du niveau de la tension d'essai d'origine pouvant toutefois être considérée comme un niveau de tension d'essai adéquat permettant de vérifier que les pièces ou composants usagés sont adaptés à une poursuite de leur utilisation. Lorsque les anciennes et les nouvelles pièces font l'objet d'un essai simultanément, un accord portant sur le niveau de tension d'essai doit être conclu. L'essai IVPD doit être effectué à une tension égale à 100 % du niveau de tension d'essai d'origine. Il peut se révéler nécessaire de modifier les critères de décharge partielle selon les circonstances de l'essai, et cette modification doit faire l'objet d'un accord.

9 Isolement des circuits auxiliaires (AuxW)

Les circuits auxiliaires d'alimentation et de commande doivent être soumis à un essai par source séparée alternative, sous une tension par rapport à la terre de 2 kV pendant 1 min. L'essai est satisfait si aucun effondrement de tension ou aucun autre signe de claquage ne se produit. L'essai doit être effectué dans l'usine du constructeur, à moins que le transformateur ne doive être installé sur site par le constructeur, auquel cas l'essai peut être effectué sur site et non pas en usine. Les circuits déconnectés ou retirés pour être transportés, qui ont été soumis à un essai de 2 kV en usine, doivent être soumis à l'essai sur site suite à leur montage, soit en renouvelant l'essai en courant alternatif de 2 kV ou en réalisant une mesure de la résistance d'isolement en tension continu de 1 kV avec une résistance mesurée minimale de 1 M Ω .

Les circuits des enroulements secondaires d'un transformateur de courant doivent être soumis à un essai sous tension alternative de 2,5 kV par rapport à la terre pendant 1 min. L'essai doit être effectué dans l'usine du constructeur. Si la tension de saturation (*knee-point* en anglais) du transformateur de courant dépasse une tension alternative de 2 kV l'essai doit être effectué à une tension alternative de 4 kV. L'essai est satisfaisant si aucun effondrement de tension ou aucun autre signe de claquage ne se produit.

Les moteurs et autres appareils des équipements auxiliaires doivent satisfaire aux exigences d'isolement indiquées dans la norme IEC les concernant (qui sont généralement des valeurs plus faibles que la valeur spécifiée pour les seuls circuits, ce qui peut contraindre parfois à les débrancher pour soumettre les circuits à l'essai). Tous les dispositifs à semi-conducteurs et à microprocesseur doivent être exclus du circuit d'essai. Tous les relais de surveillance de tension triphasée et dispositifs débouchables doivent être retirés pendant les essais.

NOTE La pratique courante est de vérifier tous les circuits auxiliaires sur site à une tension continue de 1 kV pendant 1 min avant mise sous tension.

10 Essai de tension appliquée (AV)

L'essai doit être effectué sur chaque enroulement distinct du transformateur à tour de rôle.

La pleine tension d'essai doit être appliquée pendant 60 s entre toutes les bornes accessibles de l'enroulement en essai reliées entre elles et toutes les bornes accessibles des autres enroulements, le circuit magnétique, son habillage et la cuve ou l'enveloppe du transformateur, reliés ensemble à la terre.

L'essai doit être effectué avec une tension alternative monophasée approximativement sinusoïdale, et à une fréquence assignée au moins égale à 80 % de la fréquence assignée. La valeur de crête de la tension doit être mesurée. Cette valeur de crête divisée par $\sqrt{2}$ doit être égale à la valeur d'essai.

NOTE Approximativement sinusoïdale peut être considérée comme signifiant que la valeur de crête divisée par $\sqrt{2}$ ne diffère pas de la valeur efficace de la forme d'onde de plus d'environ 5 % (voir IEC 60060-1), des écarts plus importants pouvant toutefois être acceptés.

L'essai doit commencer à une tension inférieure ou égale au tiers de la valeur d'essai spécifiée, et la tension doit être portée à la valeur d'essai aussi rapidement que le permet la mesure. A la fin de l'essai, la tension doit être réduite rapidement à une tension inférieure au tiers de la valeur d'essai avant coupure.

L'essai est satisfaisant s'il ne se produit aucun effondrement de la tension d'essai.

Pour les enroulements à isolation non uniforme, l'essai est effectué avec la tension d'essai spécifiée pour l'extrémité neutre.

Dans les transformateurs où des enroulements dont les valeurs de U_m sont différentes sont reliés ensemble à l'intérieur du transformateur (habituellement des autotransformateurs), les tensions d'essai doivent être déterminées par l'isolement de l'extrémité neutre commune et sa valeur U_m assignée.

11 Essais de tension induite (IVW et IVPD)

11.1 Généralités

L'essai doit être effectué avec toutes les bornes neutres accessibles et toutes les autres bornes éventuelles qui sont normalement au potentiel à la terre en service, reliées à la terre. Pour les transformateurs triphasés, une tension d'essai triphasée symétrique doit être utilisée. Les bornes de ligne non reliées à l'alimentation d'essai doivent être laissées non connectées.

NOTE 1 Lorsque la tension est induite dans un enroulement sans neutre, les tensions par rapport à la terre sur chaque extrémité de cet enroulement, dépendent des capacités par rapport à la terre et par rapport aux autres enroulements. Tout claquage entre l'une des bornes de ligne et la terre au cours de l'essai peut générer des tensions supérieures au niveau d'essai par tension appliquée des autres bornes de l'enroulement. Des mesures de prévention adaptées peuvent être requises afin de tenir compte de cette possibilité.

Pendant l'essai, la tension d'essai correspondant à un enroulement sans réglage de tension doit apparaître aux bornes de cet enroulement, de sorte que les tensions entre les spires et entre phases aient le même rapport qu'entre la tension d'essai et la tension assignée. La tension doit être mesurée sur les bornes de l'enroulement ayant la tension la plus élevée, ou si ceci n'est pas réalisable, elle doit être mesurée aux bornes du transformateur qui sont reliées à l'alimentation.

Pour les transformateurs avec prises, l'essai doit être effectué avec le transformateur connecté sur la prise principale, sauf spécification ou accord contraire de l'acheteur.

Lorsque l'acheteur requiert une tension d'essai spécifique pour les enroulements à plus basse tension, qui soit supérieure à la tension déterminée dans le présent article, ceci doit alors être clairement indiqué dans l'appel d'offres et la commande, et un accord doit être conclu portant sur la méthode d'essai et les tensions d'essai apparaissant sur les enroulements à tension supérieure, et qui sont susceptibles en conséquence d'être supérieures aux tensions d'essai spécifiées.

L'essai doit être effectué dans des conditions d'excitation du transformateur exactement identiques à celles en service. La tension peut être induite de n'importe quel enroulement ou d'un enroulement spécial, voire de prises installées pour les essais.

Une tension alternative doit être appliquée aux bornes d'un enroulement du transformateur. La forme de la tension doit être aussi proche que possible d'une sinusoïde et sa fréquence suffisamment élevée par rapport à la fréquence assignée pour éviter un courant magnétisant excessif pendant l'essai.

La valeur de crête, telle que définie dans l'IEC 60060-1, divisée par $\sqrt{2}$ et la valeur efficace de la tension d'essai induite doivent être mesurées, et la plus faible de la valeur de crête divisée par $\sqrt{2}$ et de la valeur efficace vraie (*r.m.s.*) doivent être prises comme la valeur d'essai.

11.2 Essai de tenue de tension induite (IVW)

La durée de l'essai à la pleine tension d'essai doit être, sauf spécification contraire, de 60 s pour toute fréquence d'essai inférieure ou égale à 2 fois la fréquence assignée. Lorsque la fréquence d'essai est supérieure à 2 fois la fréquence assignée, la durée de l'essai exprimée en secondes doit être de:

$$120 \times \frac{\text{fréquence assignée}}{\text{fréquence d'essai}}, \text{ et non inférieure à 15 s}$$

L'essai doit commencer à une tension inférieure ou égale au tiers de la valeur d'essai spécifiée et la tension doit être portée à la valeur d'essai aussi rapidement que le permet la mesure. A la fin de l'essai, la tension doit être réduite rapidement à une tension inférieure au tiers de la valeur d'essai avant coupure.

L'essai est satisfaisant s'il ne se produit aucun effondrement de la tension d'essai.

11.3 Essai de tension induite avec mesure des décharges partielles (IVPD)

11.3.1 Généralités

Lorsque l'acheteur spécifie un type particulier de traversée supposé avoir un niveau de décharge partielle qui empêche d'effectuer des mesures précises des décharges partielles du transformateur en essai, il est admis d'échanger les traversées pour un type de traversée exempt de toute décharge partielle au cours de l'essai du transformateur.

11.3.2 Durée et fréquence d'essai

Sauf spécification contraire, la durée de l'essai à la tension de pointe doit être de 60 s dans le cas où $U_m \leq 800$ kV et de 300 s dans le cas où $U_m > 800$ kV pour toute fréquence d'essai inférieure ou égale à deux fois la fréquence assignée. Lorsque la fréquence d'essai est supérieure à 2 fois la fréquence assignée, la durée de l'essai exprimée en secondes doit être de:

$$120 \times \frac{\text{fréquence assignée}}{\text{fréquence d'essai}}, \text{ et non inférieure à 15 s pour } U_m \leq 800 \text{ kV}$$

ou

$$600 \times \frac{\text{fréquence assignée}}{\text{fréquence d'essai}}, \text{ et non inférieure à 75 s pour } U_m > 800 \text{ kV}$$

La durée de l'essai, à l'exception de la durée à la tension de pointe, doit être indépendante de la fréquence d'essai.

11.3.3 Séquence d'essai

La séquence d'essai doit être comme suit:

- a) La tension doit être appliquée à une valeur non supérieure à $(0,4 \times U_T) / \sqrt{3}$.

- b) La tension doit être portée à $(0,4 \times U_r)/\sqrt{3}$ et une mesure de bruit de fond des décharges partielles doit être effectuée et enregistrée.
- c) La tension doit être portée à $(1,2 \times U_r)/\sqrt{3}$ et être maintenue à ce niveau pendant une durée minimale de 1 min et seulement suffisamment longue pour effectuer une mesure des décharges partielles stables.
- d) Le niveau des décharges partielles doit être mesuré et enregistré.
- e) La tension doit être portée au niveau de la tension de mesure pendant une heure des décharges partielles et y être maintenue pendant une durée minimale de 5 min et suffisamment longue pour effectuer une mesure des décharges partielles stables.
- f) Le niveau des décharges partielles doit être mesuré et enregistré.
- g) La tension doit être portée à la tension de pointe et maintenue à ce niveau pendant la durée de l'essai spécifiée en 11.3.2.
- h) Immédiatement après la durée d'essai, la tension doit être réduite sans coupure au niveau de la tension de mesure pendant une heure des décharges partielles.
- i) Le niveau des décharges partielles doit être mesuré et enregistré.
- j) La tension doit être maintenue au niveau de la tension de mesure pendant une heure des décharges partielles, et ce; pendant une durée d'une heure au moins après la mesure des décharges partielles.
- k) Le niveau des décharges partielles doit être mesuré et enregistré toutes les 5 min au cours de la période d'une heure.
- l) Après la dernière mesure des décharges partielles au cours de la période d'une heure, la tension doit être réduite à $(1,2 \times U_r)/\sqrt{3}$ et être maintenue à ce niveau pendant une durée minimale de 1 min et suffisamment longue pour effectuer une mesure des décharges partielles stables.
- m) Le niveau des décharges partielles doit être mesuré et enregistré.
- n) La tension doit être réduite $(0,4 \times U_r)/\sqrt{3}$ et le niveau de bruit de fond des décharges partielles doit être mesuré et enregistré.
- o) La tension doit être réduite à une valeur inférieure à $(0,4 \times U_r)/\sqrt{3}$.
- p) La tension doit être alors coupée.

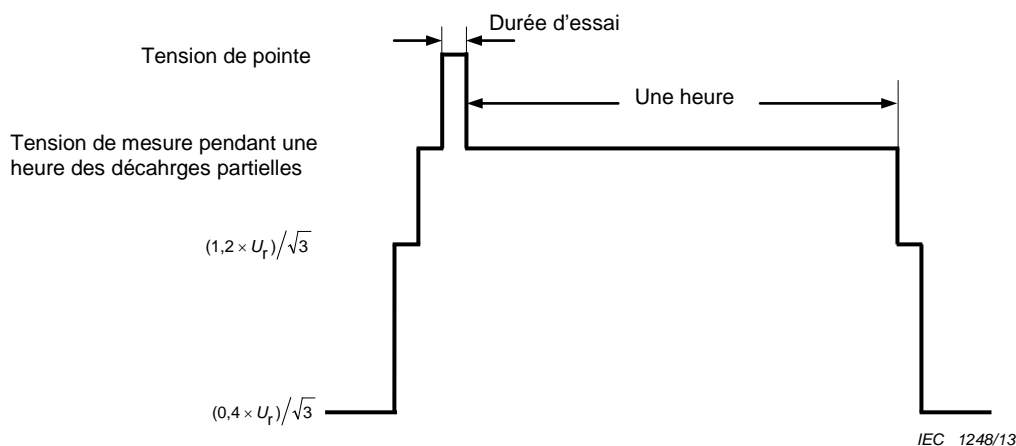
Le niveau des décharges partielles doit être observé de manière continue sur au moins une voie de mesure pendant toute la durée de l'essai.

Pendant la séquence d'essai, il convient de noter les tensions d'apparition et d'extinction de toute activité de décharges partielles significative, afin de faciliter l'évaluation du résultat d'essai si les critères d'essai ne sont pas satisfaits.

NOTE Il peut également être utile d'enregistrer l'image des DP (déphasage, charge apparente et nombre) de toute activité correspondante significative afin de faciliter l'évaluation.

Le niveau de tension de pointe et la tension de mesure pendant une heure des décharges partielles sont indiqués en 7.3.1.3, 7.3.2.1 et 7.3.3.1 en fonction de la valeur de U_m du transformateur.

Les principales caractéristiques de la séquence d'essai sont illustrées à la Figure 1.



NOTE Le niveau de tension de pointe et la tension de mesure pendant une heure des décharges partielles sont indiqués en 7.3.1.3, 7.3.2.1 et 7.3.3.1.

Figure 1 – Séquence d'application de la tension d'essai pour la tension induite avec mesure de décharges partielles (IVPD)

11.3.4 Mesure des décharges partielles (DP)

Les décharges partielles doivent être mesurées en utilisant une méthode conforme à l'IEC 60270.

Chaque voie de mesure des décharges partielles, y compris la traversée ou le condensateur de couplage associé(e), doit être étalonnée en termes de charge apparente (pC) selon la méthode indiquée dans l'IEC 60270.

La mesure des décharges partielles doit être indiquée en termes de charge apparente (pC) et doit faire référence aux impulsions répétitives permanentes les plus élevées indiquées par l'instrument de mesure.

Les pointes élevées de décharges partielles se produisant occasionnellement peuvent être négligées.

Pour chaque étape requise de mesure des décharges partielles dans la séquence d'essai, les mesures des dites décharges doivent être effectuées et enregistrées sur toutes les extrémités de ligne équipées, pendant l'essai, de traversées dont la valeur $U_m \geq 72,5$ kV. Toutefois, lorsqu'il y a plus de six bornes de ce type, il n'est alors nécessaire d'effectuer que six mesures (une mesure sur chacune des bornes aux tensions les plus élevées), sauf spécification contraire.

NOTE Les traversées avec une valeur $U_m \geq 72,5$ kV sont équipées de prises d'essai conformes à l'IEC 60137, qui peuvent être utilisées pour les mesures, si cet essai est spécifié comme un essai spécial destiné aux transformateurs avec une valeur $U_m < 72,5$ kV, la méthode de mesure doit alors faire l'objet d'un accord entre le constructeur et l'acheteur.

11.3.5 Critères d'acceptation de l'essai

L'essai peut être considéré comme valide uniquement lorsque le niveau de bruit de fond des décharges partielles ne dépasse pas 50 pC au début et à la fin de l'essai. Pour les essais appliqués aux bobines d'inductance shunt, un niveau de bruit de fond pouvant atteindre 100pC peut être accepté.

NOTE Le niveau de bruit de fond supérieur admis pour les essais des bobines d'inductance shunt est dû au fait que le filtrage de l'alimentation d'essai peut ne pas être possible dans le cas où un fort courant et une tension élevée sont nécessaires.

L'essai est satisfaisant si tous les critères suivants sont remplis:

- a) aucun effondrement de la tension d'essai ne se produit;
- b) aucun des niveaux de décharges partielles enregistrés au cours de la période d'une heure ne dépasse 250 pC;
- c) les niveaux de décharges partielles mesurés au cours de la période d'une heure ne présentent aucune tendance croissante, et aucune augmentation subite maintenue des niveaux au cours des dernières 20 min de l'essai ne se produit;
- d) les niveaux de décharges partielles mesurés au cours de la période d'une heure n'augmentent pas de plus de 50 pC;
- e) le niveau de décharges partielles mesuré à un niveau de tension de $(1,2 \times U_r) / \sqrt{3}$ au terme de la période d'une heure ne dépasse pas 100 pC.

Si les critères c) ou d) ne sont pas satisfaits, la période d'une heure peut être prolongée et ces critères sont considérés comme satisfaits s'ils sont remplis pendant une période continue d'une heure.

Tant qu'il ne se produit pas de claquage, ou tant que de très grandes décharges partielles ne sont pas maintenues pendant une longue durée, l'essai est considéré comme non destructif. Le non-respect des critères d'acceptation relatifs au niveau des décharges partielles ne doit donc pas autoriser un rejet immédiat, mais doit conduire à une concertation entre l'acheteur et le constructeur à propos d'examens complémentaires. Des suggestions concernant de telles procédures sont données dans l'Annexe A.

12 Essai de tenue de tension alternative d'une borne de ligne (LTAC)

L'essai doit être effectué de sorte que la tension d'essai apparaisse entre la borne en essai et la terre. Chaque borne de phase de l'enroulement en essai doit être soumise à l'essai à tour de rôle. La durée de l'essai, la fréquence et la tension appliquées doivent être telles que spécifiées pour l'essai de tenue de tension induite, voir 11.2.

Pour les transformateurs munis de prises et ayant un enroulement à plus basse tension à isolation non uniforme, la position des prises pendant l'essai doit être choisie de sorte que, lorsque la tension d'essai requise apparaît sur les bornes de l'enroulement à tension la plus élevée, la tension apparaissant sur les bornes de l'enroulement à plus basse tension soit être la plus proche possible de la valeur d'essai requise pour ce dernier. Pour les transformateurs dont l'enroulement à plus basse tension à isolation uniforme est soumis à un essai de tension appliquée, la prise utilisée peut être choisie par le constructeur.

L'essai est satisfaisant s'il ne se produit aucun effondrement de la tension d'essai.

NOTE Cet essai est conçu uniquement comme un essai de tenue par rapport à la terre de chaque extrémité de ligne d'un transformateur à isolation non uniforme, et il n'est pas destiné à vérifier par l'isolation entre phases ou entre spires. Le schéma d'essai peut ainsi être réalisé selon la manière la plus appropriée, par exemple, avec de la tension au neutre de manière à réduire la tension entre spires, l'essai étant par ailleurs effectué normalement comme trois essais monophasés. Dans des circonstances normales, l'essai au choc de manœuvre couvre intégralement l'objet de cet essai. Des mesures des décharges partielles peuvent être effectuées pendant cet essai si l'acheteur le requiert.

13 Essais au choc de foudre (LI, LIC, LIN, LIMT)

13.1 Exigences concernant tous les essais au choc de foudre

13.1.1 Généralités

Les définitions générales des termes relatifs aux essais au choc et les exigences concernant les circuits d'essai sont données dans l'IEC 60060-1. Les définitions générales des termes relatifs aux essais de performance et aux contrôles réguliers portant sur les dispositifs de

mesure agréés sont données dans l'IEC 60060-2. De plus amples informations sont données dans l'IEC 60076-4.

Pour les transformateurs immergés dans un liquide, la tension d'essai est normalement de polarité négative, parce que cela réduit le risque de claquages extérieurs aléatoires dans le circuit d'essai. L'acheteur peut spécifier que la polarité d'un, de plusieurs ou de l'ensemble des chocs soit positive. Lorsque l'acheteur requiert des chocs de polarité positive, ceci doit être indiqué dans l'appel d'offres et la commande. Si des polarités de choc combinées sont utilisées, des chocs de référence supplémentaires sont alors requis et la séquence d'essai doit faire l'objet d'un accord entre le constructeur et l'acheteur.

Il convient, avant d'appliquer un choc de polarité opposée, de prévoir une durée suffisante pour la dissipation de toute charge résiduelle

13.1.2 Positions des prises

Si la plage de réglage est inférieure ou égale à $\pm 5\%$, et si la puissance assignée du transformateur est $\leq 2\,500$ kVA, les essais au choc de foudre doivent alors être effectués avec le transformateur connecté sur la prise principale.

Si la plage de réglage est supérieure à $\pm 5\%$ ou si la puissance assignée du transformateur est $> 2\,500$ kVA, les deux prises extrêmes et la prise principale doivent alors être utilisées, sauf accord contraire, avec une prise pour chacune des trois phases individuelles d'un transformateur triphasé ou pour chacun des trois transformateurs monophasés conçus pour constituer un banc triphasé.

En variante, lorsque spécifié par l'acheteur et dans des cas particuliers tels qu'un seul transformateur monophasé, des changeurs de prises multiples, ou lorsque la plage de réglage n'est pas symétrique, la position des prises qui fournit les tensions internes les plus élevées (déterminées soit par calcul, soit par des mesures de choc à basses tensions) doit être utilisée. Lorsque des positions de prises distinctes donnent des tensions internes les plus élevées dans des parties de l'isolation différentes, alors après accord, ces diverses positions peuvent être essayées, en utilisant une position particulière sur chaque phase d'un transformateur triphasé.

NOTE Une attention toute particulière est attirée sur la différence entre les positions additive et soustractive de l'inverseur d'un enroulement à prises avec inversion ou d'un enroulement à prises de type grossier-fin, dans la mesure où ces positions donnent des tensions internes différentes.

Dans le cas d'un enroulement à prises de type grossier-fin, si le commutateur du changeur de prises comporte un élément non linéaire ou un éclateur, susceptible d'intervenir lorsque le transformateur est soumis à l'essai sur une position de prise particulière, une autre position de prise peut alors être choisie. Des recommandations sont fournies dans l'IEC 60076-4.

13.1.3 Enregistrements des essais

La tension d'essai appliquée doit être enregistrée au moyen d'un système de mesure conforme à l'IEC 60060-2. Les enregistrements obtenus doivent indiquer clairement la forme de la tension de choc appliquée (temps de front, durée jusqu'à la mi-valeur et amplitude).

La courbe enregistrée et la valeur extrême de la courbe enregistrée (telle que définie dans l'IEC 60060-1) doit figurer dans le rapport d'essais.

La valeur de la tension d'essai (après l'application de tout filtrage ou correction pour le dépassement (*overshoot*, en anglais), U_t voir IEC 60060-1) doit être consignée dans le rapport d'essai.

L'enregistrement doit comporter au moins une voie supplémentaire de mesure. Dans la plupart des cas, un oscillogramme du courant circulant de l'enroulement soumis à l'essai vers la terre (courant de neutre) ou le courant de fuite capacitif, c'est-à-dire le courant transféré à l'enroulement non soumis à l'essai et court-circuité, représente la meilleure sensibilité pour la

détection des défauts. Le courant circulant de la cuve vers la terre, ou la tension transférée à un enroulement non soumis à l'essai, sont des exemples d'autres grandeurs de mesure appropriées. La méthode de détection adoptée doit faire l'objet d'un accord entre le constructeur et l'acheteur.

D'autres recommandations concernant la détection des défauts, les durées d'échantillonnage temporel adaptées, etc. sont fournies dans l'IEC 60076-4.

13.1.4 Connexions d'essai

13.1.4.1 Connexions d'essai pendant les essais sur les bornes de ligne

La séquence d'essai au choc est appliquée successivement à chacune des extrémités de ligne de l'enroulement soumis à l'essai. Les autres bornes de ligne du transformateur doivent être mises à la terre directement ou, si nécessaire pour obtenir la forme d'onde requise, par l'intermédiaire d'une impédance. L'impédance ne doit pas dépasser la plus faible de l'impédance au choc du réseau relié (si une valeur est fournie par l'acheteur) ou de 400 Ω . Dans tous les cas, la tension apparaissant, au cours de l'essai au choc, sur les autres extrémités de ligne, ne doit pas être supérieure à 75 % de leur niveau de tension assignée de tenue au choc de foudre pour les enroulements à couplage en étoile, ou 50 % pour les enroulements à couplage en triangle. La valeur la plus faible de l'impédance à chaque borne nécessaire pour obtenir la forme d'onde requise doit être utilisée.

Si l'enroulement dispose d'une borne neutre, cette dernière doit être mise à la terre directement ou à travers une faible impédance telle qu'un shunt de mesure du courant. La cuve doit être mise à la terre. Si la forme d'onde requise ne peut pas être obtenue sans recourir à une résistance entre la borne neutre et la terre, une séquence d'essai au choc complète supplémentaire doit alors être appliquée. Dans ce cas, la première séquence d'essai au choc soumet à l'essai l'enroulement à pleine tension sans la résistance, mais la forme d'onde requise peut ne pas être obtenue, la seconde séquence avec la résistance permettant d'obtenir la dite forme. Les ondes coupées, si nécessaire, ne sont pas répétées dans la seconde séquence.

Lorsqu'un transformateur comporte des éléments non linéaires internes tels que des parafoudres qui limitent la tension appliquée sur les parties internes pendant l'essai au choc, les dispositions de 13.2.3 s'appliquent. Les éléments non linéaires internes présents en service doivent également l'être pendant les essais. Les éléments non linéaires externes et d'autres éléments externes de contrôle de la tension tels que des condensateurs, doivent être déconnectés pour l'essai.

Le circuit de choc et les connexions de mesure doivent rester inchangés pendant les essais à tension de référence et à pleine tension.

Des exceptions à cette procédure générale sont indiquées en 13.3.2 et en 13.3.3.

NOTE Si l'acheteur requiert un essai au choc effectué sur un enroulement BT avec $U_m \leq 1,1$ kV, ceci est alors normalement appliqué à toutes les bornes BT (y compris les bornes neutres BT) reliées entre elles, les bornes de tension supérieure étant pour leur part mises à la terre.

13.1.4.2 Connexions d'essai pour les chocs de foudre appliqués sur les bornes neutres

Les chocs de foudre sont appliqués directement sur les extrémités neutres, toutes les autres bornes étant mises à la terre.

Lorsqu'un transformateur comporte des éléments non linéaires internes tels que des parafoudres qui limitent la tension appliquée sur les parties internes pendant l'essai au choc, les dispositions de 13.2.3 s'appliquent. Les éléments non linéaires internes présents en service doivent également l'être pendant les essais. Les éléments non linéaires externes doivent être déconnectés pour l'essai.

Pour les transformateurs ayant un enroulement à prises disposé physiquement près de l'extrémité neutre de l'enroulement, la connexion de prises correspondant au rapport maximal du nombre de spires doit être choisie pour l'essai au choc en l'absence d'une convention contraire entre l'acheteur et le constructeur.

Le circuit de choc et les connexions de mesure doivent rester inchangés pendant les essais à tension de référence et à pleine tension.

13.1.4.3 Connexions d'essai pour les chocs de foudre appliqués simultanément sur plusieurs bornes de ligne (LIMT)

L'acheteur doit spécifier les bornes à relier entre elles pour cet essai.

Les chocs de foudre doivent être appliqués simultanément aux bornes de ligne spécifiées reliées entre elles, avec les autres bornes mises à la terre. Les niveaux d'essai et les détails du dispositif d'essai doivent faire l'objet d'un accord. L'essai doit être effectué sur chaque phase à tour de rôle.

NOTE Les tensions qui apparaissent sur l'enroulement pendant cet essai peuvent dépasser de façon significative les tensions aux appliquées aux bornes.

13.2 Essai au choc de foudre en onde pleine (LI)

13.2.1 Forme d'onde, détermination de la valeur de la tension d'essai et des tolérances

Le choc appliqué lors de l'essai doit être un choc de foudre plein normalisé: $1,2 \mu\text{s} \pm 30 \%$ / $50 \mu\text{s} \pm 20 \%$

La valeur de la tension d'essai doit être la valeur de la tension d'essai telle que définie dans l'IEC 60060-1 (après application de la fonction de tension d'essai). Si l'amplitude relative maximale du dépassement est inférieure ou égale à 5 % ou, la valeur de la tension d'essai peut être considérée comme la valeur extrême définie dans l'IEC 60060-1.

La tolérance sur la valeur de la tension d'essai est $\pm 3 \%$.

Il est important que le constructeur évalue l'adéquation de son matériel d'essai à délivrer une forme d'onde comprise dans les tolérances applicables, en tenant compte de l'association particulière du transformateur et du matériel d'essai dès l'appel d'offres, et qu'il puisse raisonnablement penser satisfaire aux exigences. Dans les cas où le constructeur pense qu'il n'est pas raisonnablement possible d'obtenir la forme d'onde souhaitée du fait des caractéristiques du transformateur et qu'il est nécessaire d'appliquer les écarts de la forme d'onde admis dans les alinéas suivants, ceci doit alors être indiqué clairement dans l'appel d'offres. La valeur effective de l'énergie du générateur de choc doit être mise à disposition de l'acheteur sur demande.

NOTE 1 L'énergie minimale du générateur de choc requise pour satisfaire le temps de queue (50 μs) au cours d'un essai de choc effectué sur un transformateur peut être estimée à l'aide de l'équation suivante (cette équation constitue un simple guide et peut fort bien sous-estimer l'énergie requise. Les informations issues de l'expérience acquises lors d'essai de transformateurs similaires peuvent être utilisées lorsqu'elles sont disponibles):

$$E_{\min} = \frac{100 \times 2\pi \times f \times (t_2)^2}{z \times U^2} \times \left(\frac{U_{LI}}{\eta} \right)^2 \times S_r$$

où

- E_{\min} est l'énergie minimale requise du générateur de choc, en joules;
- f est la fréquence assignée du transformateur en hertz;
- t_2 est le temps de queue, en secondes; t_2 égal 50×10^{-6} s;
- z est l'impédance de court-circuit en % vue de la borne soumise à un choc, voir l'IEC 60076-1;
- U est la tension assignée entre phases de l'enroulement, en volts;
- U_{LI} est la tension d'essai au choc de foudre en onde pleine de l'enroulement soumis à l'essai, en volts;

η est l'efficacité du générateur de choc en p.u; $\eta = 1,0$;

S_r est la puissance assignée triphasée en volts-ampères pour laquelle l'impédance 'z' est définie.

Lorsque la forme de l'onde de choc normalisée ne peut raisonnablement être obtenue en raison d'une faible inductance des enroulements ou d'une capacité élevée par rapport à la terre, et lorsque la forme de l'onde de choc résultante est oscillante de sorte que l'amplitude de dépassement relative dépasse 5 %, il est alors possible d'accroître le temps de front qui s'applique aux enroulements soumis à un essai au choc de foudre en onde coupée, et ce, afin de réduire le dépassement. Dans tous les cas, avec $U_m \leq 800$ kV, le temps de front ne doit pas dépasser 2,5 μ s. Lorsque l'amplitude de dépassement relative dépasse 5 % au niveau de tension de choc en onde pleine, une fonction de tension d'essai doit alors être appliquée conformément à l'IEC 60060-1, afin de déterminer la valeur de tension d'essai. Il est admissible d'appliquer les exigences définies dans l'Annexe B de l'IEC 60060-1 à l'évaluation des paramètres du choc de foudre sans tenir compte de la valeur de dépassement.

NOTE 2 Cet article définit deux méthodes de traitement d'un dépassement de plus de 5 %. Le temps de front peut être augmenté, mais en cas de dépassement de 1,2 μ s + 30 %, des ondes coupées sont alors nécessaires pour effectuer un essai à haute fréquence. En variante ou en plus, la tension de crête du choc (valeur maximale de la courbe enregistrée) est augmentée si le dépassement est supérieur à 5 % et si la fréquence d'oscillation est supérieure à environ 100 kHz, par l'application de la fonction de tension d'essai conformément à l'IEC 60060-1.

Pour les transformateurs avec une valeur $U_m > 800$ kV, il peut exister des cas où il n'est pas raisonnablement possible d'obtenir un temps de front inférieur à 2,5 μ s du fait de la capacité très élevée par rapport à la terre. Dans ces cas, un temps de front de plus longue durée peut être accepté par un accord entre l'acheteur et le constructeur.

Si le temps de queue minimum n'est pas atteint, alors un temps de queue plus court peut être accepté par un accord entre le constructeur et l'acheteur, mais la tension d'essai doit être augmentée de 1 % pour chaque tranche de 2 μ s par laquelle le temps de queue est inférieur à 40 μ s. Le temps de queue minimal admissible est de 20 μ s. Dans le cas de l'enroulement basse tension des transformateurs élévateurs de centrale de production, avec lesquels la connexion est établie de manière à empêcher tout choc de foudre direct en service, cette exigence peut alors être modifiée par un accord.

Des indications supplémentaires sont fournies dans l'IEC 60076-4.

13.2.2 Essais sur les transformateurs sans éléments non linéaires

13.2.2.1 Séquence d'essai

La séquence d'essai doit comprendre:

- a) un choc de référence d'une tension comprise entre 50 % et 70 % de la pleine tension d'essai;
- b) trois chocs ultérieurs à pleine tension.

Si, au cours d'une de ces applications, un claquage extérieur se produit dans le circuit ou le long d'un éclateur de traversée, ou si l'enregistrement échoue sur l'une des voies de mesure spécifiées, il ne doit pas être tenu compte de cette application et il doit être procédé à une nouvelle application.

NOTE Des chocs supplémentaires à des amplitudes ne dépassant pas le niveau de tension de choc de référence peuvent être appliqués, mais il n'est pas nécessaire de les faire figurer dans le rapport d'essai.

13.2.2.2 Critères d'acceptation de l'essai

L'essai est satisfaisant s'il n'y a pas de différences importantes entre les courbes de tension et de courant enregistrés sur la base du choc de référence et les courbes de même nature enregistrés à la pleine tension d'essai.

NOTE L'interprétation détaillée des enregistrements d'essai et la distinction entre les différences marginales et les différences indicatrices d'un défaut requièrent un niveau de compétence et d'expérience important. De plus amples informations sont données dans l'IEC 60076-4.

En cas d'effondrement ou d'écart de tension, et si le constructeur et l'acheteur conviennent que l'essai n'est pas immédiatement un échec, la séquence d'essai doit être achevée, et la séquence d'essai complète doit alors être répétée en appliquant le choc de référence d'origine. L'essai échoue lorsque tout effondrement ou écart de tension supplémentaire est observé.

Les observations supplémentaires au cours de l'essai (sons anormaux, etc.) peuvent permettre de confirmer l'interprétation des enregistrements, mais ne constituent pas une preuve en soi.

13.2.3 Essais sur les transformateurs avec éléments non linéaires

13.2.3.1 Séquence d'essai

Lorsque des éléments non linéaires ou des parafoudres sont intégrés au transformateur afin de limiter les transitoires de surtension transmis, ils peuvent intervenir au cours de la séquence d'essai, et ceci peut générer des différences entre les enregistrements de choc effectués aux différentes tensions. Il existe une tension de seuil à laquelle les différences générées par les éléments non linéaires commencent à apparaître, et la séquence d'essai doit comporter au moins un enregistrement en dessous de ce seuil.

La séquence d'essai doit comprendre:

- a) un choc de référence à une tension comprise entre 50 % et 60 % de la pleine tension d'essai;
- b) un choc de référence à une tension comprise entre 60 % et 75 % de la pleine tension d'essai;
- c) un choc de référence à une tension comprise entre 75 % et 90 % de la pleine tension d'essai;
- d) trois chocs consécutifs en onde pleine à 100 %;
- e) un choc de comparaison à une tension la plus proche possible de la tension spécifiée en c) ci-dessus;
- f) un choc de comparaison à une tension la plus proche possible de la tension spécifiée en b) ci-dessus;
- g) un choc de comparaison à une tension la plus proche possible de la tension spécifiée en a) ci-dessus.

Les tensions de choc de référence doivent être différentes l'une de l'autre d'au moins 10 % (du niveau de 100 %).

Si aucun des enregistrements en onde pleine à 100 % ne diffère de l'enregistrement de la tension la plus basse des enregistrements de chocs de référence, les chocs e), f) et g) ci-dessus peuvent alors être omis.

NOTE Des chocs supplémentaires à des amplitudes ne dépassant pas le niveau de tension de choc de référence peuvent être appliqués, mais il n'est pas nécessaire de les faire figurer dans le rapport d'essai.

Si, au cours d'une de ces applications, un claquage extérieur se produit dans le circuit ou le long d'un éclateur de traversée, ou si l'enregistrement échoue sur l'une des voies de mesure spécifiées, il ne doit pas être tenu compte de cette application et il doit être procédé à une nouvelle application.

13.2.3.2 Critères d'essai

L'essai est satisfaisant s'il n'y a pas de différences importantes entre les courbes de tension et de courant enregistrés sur la base du choc de référence à la tension la plus basse et les courbes de même nature enregistrés à la pleine tension d'essai.

Si tel n'est pas le cas, les enregistrements du courant et de la tension issus des chocs suivants doivent alors être comparés:

- a) et g)
- b) et f)
- c) et e)
- tous les enregistrements de chocs à un niveau de 100 %.

L'essai est satisfaisant en l'absence de différence significative entre les enregistrements comparés (au-delà de la différence qui peut raisonnablement s'expliquer par les faibles différences de la tension d'essai), et les modifications éventuelles entre les enregistrements successifs sont progressives et peu importantes, en conformité avec le bon fonctionnement de l'élément non linéaire.

NOTE De plus amples informations sont données dans l'IEC 60076-4.

En cas d'effondrement ou d'écart de tension, et si le constructeur et l'acheteur conviennent du non échec immédiat de l'essai, la séquence d'essai doit être achevée, et la séquence d'essai complète doit alors être répétée en appliquant le choc de référence d'origine. L'essai échoue lorsque tout effondrement ou écart de tension supplémentaire est observé.

Les observations supplémentaires au cours de l'essai (sans anormaux, etc.) peuvent permettre de confirmer l'interprétation des enregistrements, mais ne constituent pas une preuve en soi.

13.3 Essai au choc de foudre en onde coupée (LIC)

13.3.1 Forme d'onde

La forme d'onde des chocs en onde pleine doit être telle qu'indiquée en 13.2.1. Le choc de foudre en onde coupée doit avoir une durée jusqu'à la coupure comprise entre 3 μ s et 6 μ s. La durée par rapport à la première tension nulle après la coupure effective doit être la plus courte possible. L'essai doit être effectué sans impédance complémentaire et intentionnelle dans le circuit de coupure, mais si l'oscillation observée au cours de l'application de tension réduite est supérieure à 30 %, l'impédance minimale requise pour porter cette oscillation en dessous de 30 % peut alors être ajoutée au circuit de coupure.

Un accord peut accepter une durée jusqu'à la coupure comprise entre 2 μ s et 3 μ s, sous réserve de l'obtention de la valeur de crête de l'onde de choc de foudre avant la coupure.

NOTE Les transformateurs sont normalement conçus pour résister à une oscillation par rapport à la polarité opposée de 30 % de l'amplitude du choc de foudre en onde coupée. Lorsque le transformateur doit être soumis à l'essai par un tiers l'oscillation sera limitée à cette valeur.

Habituellement, les mêmes réglages du générateur de choc et le même dispositif de mesure sont utilisés en ajoutant seulement le dispositif éclateur.

Des échelles de temps différentes peuvent être mises en œuvre pour enregistrer les chocs de foudre en onde coupée.

Il est recommandé d'utiliser un éclateur piloté à amorçage réglable, mais il est également permis d'utiliser un simple éclateur tige-tige.

La valeur de crête du choc de foudre en onde coupée doit être telle qu'indiquée dans le Tableau 2.

13.3.2 Essais sur les transformateurs sans éléments non linéaires

13.3.2.1 Séquence d'essai

L'essai est combiné avec l'essai au choc en onde pleine en une séquence unique. Sauf spécification contraire, l'ordre des différentes applications de choc doit être le suivant:

- a) un choc de référence en onde pleine à une tension comprise entre 50 % et 70 % de la tension d'essai au choc de foudre en onde pleine;
- b) un choc en onde pleine à la tension d'essai au choc de foudre en onde pleine;
- c) deux chocs en onde coupée à la tension d'essai au choc de foudre en onde coupée;
- d) deux chocs en onde pleine à la tension d'essai au choc de foudre en onde pleine.

Les voies de mesure et les enregistrements oscillographiques sont du même type que ceux spécifiés pour l'essai au choc en onde pleine.

NOTE Des chocs supplémentaires (en onde pleine ou coupée) à des amplitudes ne dépassant pas le niveau de la tension de choc de référence peuvent être appliqués, mais il n'est pas nécessaire de les faire figurer dans le rapport d'essai.

Si, au cours d'une de ces applications, un claquage extérieur se produit dans le circuit ou le long d'un éclateur de traversée, ou si l'enregistrement échoue sur l'une des voies de mesure spécifiées, il ne doit pas être tenu compte de cette application et il doit être procédé à une nouvelle application.

La même durée jusqu'à la coupure doit, dans toute la mesure du possible, être utilisée pour tous les chocs de foudre en onde coupée dans la séquence.

13.3.2.2 Critères d'essai

L'essai est satisfaisant s'il n'y a pas de différences importantes entre les transitoires de tension et de courant enregistrés sur la base du choc maximal à niveau réduit de référence et les transitoires de même nature enregistrés à la pleine tension d'essai, y compris les chocs en onde coupée jusqu'à la durée de coupure effective. Dans le cas des chocs en onde coupée, les différences ultérieures à la durée de coupure peuvent avoir pour origine les variations peu importantes des performances et de la synchronisation de l'éclateur.

NOTE L'interprétation détaillée des enregistrements d'essai et la distinction entre les différences marginales et les différences indicatrices d'un défaut requièrent un niveau de compétence et d'expérience important. De plus amples informations sont données dans l'IEC 60076-4.

En cas d'effondrement ou d'écart de tension, et si le constructeur et l'acheteur conviennent du non échec immédiat de l'essai, la séquence d'essai doit être achevée, et la séquence d'essai complète doit alors être répétée en appliquant le choc de référence d'origine. L'essai échoue lorsque tout effondrement ou écart de tension supplémentaire est observé.

Les observations supplémentaires au cours de l'essai (sans anormaux, etc.) peuvent permettre de confirmer l'interprétation des enregistrements, mais ne constituent pas une preuve en soi.

13.3.3 Essais sur les transformateurs avec éléments non linéaires

13.3.3.1 Séquence d'essai

L'essai est combiné avec l'essai au choc en onde pleine en une séquence unique.

Lorsque des éléments non linéaires ou des parafoudres sont intégrés au transformateur afin de limiter les transitoires de surtension transmis, ils peuvent intervenir au cours de la méthode d'essai, et ceci peut générer des différences entre les enregistrements de choc effectués aux différentes tensions. Il existe une tension de seuil à laquelle les différences générées par les

éléments non linéaires commencent à apparaître, et la séquence d'essai doit comporter au moins un enregistrement en dessous de ce seuil.

La séquence d'essai doit comprendre:

- a) un choc de référence en onde pleine à une tension comprise entre 50 % et 60 % de la tension d'essai au choc de foudre en onde pleine;
- b) un choc de référence en onde pleine à une tension comprise entre 60 % et 75 % de la tension d'essai au choc de foudre en onde pleine;
- c) un choc de référence en onde pleine à une tension comprise entre 75 % et 90 % de la tension d'essai au choc de foudre en onde pleine;
- d) un choc en onde pleine à la tension d'essai au choc de foudre en onde pleine;
- e) deux chocs en onde coupée à la tension d'essai au choc de foudre en onde coupée;
- f) deux chocs en onde pleine à la tension d'essai au choc de foudre en onde pleine;
- g) un choc de comparaison à une tension la plus proche possible de la tension spécifiée en c) ci-dessus;
- h) un choc de comparaison à une tension la plus proche possible de la tension spécifiée en b) ci-dessus;
- i) un choc de comparaison à une tension la plus proche possible de la tension spécifiée en a) ci-dessus.

Les tensions de choc de référence doivent être différentes l'une de l'autre d'au moins 10 % (du niveau de 100 %).

Si aucun des enregistrements en onde pleine à 100 % ne diffère de la tension la plus basse de l'enregistrement de choc de référence, les chocs g), h) et i) ci-dessus peuvent alors être omis.

L'intervalle de temps entre l'application de la dernière onde coupée et la première onde pleine après les ondes coupées doit être le plus court possible.

NOTE Des chocs supplémentaires (en onde pleine ou coupée) à des amplitudes ne dépassant pas 75 % du niveau maximum peuvent être appliqués, mais il n'est pas nécessaire de les faire figurer dans le rapport d'essai.

Si, au cours d'une de ces applications, un claquage extérieur se produit dans le circuit ou le long d'un éclateur de traversée, ou si l'enregistrement échoue sur l'une des voies de mesure spécifiées, il ne doit pas être tenu compte de cette application et il doit être procédé à une nouvelle application.

Les voies de mesure et les enregistrements oscillographiques sont du même type que ceux spécifiés pour l'essai au choc en onde pleine.

La même durée jusqu'à la coupure doit, dans toute la mesure du possible, être utilisée pour tous les chocs de foudre en onde coupée dans la séquence.

13.3.3.2 Critères d'essai

L'essai est satisfaisant s'il n'y a pas de différences importantes entre les courbes de tension et de courant enregistrés sur la base du choc de référence à la tension la plus basse et les courbes de même nature enregistrés à la pleine tension d'essai, y compris les chocs en onde coupée jusqu'à la durée de coupure effective. Dans le cas des chocs en onde coupée, les différences ultérieures à la durée de coupure peuvent avoir pour origine les variations peu importantes des performances et de la synchronisation de l'éclateur.

Si tel n'est pas le cas, les enregistrements du courant et de la tension issus des chocs suivants doivent alors être comparés:

- a) et i);

- b) et h);
- c) et g);
- tous les enregistrements de chocs à un niveau de 100 %;
- les deux enregistrements en onde coupée jusqu'à la durée de coupure effective.

L'essai est satisfaisant en l'absence de différence significative entre les enregistrements comparés (au-delà de la différence qui peut raisonnablement s'expliquer par les faibles différences de la tension d'essai), et il convient que les modifications éventuelles entre les enregistrements successifs soient progressives et peu importantes, en conformité avec le bon fonctionnement de l'élément non linéaire.

NOTE 1 De plus amples informations sont données dans l'IEC 60076-4.

En cas d'effondrement ou d'écart de tension, et si le constructeur et l'acheteur conviennent du non échec immédiat de l'essai, la séquence d'essai doit être achevée, et la séquence d'essai complète doit alors être répétée en appliquant le choc de référence d'origine. L'essai échoue lorsque tout effondrement ou écart de tension supplémentaire est observé.

Les observations supplémentaires au cours de l'essai (sons anormaux, etc.) peuvent permettre de confirmer l'interprétation des enregistrements, mais ne constituent pas une preuve en soi.

NOTE 2 Les informations fournies dans l'IEC 60076-4 avec référence à l'évaluation de la forme d'onde sont basées sur l'observation visuelle des enregistrements oscillographiques. Dans certains cas, il peut être approprié d'évaluer les paramètres des formes d'onde non normalisées et d'interpréter les écarts manuellement plutôt que de se fier entièrement aux outils informatiques.

13.4 Essai au choc de foudre sur une borne neutre (LIN)

13.4.1 Généralités

Les chocs de foudre en onde pleine au niveau de tension de choc spécifié pour l'extrémité neutre sont appliqués directement sur cette dernière avec toutes les autres bornes mises à la terre.

13.4.2 Forme d'onde

La forme d'onde des chocs en onde pleine doit être telle qu'indiquée en 13.2.1, à l'exception de la durée du front qui peut atteindre 13 μ s au maximum.

13.4.3 Séquence d'essai

Elle doit être telle qu'indiquée en 13.2.2.1 pour les transformateurs sans élément non linéaire et en 13.2.3.1 pour les transformateurs avec élément non linéaire.

13.4.4 Critères d'essai

Ils doivent être tels qu'indiqués en 13.2.2.2 pour les transformateurs sans élément non linéaire et en 13.2.3.2 pour les transformateurs avec élément non linéaire.

14 Essai au choc de manœuvre (SI)

14.1 Généralités

Pendant les essais au choc de manœuvre, les tensions développées le long des différents enroulements sont approximativement proportionnelles au rapport des nombres de spires.

La tension d'essai au choc de manœuvre doit être celle spécifiée pour l'enroulement avec la valeur U_m la plus élevée. Si le rapport entre les enroulements est modifiable à l'aide de prises, ces dernières doivent être utilisées pour porter la tension d'essai de l'enroulement ayant une

valeur de U_m inférieure, à une valeur aussi proche que possible de la valeur d'essai correspondante donnée dans le Tableau 2. Les enroulements avec des valeurs U_m inférieures peuvent ne pas être soumis à leur pleine tension d'essai; ceci doit être admis. Lorsque les enroulements à plus basse tension n'ont pas un niveau de choc de manœuvre indiqué dans le Tableau 2, le constructeur peut alors choisir la position des prises pour essai sauf spécification contraire de l'acheteur.

Dans un transformateur triphasé, la tension développée pendant l'essai entre les bornes de ligne doit être égale à environ 1,5 fois la tension entre l'extrémité de ligne et l'extrémité de neutre.

14.2 Connexions d'essai

Les chocs sont appliqués soit directement à partir de la source de tension de choc à une borne de ligne de l'enroulement à tension la plus élevée, soit à un enroulement à plus basse tension, pour que la tension d'essai soit transmise inductivement à l'enroulement à tension la plus élevée. La tension d'essai spécifiée doit apparaître entre la borne de ligne de l'enroulement à tension la plus élevée et la terre. La tension doit être mesurée à la borne de ligne de l'enroulement à tension la plus élevée.

Un transformateur triphasé doit être soumis à l'essai phase par phase.

Les enroulements à couplage en étoile à neutre sorti doivent être mis à la terre à leur extrémité neutre, soit directement soit à travers une faible impédance telle qu'un shunt de mesure de courant. Une tension de polarité opposée et avec une amplitude réduite de moitié environ apparaît sur les deux bornes de ligne restantes qui peuvent être reliées ensemble, mais non reliées à la terre. Pour limiter la tension de polarité opposée à environ 50 % du niveau appliqué, il est admissible de relier des résistances d'amortissement de valeur élevée (5 k Ω à 20 k Ω) à la terre au niveau des bornes de phase non soumises à l'essai.

Pour les enroulements à couplage en triangle, la borne correspondant à l'autre extrémité de la phase en essai doit être mise à la terre directement ou par l'intermédiaire d'une faible impédance de mesure, et les autres bornes doivent être laissées non connectées. Les essais effectués sur un transformateur triphasé doivent être réalisés de manière à assurer la mise à la terre d'une borne différente de l'enroulement couplé en triangle pour chaque essai de phase. Les enroulements couplés en triangle, dont plus de trois bornes sont sorties, doivent avoir le triangle fermé pour l'essai.

Dans le cas d'un transformateur monophasé dont les deux extrémités d'un ou plusieurs enroulements sont connectées à une ligne en service, et pour lequel un essai au choc de manœuvre est spécifié, ce même essai doit être alors appliqué aux deux extrémités de l'enroulement.

Dans le cas d'un enroulement à couplage en étoile comportant une connexion neutre non sortie et non reliée à la terre de manière interne, il n'est pas toujours possible d'obtenir les tensions d'essai appropriées par une mise à la terre d'une ou de plusieurs bornes de ligne. Dans ce cas, la connexion d'essai doit faire l'objet d'un accord entre le constructeur et l'acheteur.

Les éclateurs de traversée peuvent être enlevés ou leur écartement augmenté pour éviter un amorçage pendant l'essai.

14.3 Forme d'onde

La tension d'essai est normalement de polarité négative pour réduire le risque d'un claquage extérieur aléatoire dans le circuit d'essai.

La surtension doit avoir un temps nécessaire pour atteindre la valeur de crête (T_p tel que défini dans l'IEC 60060-1) d'au moins 100 μ s, un temps supérieur à 90 % (T_d tel que défini dans

l'IEC 60060-1) de l'amplitude spécifiée d'au moins 200 μs , et un temps pour atteindre la valeur nulle (T_z tel que défini dans l'IEC 60060-1) de 1 000 μs au minimum.

NOTE 1 La forme de l'onde de surtension diffère intentionnellement de la forme d'onde normalisée de 250 / 2 500 μs recommandée dans l'IEC 60060-1, étant donné que cette norme est destinée aux équipements ne comportant pas de circuit magnétique saturable. Le temps nécessaire pour atteindre la valeur de crête est choisi comme suffisamment long pour obtenir une répartition de la tension essentiellement linéaire le long de l'enroulement.

Le temps pour atteindre la valeur nulle peut être augmenté en induisant un flux rémanent dans le circuit magnétique de sens opposé à celui induit pendant l'essai avant chaque essai à pleine tension. Ceci est normalement réalisé par l'application de surtension de forme similaire, mais de polarité opposée, à une tension ne dépassant pas 70 % du niveau d'essai maximal, mais d'autres méthodes peuvent toutefois être utilisées. Un temps pour atteindre la valeur nulle inférieur à 1 000 μs est admissible si, dans la mesure où la pratique le permet, une saturation maximale inverse du circuit magnétique est atteinte.

NOTE 2 Pendant l'essai, un flux important est développé dans le circuit magnétique. La surtension peut être maintenue jusqu'à ce que le circuit magnétique atteigne la saturation et que l'impédance magnétisante du transformateur soit considérablement réduite.

Pour les objets en essai sans circuit magnétique ou avec un type de circuit à entrefer, un temps pour atteindre la valeur nulle inférieure à 1 000 μs est admissible. Voir l'IEC 60076-4.

14.4 Séquence d'essai

La séquence d'essai doit comporter une surtension de référence à une tension comprise entre 50 % et 70 % de la pleine tension d'essai, et trois surtensions à la pleine tension. Un nombre suffisant d'applications à polarité inverse doit être effectué avant chaque surtension à pleine tension, afin de s'assurer que la magnétisation du circuit est similaire préalablement à chaque surtension en onde pleine, de sorte que le temps pour atteindre la première valeur nulle soit le plus uniforme possible.

NOTE Si le circuit magnétique ne sature pas lors des applications en pleine tension, les applications à polarité inverse peuvent alors ne pas être requises.

Des enregistrements oscillographiques de la forme d'onde de la surtension à la borne de ligne en essai et du courant entre l'enroulement en essai et la terre doivent être effectués. Si, au cours d'une de ces applications, un claquage extérieur se produit dans le circuit ou le long d'un éclateur de traversée, ou si l'enregistrement échoue sur l'une des voies de mesure spécifiées, il ne doit pas être tenu compte de cette application et il doit être procédé à une nouvelle application.

14.5 Critères d'essai

L'essai est satisfaisant s'il ne se produit pas d'effondrement brusque de la tension ou de discontinuité de la tension ou du courant indiquée sur les enregistrements oscillographiques.

Les observations supplémentaires au cours de l'essai (sons anormaux, etc.) peuvent permettre de confirmer les enregistrements oscillographiques, mais ne constituent pas une preuve en soi.

NOTE Des oscillogrammes successifs peuvent être différents du fait de l'influence de la saturation magnétique sur la durée des chocs.

15 Mesure prise suite à un défaut en essais

Lorsque le transformateur ne satisfait pas à l'un des essais diélectriques, la séquence d'essais diélectriques complète doit alors être répétée au niveau maximal après réparation. Toutefois dans les cas où il apparaît clairement que certaines pièces du transformateur ayant été soumises à l'ensemble des essais ne sont pas concernées par la défaillance ou la réparation, il peut alors ne pas être nécessaire de soumettre celles-ci à un nouvel essai, au choix de l'acheteur. Il est nécessaire de tenir tout particulièrement compte de la possibilité d'une

contamination ou d'un endommagement des autres pièces du transformateur par les transitoires internes.

Lorsqu'un transformateur ne satisfait pas à ses exigences d'essai et si l'anomalie relève de la traversée, et sous réserve que l'acheteur puisse constater que le transformateur n'est en aucune manière altéré par cette défaillance, il est admis de remplacer cette traversée et de poursuivre sans plus attendre l'essai sur le transformateur jusqu'à son achèvement.

Lorsqu'un essai n'est pas satisfait du fait d'un claquage externe au transformateur, l'essai concerné peut alors être répété et, s'il est satisfait, la séquence d'essai peut être achevée, et il n'est pas nécessaire de répéter les essais précédemment satisfaits.

16 Distances d'isolement dans l'air

16.1 Généralités

La présente partie de la norme s'applique lorsque l'acheteur ne spécifie pas les distances d'isolement dans l'air. Lorsque ces distances sont spécifiées, le constructeur peut utiliser des valeurs plus élevées si les essais le requièrent.

La distance d'isolement dans l'air est définie comme la distance la plus courte entre une partie métallique de l'extrémité de la traversée et une partie du transformateur, en considérant une droite qui ne traverse pas l'isolateur de la traversée.

La présente norme ne s'applique pas à la distance d'isolement entre les parties de la traversée elle-même et il est possible que la longueur de la traversée doive être supérieure aux distances d'isolement indiquées afin de satisfaire aux essais à effectuer sur la traversée.

La présente norme ne prend pas en compte le risque de pénétration d'oiseaux et d'autres animaux.

Les chiffres des distances d'isolement entre les bornes de ligne et la terre indiqués dans la présente norme sont basés sur ceux indiqués dans l'IEC 60071-1 pour une configuration d'électrodes pointe-structure pour un niveau de choc de foudre < 850 kV et la distance d'isolement conducteur-structure pour des niveaux de choc de foudre plus élevés. La distance d'isolement la plus élevée déterminée par un choc de manœuvre ou de foudre est appliquée. Les distances d'isolement entre phases sont basées sur celles indiquées dans l'IEC 60071-1 pour une structure d'électrodes conducteur-conducteur, basée sur le niveau de choc de manœuvre en considérant une valeur entre phases divisée par 1,5 entre phase et terre. Il est par conséquent supposé qu'à un niveau de choc de foudre ≥ 850 kV, les extrémités des traversées et les connexions éventuelles ont normalement une forme d'électrode arrondie.

On suppose que les pièces de fixation des conducteurs et les écrans de répartition de tension qui y sont associés ont une forme telle qu'ils ne réduisent pas la tension d'amorçage. On suppose également que la disposition des arrivées des conducteurs ne réduit pas les distances d'isolement effectives générées par le transformateur lui-même. La conception doit prévoir la connexion de conducteurs adaptés aux bornes de traversée qui s'éloignent du transformateur sans obérer les distances d'isolement indiquées dans le présent document.

Lorsque l'acheteur envisage de réaliser le raccordement de telle sorte que les distances d'isollements effectives risquent d'être réduites, ceci doit être indiqué dans l'appel d'offres.

En général, la disposition de distances d'isolement dans l'air adéquates devient techniquement difficile principalement pour les réseaux à haute tension, en particulier pour les unités relativement petites, ou lorsque l'espace d'installation est restreint. Le principe suivi dans la présente norme consiste à proposer des distances d'isolement minimales non critiques qui sont suffisantes, sans autre discussion ni justification, dans des conditions différentes de

réseau et de climat. D'autres distances d'isolement basées sur une pratique passée ou présente doivent faire l'objet d'un accord entre l'acheteur et le constructeur.

Les distances d'isolement recommandées se réfèrent aux tensions de tenue assignées de l'isolation interne du transformateur, sauf spécification contraire dans l'appel d'offre et lors de la commande. Lorsque les distances d'isolement du transformateur sont égales ou supérieures aux valeurs spécifiées dans la présente norme et que les grandeurs assignées associées aux traversées ont été correctement choisies selon l'IEC 60137, l'isolation externe du transformateur doit alors être considérée comme satisfaisante sans essai complémentaire.

NOTE 1 La tenue aux ondes de choc de l'isolation externe dépend de la polarité, contrairement à ce qui est admis pour l'isolation interne. Les essais spécifiés pour l'isolation interne du transformateur ne permettent pas de vérifier automatiquement que l'isolation externe est satisfaisante. Les distances d'isolement recommandées sont dimensionnées pour la polarité la plus contraignante (positive).

NOTE 2 Il est admis que dans certains pays, les distances d'isolement peuvent être différentes si elles sont fondées sur les valeurs de tension de tenue en LI et en AC uniquement.

NOTE 3 Si une distance d'isolement inférieure à celle conforme à l'alinéa ci-dessus doit être appliquée, un essai de type faisant appel aux méthodes générales indiquées aux Articles 10 à 14 de la présente norme, qui utilisent les tensions d'essai applicables au transformateur, ou recourant aux essais spécifiés dans une autre norme (par exemple IEC 62271-1) qui sont applicables au matériel de poste connecté, peut devoir être effectué sur un dispositif de simulation de la distance d'isolement réelle.

Si le transformateur est spécifié pour être mis en service à une altitude supérieure à 1 000 m, les exigences des distances d'isolement doivent être augmentées de 1 % tous les 100 m au-delà de 1 000 m.

Les exigences s'appliquent pour les distances d'isolement suivantes:

- distance d'isolement phase-terre et phase-neutre;
- distance d'isolement entre phases d'un même enroulement;
- distance d'isolement entre une borne de ligne de l'enroulement haute tension et une borne de ligne d'un enroulement à tension inférieure (voir 16.2).

De ce qui précède, il s'ensuit que les valeurs recommandées sont en fait des valeurs minimales. Les distances d'isolement définies lors de la conception doivent être précisées sur le plan d'encombrement. Ce sont des valeurs nominales auxquelles s'appliquent les tolérances normales de fabrication et elles doivent être choisies pour que les distances d'isolement réelles soient au moins égales à celles spécifiées.

Ces spécifications doivent permettre de démontrer que le transformateur est conforme aux recommandations de la présente norme, ou aux valeurs modifiées qui peuvent avoir fait l'objet d'un accord pour un contrat particulier.

16.2 Exigences concernant les distances d'isolement

Ces exigences sont données dans le Tableau 4 pour chaque valeur des tensions de choc de foudre et de manœuvre, et ce, pour chaque valeur de U_m .

La distance d'isolement entre phases s'applique uniquement entre les bornes de ligne du même enroulement, et la distance d'isolement phase-terre s'applique à toutes les autres distances, y compris par rapport aux bornes de ligne des autres enroulements et aux bornes neutres.

Tableau 4 – Distances minimales d'isolement dans l'air (1 de 2)

Tension la plus élevée pour le matériel U_m kV	Choc de foudre en onde pleine (LI) kV	Choc de manœuvre (SI) kV	Distance minimale d'isolement dans l'air	
			Phase – terre mm	Entre phases mm
<1,1	-	-		
3,6	20	-	60	60
	40	-	60	60
7,2	60	-	90	90
	75 ^a	-	120	120
12	75	-	120	120
	95	-	160	160
	110 ^a	-	200 ^a	200 ^a
17,5	95	-	160	160
	125 ^a	-	220	220
24	125	-	220	220
	145	-	270	270
	150 ^a	-	280 ^a	280 ^a
36	170	-	320	320
	200 ^a	-	380	380
52	250	-	480	480
72,5	325	-	630	630
	350 ^a	-	630	630
100	450	375 ^a	900	900
123	550	460 ^a	1 100	1 100
145	550	460 ^a	1 100	1 100
	650	540 ^a	1 300	1 500 ^a
170	650	540 ^a	1 300	1 500 ^a
	750	620 ^a	1 500	1 700 ^a
245	850	700 ^a	1 600	2 100 ^a
	950	750 ^a	1 700	2 300
	1 050	850 ^a	1 900	2 600
300	950	750	1 700	2 300
	1 050	850	1 900	2 600
362	1 050	850	1 900	2 600
	1 175	950	2 200	3 100
420	1 175	950	2 200	3 100
	1 300	1 050	2 600	3 600
	1 425	1 175 ^a	3 100	4 200

Tableau 4 (2 de 2)

Tension la plus élevée pour le matériel U_m kV	Choc de foudre en onde pleine (LI) kV	Choc de manœuvre (SI) kV	Distance minimale d'isolement dans l'air	
			Phase – terre mm	Entre phases mm
550	1 300	1 050	2 600	3 600
	1 425	1 175	3 100	4 200
	1 550	1 300 ^a	3 600	5 000 ^a
	1 675 ^a	1 390 ^a	4 000 ^a	5 600 ^a
800	1 800	1 425	4 200	5 800 ^a
	1 950	1 550	4 900	6 700 ^a
	2 050 ^a	1 700 ^a	5 800 ^a	7 900 ^a
	2 100	1 675 ^a	5 600	7 700 ^a
1 100	1 950	1 425	^b	^b
	2 250	1 800	6 300	^c
1 200	2 250	1 800	6 300	^c

^a Ces valeurs ne figurent pas dans l'IEC 60071-1:2011 pour la valeur de U_m considérée, mais sont toutefois incluses dans la mesure où elles représentent soit la pratique courante dans certaines régions du monde, soit pour certains niveaux de choc de manœuvre et certaines distances d'isolement, une valeur coordonnée à la valeur particulière du niveau de choc de foudre.

^b Aucune valeur de distance d'isolement n'est spécifiée pour cette valeur du niveau d'isolement assigné, dans la mesure où elle ne s'applique pas à l'isolement dans l'air selon l'IEC 60071-1.

^c Aucune valeur de distance d'isolement entre phases n'est spécifiée, étant donné que les transformateurs auxquels est associée cette valeur de niveau d'isolement assigné sont habituellement monophasés.

Annexe A (informative)

Guide d'application pour les mesures de décharges partielles sur les transformateurs

A.1 Généralités

La présente annexe s'applique tout particulièrement à la mesure des décharges partielles réalisée lors d'un essai de tension induite avec mesure de décharges partielles (IVPD) selon 11.3, mais elle peut être appliquée aux autres mesures de décharges partielles réalisées.

Une décharge partielle (DP) est une décharge électrique qui ne court-circuite que partiellement l'isolation sous contrainte électrique. Dans un transformateur, une telle décharge partielle provoque une variation brusque de la tension par rapport à la terre à chaque borne d'enroulement accessible de l'extérieur.

Les impédances de mesure sont connectées effectivement entre la cuve mise à la terre et les bornes, habituellement à travers la capacité d'une prise de traversée ou à travers un condensateur de liaison distinct, comme détaillé en A.2.

La charge réellement mise en jeu à l'endroit d'une décharge partielle ne peut être mesurée directement, en revanche, la charge apparente q telle que définie dans l'IEC 60270 est mesurée à la borne, comme déterminé par un étalonnage adapté, voir A.2.

Une décharge partielle particulière génère différentes valeurs de la charge apparente à différentes bornes du transformateur. La comparaison des indications recueillies simultanément à différentes bornes peut donner des informations sur la localisation de la source de décharge partielle à l'intérieur du transformateur, voir A.5.

Le mode opératoire de l'essai de réception spécifié en 11.3 impose la mesure de la charge apparente aux bornes de ligne de l'enroulement.

A.2 Connexion des circuits de mesure et d'étalonnage – Méthode d'étalonnage

La technique et le matériel de mesure sont décrits dans l'IEC 60270.

Le principe de mesure consiste à déterminer la variation de tension à la borne provoquée par l'injection d'un volume de charge étalonné. La variation de tension est mesurée à l'aide d'une capacité de liaison en série (habituellement une traversée à condensateur) et d'une impédance de mesure. L'impédance de mesure du dispositif normal pour les essais de transformateur doit être connectée directement à la prise de traversée d'essai.

Le matériel de mesure peut être relié à l'impédance de mesure par un câble coaxial adapté. L'impédance du câble et l'impédance d'entrée adaptée de l'instrument de mesure peuvent faire partie intégrante de l'impédance de mesure. Certains systèmes utilisent un câble à fibres optiques entre l'impédance de mesure et le matériel d'enregistrement. L'impédance de mesure, le câble et l'instrument de mesure sont normalement fournis ensemble, de manière à optimiser les performances globales du système de mesure.

Pendant la mesure des décharges partielles entre une borne de ligne d'un enroulement et la cuve mise à la terre, la disposition normale consiste à installer l'impédance de mesure Z_m entre la prise capacitive de traversée d'essai et la collerette mise à la terre, voir Figure A.1. En l'absence de prise d'essai, il est également possible d'isoler de la cuve la bride de la traversée et de l'utiliser comme borne de mesure.

Les capacités situées entre le conducteur central et la borne de mesure d'une part, et entre cette dernière et la terre d'autre part, agissent comme un diviseur capacitif de tensions p pour le signal dû aux décharges partielles. L'étalonnage est par conséquent réalisé entre la borne supérieure de la traversée et la terre. Il convient de relier la plus grande partie possible du circuit d'essai hors tension à la borne pendant l'étalonnage, afin de tenir compte de la capacité supplémentaire et des circuits de filtrage éventuels.

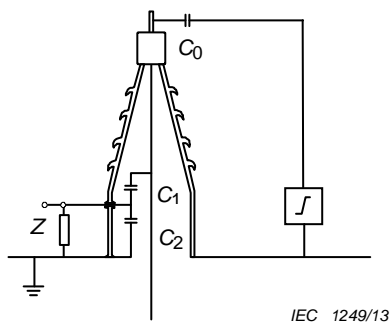


Figure A.1 – Circuit d'étalonnage pour la mesure des décharges partielles utilisant la prise d'essai d'une traversée à condensateur

Lorsqu'il est nécessaire d'effectuer les mesures DP à une borne ne comportant pas de prise d'essai de traversée ou de collerette isolée, un condensateur de liaison haute tension distinct est alors utilisé. Un condensateur exempt de décharges partielles est exigé et il convient que la valeur de sa capacité C soit suffisamment grande comparée à la capacité d'injection C_0 du générateur d'étalonnage (voir IEC 60270 pour des exigences spécifiques). L'impédance de mesure (avec un éclateur de protection) est connectée entre la borne basse tension du condensateur et la terre, voir Figure A.2.

L'étalonnage du système de mesure complet est effectué par injection d'une charge connue dans la borne du transformateur. Selon l'IEC 60270, un générateur d'étalonnage est constitué d'un générateur d'échelon de tension à faible temps de montée et d'un petit condensateur série de capacité connue C_0 . Il convient que la capacité C_0 soit faible comparée à C_1 (voir IEC 60270 pour les exigences spécifiques concernant le temps de montée et le choix de C_0). Lorsque ce générateur est relié entre la borne du transformateur et la terre, la charge injectée par le générateur d'impulsions sera:

$$q_0 = U_0 \times C_0$$

où

q_0 est la charge apparente d'étalonnage

U_0 est l'échelon de tension choisi pour produire la valeur requise q_0

C_0 est la valeur de la capacité en série

Il convient que le niveau d'étalonnage q_0 soit représentatif de la limite du niveau de décharge spécifiée (habituellement entre 50 % et 200 %). Des mesures supplémentaires qui utilisent le générateur étalon à des valeurs différentes de q_0 peuvent être utilisées pour vérifier le fonctionnement de l'instrument de mesure.

Il est préférable que la fréquence de répétition du générateur d'étalonnage soit synchronisée sur la fréquence industrielle, de manière à pouvoir observer l'impulsion résultante sur un instrument également synchronisé sur la fréquence industrielle.

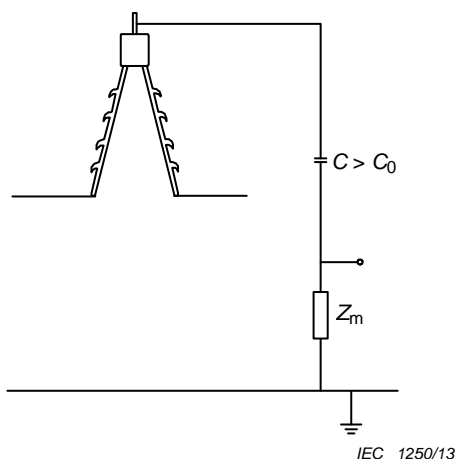


Figure A.2 – Circuit pour mesure des décharges partielles utilisant un condensateur de liaison haute tension

Pour éviter les erreurs, il convient que les câbles entre la borne et le générateur étalon, et entre ce dernier et la terre (au niveau de la collerette de traversée) soient aussi courts que possible. Il convient de préférence que le générateur d'impulsions d'étalonnage fonctionne sur batterie et que ses dimensions physiques soient réduites pour pouvoir l'utiliser facilement aux bornes du transformateur.

Cette méthode d'étalonnage prévoit la mesure de la charge apparente à la borne, ce qui constitue la base de la présente norme, mais elle ne fournit pas la valeur réelle d'une décharge partielle se produisant à distance de la borne, dans la mesure où l'étalonnage n'inclut pas la voie de transmission entre la décharge et la borne.

A.3 Instruments, gamme de fréquences

Il convient que les caractéristiques des instruments de mesure soient telles que spécifiées dans l'IEC 60270.

Un affichage graphique de toute décharge partielle détectée est généralement utile, en particulier parce qu'il permet de faire la distinction entre les décharges partielles réelles dans le transformateur et certaines formes de perturbations extérieures. Ceci dépend de la fréquence de répétition, de la position sur l'onde de tension, des différences de polarité, etc.

Il convient d'observer le niveau de décharges partielles de façon continue ou à des intervalles réguliers pendant toute la durée de l'essai. Un enregistrement continu du signal n'est pas obligatoire.

Les systèmes de mesure des décharges partielles sont classés en systèmes à bande étroite ou à large bande. Un système à bande étroite fonctionne à une largeur de bande d'environ 10 kHz ou moins, avec une certaine fréquence ajustable (par exemple, les mesureurs de perturbations radiophoniques). Un système à large bande utilise un assez grand rapport entre les limites supérieure et inférieure de la bande de fréquences, par exemple, 50 kHz à 800 kHz.

Avec un système à bande étroite, il est possible d'éviter, par un réglage adapté de la fréquence centrale, les signaux parasites provenant d'émetteurs radio locaux, mais il est nécessaire de vérifier que les résonances d'enroulement voisines de la fréquence de mesure ne modifient pas trop sensiblement la mesure. Il convient que l'instrument à bande étroite utilise une fréquence maximale de 500 kHz, et de préférence inférieure à 300 kHz. Il y a deux raisons à cela.

La première est que la transmission des impulsions dues aux décharges se fait avec une atténuation importante des composants à fréquences les plus élevées; la deuxième est que, lorsqu'on applique une impulsion d'étalonnage à la borne de ligne, cette impulsion est susceptible de provoquer des oscillations locales à cette borne et à son voisinage, ce qui complique l'étalonnage pour des fréquences centrales supérieures à 500 kHz.

Un système de mesure à large bande est moins critique en ce qui concerne l'atténuation et la réponse aux différentes formes d'impulsions mais il est plus sensible aux perturbations sur des sites d'essai dépourvus d'écran électromagnétique. Des filtres coupe-bande ou d'autres types de filtres peuvent être utilisés pour réduire les perturbations de sources d'influence externes telles que des émetteurs radio.

Le choix de la largeur de bande de mesure n'affecte pas la signature des décharges partielles et le comportement statistique de la décharge pouvant être utilisé pour identifier la source de décharge.

Pour résumer, un système de mesure à large bande constitue le premier choix préférentiel dans la mesure où sa capacité de détection d'une décharge partielle est plus grande, et il convient par ailleurs que la largeur de bande ne soit pas inférieure à 100 kHz. Un système à bande étroite peut être requis dans certains cas pour éliminer les perturbations. Il convient d'accorder une attention toute particulière au choix de la fréquence centrale de mesure afin d'assurer une sensibilité raisonnable aux décharges partielles dans le transformateur.

A.4 Procédure après un essai non satisfaisant

Les critères d'acceptation du niveau de décharges partielles sont spécifiés en 11.3.5. En l'absence d'effondrement de tension, mais en cas de non satisfaction effective de l'essai en raison d'un niveau de décharges partielles au-dessus des critères d'acceptation, l'essai doit alors être considéré au départ comme un essai non destructif. Il convient également de ne pas rejeter immédiatement l'objet en essai suite à ce résultat, mais d'effectuer en revanche des recherches supplémentaires afin d'identifier et localiser la source des décharges partielles.

Un autre point important à prendre en considération consiste à déterminer si les décharges partielles corrélées aux phases sont maintenues en dessous du niveau de la tension de service, lorsqu'elles sont déclenchées au niveau d'essai, étant donné qu'il est très vraisemblable que ces décharges partielles portent atteinte au transformateur en service.

Il convient de commencer par des recherches relatives à l'environnement d'essai pour découvrir des preuves de l'existence éventuelle de sources de décharges partielles parasites. Il convient ensuite qu'il y ait un échange de vues entre le constructeur et l'acheteur pour rechercher un accord sur des essais complémentaires ou sur toute autre procédure permettant de démontrer soit la présence d'une décharge partielle importante, soit que le transformateur est capable d'assurer un service satisfaisant.

On trouvera ci-dessous quelques suggestions qui peuvent être utiles lors des différentes phases des opérations décrites ci-dessus.

- Rechercher s'il existe de véritables corrélations entre les mesures et la séquence d'essai ou si ces mesures représentent simplement des sources coïncidentes non pertinentes. Ceci est souvent facilité par une surveillance ou un enregistrement oscillographique de la configuration des décharges partielles; des perturbations externes peuvent, par exemple, être détectées si elles ne sont pas synchrones de la tension d'essai.
- Rechercher si la décharge partielle peut provenir de la source d'alimentation. Dans ce cas, il peut être utile de placer des filtres passe-bas sur les connexions d'alimentation du transformateur en essai.
- Rechercher si la source de décharge partielle se situe à l'intérieur du transformateur ou à l'extérieur (crachotement dû à des objets placés à un potentiel flottant dans l'aire d'essai, ou provenant de pièces sous tension dans l'air ou d'arêtes vives sur des parties du

transformateur mises à la terre). Etant donné que l'essai concerne l'isolation interne, il est permis et recommandé d'utiliser des écrans électrostatiques provisoires placés à l'extérieur.

- Rechercher quelle peut être la localisation probable de la ou des sources en se référant au schéma électrique du transformateur, par exemple, des essais monophasé ou par tension appliquée peuvent se révéler utiles. Il existe plusieurs méthodes connues et publiées de localisation des décharges. L'une d'elles est fondée sur une corrélation entre les relevés et les étalonnages à différentes paires de bornes (ces relevés étant effectués en plus de ceux qui sont obligatoires entre les bornes de ligne et la terre). On peut également, si des enregistrements à partir de circuits à large bande sont réalisés, identifier les formes d'impulsions individuelles pendant l'essai avec les formes d'onde d'étalonnage correspondantes. Un cas particulier de localisation est l'identification d'une décharge partielle dans l'isolant des traversées-condensateurs.
- Rechercher la localisation de la ou des sources à l'intérieur de la cuve par une détection acoustique ou ultrasonore.
- Rechercher la localisation et la nature de la source au moyen de capteurs électromagnétiques ultra haute fréquence placés dans la cuve.
- Déterminer la nature physique probable de la source à partir de conclusions telles que la variation du niveau de la tension d'essai, l'hystérésis, la répartition des impulsions sur l'onde de tension d'essai, le développement dans la durée d'une décharge partielle, etc.
- Une décharge partielle dans le système d'isolement peut avoir pour origine un séchage ou une imprégnation de liquide insuffisant(e), et ceci s'observe généralement par la configuration de décharge partielle. On peut donc essayer de retraiter le transformateur ou de le laisser reposer quelque temps, puis de recommencer l'essai.
- Une exposition même limitée à un niveau de décharge partielle assez élevé peut conduire à un craquage local de l'huile ou du liquide, et à la réduction provisoire des tensions d'extinction et de réamorçage, les conditions d'origine peuvent toutefois être spontanément restaurées en quelques heures.
- Une variation relativement limitée du niveau des décharges partielles lorsque la tension augmente, une configuration de décharges partielles typique d'une particule flottante dans le champ électrique, et l'absence d'augmentation de niveau avec le temps peuvent être considérées comme une preuve que le transformateur est apte au service. Dans ce cas, il peut être convenu de répéter l'essai, si possible avec une durée prolongée et avec un niveau de tension accru, ceci pouvant réduire le niveau de décharge dans le temps.
- On ne trouve généralement au décuivage aucune trace visible de décharges partielles à moins que le transformateur n'ait été exposé pendant une durée importante à des niveaux de décharges partielles très élevés par rapport à la limite d'acceptation. Une telle méthode peut constituer le dernier recours lorsque tous les autres moyens d'amélioration du comportement du transformateur ou d'identification de la source ont échoué.

Annexe B **(informative)**

Surtension transmise de l'enroulement haute tension à un enroulement basse tension

B.1 Généralités

Le problème des surtensions transmises est traité du point de vue du réseau dans l'IEC 60071-2. Les informations fournies ci-dessous concernent uniquement les problèmes associés au transformateur lui-même dans certaines conditions de service. Les surtensions transmises à prendre en compte sont soit des surtensions transitoires, soit des surtensions ordinaires.

NOTE Il est de la responsabilité de l'acheteur de définir la charge d'un enroulement basse tension. Si aucune information ne peut être fournie, le constructeur peut proposer des informations concernant les tensions transmises prévues lorsque les bornes basse tension sont en circuit ouvert, et concernant les valeurs des résistances ou des condensateurs qui sont nécessaires pour maintenir les tensions dans des limites acceptables.

B.2 Transmission de la surtension

B.2.1 Généralités

L'étude de l'installation particulière d'un transformateur du point de vue des surtensions transmises n'est en général justifiée que dans le cas des gros transformateurs de groupes qui ont un rapport de transformation élevé, et des transformateurs de grands réseaux à haute tension qui ont un enroulement tertiaire à basse tension.

Étant donné que les autotransformateurs monophasés sont soumis à l'essai séparément, les tensions transmises qui apparaissent sur les bornes tertiaires lorsque les transformateurs sont connectés en tant que banc triphasé, doivent être prises en compte.

Les mesures des surtensions transmises peuvent être effectuées au moyen d'un générateur à impulsions récurrentes basse tension, afin de s'assurer que les tensions transmises ne dépassent pas le niveau spécifié, ou de confirmer que des parafoudres ne sont pas requis. En variante, ces mesures peuvent être effectuées à une tension réduite pendant les essais d'impulsions.

Il est commode de faire la distinction entre deux mécanismes de transmission des surtensions qui sont la transmission capacitive et la transmission inductive.

B.2.2 Transmission capacitive

La transmission capacitive d'une surtension à un enroulement à basse tension peut être décrite, en première approximation, comme une division de tension capacitive. Le circuit équivalent le plus simple tel qu'observé à partir de l'enroulement basse tension consiste en une source à force électromotrice (f.e.m.) reliée en série avec une capacité de transmission C_t , voir Figure B.1.

La f.e.m. équivalente est une fraction s de la surtension incidente sur le côté haute tension. C_t est de l'ordre de 10^{-9} F; s et C_t ne sont pas des grandeurs bien définies mais dépendent de la forme du front de la surtension. Ces grandeurs peuvent être déterminées globalement par des mesures oscillographiques. Leur prédétermination par le calcul est incertaine.

Le chargement des bornes secondaires avec des appareillages, des câbles courts ou des condensateurs additionnels (quelques nF), qui se comportent comme une capacité localisée C_s reliée directement aux bornes (même pendant la première microseconde), permet de réduire la

crête de la surtension transmise. Des câbles plus longs ou des barres omnibus sont représentés par leur impédance caractéristique.

La forme de la surtension au secondaire qui en résulte est normalement du type d'une impulsion brève (de l'ordre de la microseconde), correspondant au front de la surtension incidente.

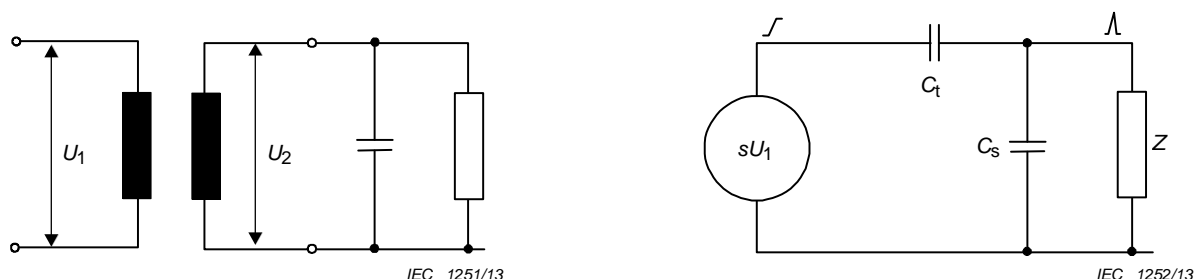


Figure B.1 – Circuit équivalent pour la transmission capacitive de surtension

B.2.3 Transmission inductive

La transmission inductive d'une surtension dépend du passage du courant de choc dans l'enroulement haute tension.

Si aucune charge extérieure n'est appliquée à l'enroulement secondaire, la tension transitoire présente généralement une oscillation amortie superposée dont la fréquence est déterminée par l'inductance de fuite et les capacités des enroulements.

Il est possible de réduire la composante inductive d'une surtension transmise, soit à l'aide d'une résistance d'amortissement au moyen d'un parafoudre, soit en modifiant l'oscillation grâce à une charge capacitive. Si on utilise des condensateurs, la valeur de leur capacité doit être généralement de l'ordre de quelques dixièmes de microfarads. (Ces condensateurs élimineront alors automatiquement la composante transmise capacitivement, tant que l'inductance du circuit est faible.)

Les paramètres des transformateurs qui entrent en jeu dans la transmission inductive des surtensions sont mieux définis et dépendent moins du temps de montée (ou de la fréquence) que ceux qui entrent en jeu dans la transmission capacitive. Pour de plus amples informations, se reporter à la documentation publiée à ce sujet.

B.3 Surtension transmise à la fréquence industrielle

Si un enroulement basse tension physiquement voisin de l'enroulement haute tension est laissé sans liaison à la terre ou est relié à la terre par une connexion de forte impédance, il existe, lorsque l'enroulement haute tension est alimenté, un risque de surtension à la fréquence industrielle par division capacitive.

Le risque est évident pour un enroulement monophasé, mais il peut également exister pour un enroulement triphasé si la tension de l'enroulement primaire devient dissymétrique, comme cela se produit lors de défauts à la terre. Dans des cas particuliers, des résonances peuvent se produire.

Les enroulements tertiaires et de stabilisation des gros transformateurs sont également soumis au même risque. Il est de la responsabilité de l'acheteur d'empêcher qu'un enroulement tertiaire soit accidentellement relié à la terre par une impédance trop élevée. Il convient normalement de concevoir un enroulement de stabilisation de façon qu'il soit relié à la terre (cuve) de manière permanente, soit extérieurement, soit intérieurement.

La surtension est déterminée par les capacités entre les enroulements et entre les enroulements et la terre. Ces capacités peuvent être mesurées à basse fréquence à partir de la borne du transformateur avec différentes combinaisons, et elles peuvent également être calculées avec une précision suffisante.

Annexe C (informative)

Informations concernant l'isolation du transformateur et les essais diélectriques à fournir avec un appel d'offres et avec une commande

C.1 Généralités

Il convient, pour chaque enroulement du transformateur, de fournir les informations suivantes lors de l'appel d'offres et de la commande selon la valeur U_m de l'enroulement.

NOTE Bien que les valeurs SI et IVW puissent être spécifiées pour un enroulement à tension inférieure sur un transformateur, les valeurs peuvent ne pas être obtenues pendant l'essai selon le rapport du transformateur.

Il convient qu'une discussion ait lieu, au moment de la commande ou lors de la phase de revue de conception, concernant les connexions d'essai et les méthodes d'essai, en particulier en ce qui concerne la connexion à utiliser lors des essais de tension de tenue induite sur les transformateurs complexes avec des enroulements à haute tension à isolation non uniforme (~~voir 12.3, note~~), et la méthode à utiliser pour les essais au choc des enroulements de forte puissance à basse tension et des bornes neutres (~~voir 13.3~~ 13.1.4). L'application de dispositifs de protection non linéaire, intégrés dans le transformateur, doit être indiquée par le constructeur lors de l'appel d'offres et de la commande, et il convient d'en faire mention dans le schéma des connexions de la plaque signalétique.

C.2 Pour les transformateurs et les enroulements avec $U_m \leq 72,5$ kV

Dans tous les cas.

- valeur de U_m ;
- valeur de U_r ;
- niveau d'essai de tension appliquée (AV);
- niveau d'essai au choc de foudre en onde pleine (LI).

Dans des cas particuliers:

- déterminer si des mesures de décharges partielles sont requises, si ces mesures doivent être effectuées conjointement à l'essai de tension induite ou séparément, et si ces mesures doivent également être effectuées sur une seule unité (unité d'essai de type) ou toutes les unités. Il convient d'indiquer la durée d'application de la tension de mesure DP si celle-ci est inférieure à une heure;
- déterminer si un essai au choc de foudre est requis sur une ou toutes les unités à fournir dans le cadre de la commande, plutôt que sur simplement la première unité conçue;
- déterminer si des essais au choc de foudre en onde coupée sont requis et si ceux-ci doivent être effectués uniquement sur la première ou sur toutes les unités;
- déterminer si un essai au choc de foudre sur la borne neutre est requis et si celui-ci doit être effectué uniquement sur la première ou sur toutes les unités;
- déterminer si un essai au choc de foudre appliqué simultanément sur plusieurs bornes de ligne est requis et si celui-ci doit être effectué uniquement sur la première ou sur toutes les unités;
- déterminer les distances d'isolement dans l'air si elles sont différentes des distances d'isolement indiquées à l'Article 16.

Il convient de préférence de choisir les valeurs de U_m , LI et AV, dans une seule ligne du Tableau 2 dans la mesure où elles constitueront alors un ensemble coordonné. Il est toutefois

admissible de choisir les valeurs dans différentes lignes du tableau pour la même valeur U_m ou une valeur U_m plus élevée pour correspondre à la coordination existante de l'isolement du réseau. Il convient de choisir la valeur LIC, lorsqu'elle est spécifiée, dans la même ligne du Tableau 2 que la valeur LI. Toute combinaison de valeurs issues de lignes différentes peut aboutir à un surdimensionnement eu égard à certains paramètres.

C.3 Pour les transformateurs et les enroulements avec $72,5 \text{ kV} < U_m \leq 170 \text{ kV}$

Dans tous les cas:

- valeur de U_m ;
- valeur de U_T ;
- niveau d'essai de tension appliquée;
- niveau d'essai au choc de foudre en onde pleine.

De plus, pour les transformateurs à isolation non uniforme:

- le niveau d'essai en AC de la borne de ligne ou le niveau d'essai au choc de manœuvre, lorsque spécifié comme variante;

Dans des cas particuliers:

- déterminer si d'autres niveaux de tension plus élevée doivent être utilisés pour l'essai de tension induite avec mesure de décharges partielles, et si ces niveaux peuvent être combinés à l'essai IVW;
- déterminer si des essais au choc de foudre en onde coupée sont requis et si ceux-ci doivent être effectués uniquement sur la première ou sur toutes les unités;
- déterminer si un essai au choc de foudre sur la borne neutre est requis et si celui-ci doit être effectué uniquement sur la première ou sur toutes les unités;
- déterminer si la tension d'essai requise pour la tension d'essai induite correspond au double de la tension assignée;
- déterminer si un essai au choc de manœuvre est requis et si cet essai doit être effectué uniquement sur la première ou toutes les unités et si l'essai SI se substitue à l'essai LTAC;
- déterminer si un essai au choc de foudre appliqué simultanément sur plusieurs bornes de ligne est requis et si celui-ci doit être effectué uniquement sur la première ou sur toutes les unités;
- déterminer si un essai de tension de tenue en AC de la borne de ligne est requis pour les transformateurs dont les enroulements ont une isolation non uniforme et si tel est le cas, la tension d'essai requise;
- déterminer les distances d'isolement dans l'air si elles sont différentes des distances d'isolement indiquées à l'Article 16.

Il convient de préférence de choisir les valeurs de U_m , LI, AV et LTAC et SI, lorsque spécifiés, dans une seule ligne du Tableau 2 dans la mesure où elles constitueront alors un ensemble coordonné. Il est toutefois admissible de choisir les valeurs dans différentes lignes du tableau pour la même valeur U_m ou une valeur U_m plus élevée pour correspondre à la coordination existante de l'isolement du réseau. Il convient de choisir la valeur LIC, lorsqu'elle est spécifiée, dans la même ligne du Tableau 2 que la valeur LI. Toute combinaison de valeurs issues de lignes différentes peut aboutir à un surdimensionnement eu égard à certains paramètres.

C.4 Pour les transformateurs et les enroulements avec $U_m > 170 \text{ kV}$

Dans tous les cas:

- valeur de U_m ;

- valeur de U_p ;
- niveau d'essai au choc de foudre;
- niveau d'essai au choc de manœuvre;
- niveau d'essai de tension appliquée.

Dans des cas particuliers:

- déterminer si d'autres niveaux de tension plus élevée doivent être utilisés pour la tension induite avec mesure de décharges partielles;
- déterminer si un essai au choc de foudre sur la borne neutre est requis et si celui-ci doit être effectué uniquement sur la première ou sur toutes les unités;
- déterminer si un essai au choc de foudre appliqué simultanément sur plusieurs bornes de ligne est requis et si celui-ci doit être effectué uniquement sur la première ou sur toutes les unités;
- déterminer si un essai de tension de tenue en AC de la borne de ligne est requis pour les transformateurs dont les enroulements ont une isolation non uniforme et si tel est le cas, la tension d'essai requise;
- déterminer les distances d'isolement dans l'air si elles sont différentes des distances d'isolement indiquées à l'Article 16.

Il convient de préférence de choisir les valeurs de U_m , LI, SI, AV et LTAC, lorsque spécifié, dans une seule ligne du Tableau 2 dans la mesure où elles constitueront alors un ensemble coordonné. Il est toutefois admissible de choisir les valeurs dans différentes lignes du tableau pour la même valeur U_m ou une valeur U_m plus élevée pour correspondre à la coordination existante de l'isolement du réseau. Il convient de choisir la valeur LIC dans la même ligne du Tableau 2 que la valeur LI. Toute combinaison de valeurs issues de lignes différentes peut aboutir à un surdimensionnement eu égard à certains paramètres.

Annexe D (informative)

Calcul du niveau de tension avec isolement des bornes neutres

D.1 Généralités

Les recommandations de la présente annexe permettent de déterminer la tension de tenue minimale pour l'extrémité neutre d'un transformateur à isolation non uniforme non directement mise à la terre. Pour contrôler les niveaux de défaut ou pour d'autres raisons, le neutre peut être mis à la terre par l'intermédiaire d'une impédance élevée (par exemple, une bobine d'inductance éliminatrice d'arc, une inductance de mise à la terre ou une résistance).

La présente annexe ne couvre pas la détermination de la tension de tenue des extrémités neutres d'un transformateur conçu pour être utilisé avec un transformateur de réglage par polarisation du neutre.

Lorsque l'extrémité neutre n'est pas directement mise à la terre, un dispositif de protection contre les surtensions doit être installé entre la traversée neutre et la terre pour limiter les tensions transitoires. Il est de la responsabilité de l'acheteur de choisir le dispositif de protection contre les surtensions, de déterminer son niveau de protection au choc, et de spécifier le niveau correspondant de tension de tenue au choc pour l'extrémité neutre du transformateur.

NOTE Pour une isolation non uniforme, le constructeur peut concevoir l'enroulement avec un niveau d'isolement supérieur au niveau spécifié, en raison de l'essai de tenue en tension induite des extrémités de ligne (essai spécial).

La tension de tenue en AC doit être plus élevée que la surtension maximale apparaissant en cas de défaut du réseau. Il convient de prévoir une marge entre le niveau de choc de l'extrémité neutre et la tension de fonctionnement du dispositif de protection, ces deux tensions doivent par ailleurs être supérieures à la tension maximale qui apparaît en cas de défaut du réseau. Les formules ci-dessous fournissent un guide pour le calcul des tensions maximales pouvant apparaître au neutre mis à la terre par l'intermédiaire d'une impédance.

D.2 Calcul du courant de défaut d'une borne neutre

Le courant de défaut maximum du neutre I_{fault} d'un transformateur triphasé à deux enroulements (défaut monophasé à la terre sur un enroulement connecté en étoile) peut être calculé selon la formule suivante:

$$I_{\text{fault}} = \frac{3 \times E}{(Z_{1t} + Z_{1s} + Z_{2t} + Z_{2s} + Z_{0t} + Z_{0s}) + 3 \times Z_N + 3 \times Z_{\text{fault}}}$$

où

- E est la tension phase-terre prise comme valeur $U_m/\sqrt{3}$ en V
- Z_{1s} est l'impédance directe du réseau en Ω
- Z_{2s} est l'impédance inverse du réseau en Ω
- Z_{0s} est l'impédance homopolaire du réseau en Ω
- Z_{1t} est l'impédance directe du transformateur en Ω
- Z_{2t} est l'impédance inverse du transformateur en Ω
- Z_{0t} est l'impédance homopolaire du transformateur en Ω (y compris tout enroulement tertiaire ou de stabilisation)

Z_N est l'impédance située entre le neutre et la terre en Ω

Z_{fault} est l'impédance de défaut en Ω (prise comme étant nulle)

NOTE Les valeurs suivantes peuvent être utilisées comme valeurs indicatives, conformément à la pratique courante de calcul du cas le plus défavorable:

$$\begin{aligned} E &= U_m / \sqrt{3} \\ Z_{1s} &= 0 \\ Z_{2s} &= 0 \\ Z_{0s} &= 0 \\ Z_{\text{fault}} &= 0 \end{aligned}$$

D.3 Niveau d'isolement minimum

D.3.1 Niveau d'isolement minimum de la tension appliquée

Il convient de choisir le niveau AV minimum pour la borne neutre dans le Tableau 2 de la présente norme, ce niveau devant être supérieur à $U_{\text{ACneutral}}$, où:

$$U_{\text{ACneutral}} = I_{\text{fault}} \times Z_N$$

D.3.2 Niveau de choc minimum

Il convient de choisir le niveau de choc de manière à prévoir une marge supérieure au niveau de fonctionnement du dispositif de protection qu'il convient également de choisir de sorte qu'il ne fonctionne pas dans en cas de défaut de court-circuit du réseau. La tension de crête asymétrique la plus élevée dans ces conditions est donnée par

$$U_{\text{neutral max}} = U_{\text{ACneutral}} \times K_v \times \sqrt{2}$$

où

K_v est le facteur d'asymétrie de la tension.

Dans le cas d'une impédance Z_N purement résistive, le facteur d'asymétrie de tension K_v est identique au facteur d'asymétrie du courant k tel que défini dans l'IEC 60076-5, mais pour une impédance inductive Z_N , K_v est inférieur en raison de la composante continue du courant. Le facteur K_v peut être pris comme égal à 2 dans le cas le plus défavorable d'un très grand rapport X/R de transformateur et d'une impédance Z_N faiblement résistive, mais est < 2 dans la pratique. Dans le cas d'une impédance Z_N purement inductive, le facteur K_v peut être pris égal à 1,05, dans la mesure où cela représente le cas le plus défavorable avec un rapport X/R de transformateur d'environ 7. Il est recommandé de calculer la valeur $U_{\text{neutral max}}$ en utilisant un modèle de réseau.

D.4 Exemple

Un transformateur connecté en Ynd11 avec une tension HT assignée de 155 kV (c'est-à-dire que U_m est égale à 170 kV) et une puissance assignée de 100 MVA avec une impédance directe de 12 % sur une base de 100 MVA et avec une impédance homopolaire de 10,8 %, la borne neutre HT étant mise à la terre par l'intermédiaire d'une bobine d'inductance de 39 Ω , est soumis au courant de défaut suivant, dans le neutre HT pour un défaut phase-terre HT compte tenu d'une puissance de court-circuit infinie du réseau:

$$\begin{aligned} I_{\text{fault}} &= \frac{3 \times E}{(Z_{1t} + Z_{1s} + Z_{2t} + Z_{2s} + Z_{0t} + Z_{0s}) + 3 \times Z_N + 3 \times Z_{\text{fault}}} \\ I_{\text{fault}} &= \frac{3 \times 170\,000 / \sqrt{3}}{(28,83 + 0 + 28,83 + 0 + 25,95 + 0) + 3 \times 39 + 0} \text{ A} \end{aligned}$$

$$I_{\text{fault}} = 1\,468 \text{ A}$$

ce qui donne une tension de:

$$U_{\text{ACneutral}} = I_{\text{fault}} \times Z_{\text{N}}$$

$$U_{\text{ACneutral}} = 1\,468 \times 39 \text{ V}$$

$$U_{\text{ACneutral}} = 57\,243 \text{ V}$$

le niveau AV minimum du Tableau 2 est par conséquent égal à 70 kV.

En supposant que $K_v = 1,05$ pour une impédance de neutre inductive, la tension la plus élevée appliquée sur la borne neutre en cas de défaut du réseau est la suivante:

$$U_{\text{neutral max}} = 57\,243 \times 1,05 \times \sqrt{2} \text{ V}$$

$$U_{\text{neutral max}} = 85,0 \text{ kV}$$

Étant donné qu'il convient que le dispositif de protection ne fonctionne pas à un niveau de crête de 85 kV, il convient que son niveau en AC continu le plus élevé ne soit pas inférieur à $85/\sqrt{2} \text{ kV} = 60,1 \text{ kV}$.

Un parafoudre adapté pour cette tension (tension de tenue de 10 secondes) offre un niveau de protection sous 10 kA de 140 kV, et l'adjonction d'une marge sur cette valeur donne un niveau LI de 170 kV pour l'extrémité neutre.

Un niveau de choc de foudre de 170 kV correspond à une valeur U_m de 36 kV, et cette valeur est spécifiée pour le neutre.

Annexe E (informative)

Base applicable aux essais diélectriques, niveaux d'isolement et distances d'isolement

E.1 Généralités

La présente norme spécifie que les isolations phase – terre, neutre – terre, entre phases et entre spires du transformateur doivent être correctement soumises à essai.

Selon le niveau de tension et le type de transformateur, différents essais ont été choisis pour y parvenir, et des niveaux de tension d'essai coordonnés sont donnés dans le Tableau 2.

La présente annexe synthétise les règles qui ont prévalu lors de la révision de la présente norme. En général, la révision avait pour objectif de simplifier les essais requis et de clarifier les exigences sans augmenter ou réduire les niveaux d'essai globaux, dont on considère qu'il a démontré de bonnes performances en service pendant de nombreuses années.

E.2 Essais

E.2.1 Essais pour transformateurs avec $U_m \leq 72,5$ kV

Ces transformateurs comprennent les transformateurs de distribution qui sont souvent produits en grandes quantités pour une conception particulière. Les essais auxquels sont soumis ces transformateurs doivent rester rapides et abordables.

Dans la mesure où tous les transformateurs et enroulements avec une valeur U_m inférieure ou égale à 72,5 kV ont une isolation uniforme, l'isolation entre la ligne et la terre et l'isolation entre le neutre et la terre font toutes deux l'objet d'une vérification au cours de l'essai de tension appliquée (AV).

L'essai de tenue de tension induite (IVW) ne doit, par conséquent, que vérifier l'isolation entre spires, et, tout comme dans l'édition précédente, un essai effectué à une tension équivalant au double de la tension de service normale a été considéré comme offrant une marge suffisante.

La conception de l'isolation entre phases et de l'isolation entre phase et terre est également prouvée par l'essai au choc de foudre (LI), mais afin de limiter le matériel d'essai nécessaire pour cette catégorie de transformateur, l'essai au choc de foudre a été conservé comme un essai de type et non comme un essai individuel.

Généralement, l'essai au choc de foudre en onde coupée (LIC) n'est pas considéré comme nécessaire. Cet essai est défini comme un essai spécial disponible à la demande de l'acheteur, destiné à être utilisé uniquement dans des conditions de service particulièrement difficiles ou exigeantes.

L'essai de tension induite avec mesure des décharges partielles (IVPD) a été également considéré comme trop coûteux et trop long pour une application générale sur ces transformateurs, ses objectifs étant de plus couverts par les essais IVW et AV. Cet essai est défini comme un essai spécial disponible si nécessaire à la demande de l'acheteur, et si possible avec une durée réduite, destiné à être utilisé dans des conditions de service spéciales.

E.2.2 Essais pour transformateurs avec $72,5 \text{ kV} < U_m \leq 170 \text{ kV}$

Les transformateurs relevant de cette gamme intermédiaire sont généralement construits sur commande, mais à causes des puissances transmises plus élevées, des exigences supérieures concernant les contrôles de qualité sont incluses. Les isolations uniformes et non uniformes pouvant toutes deux être spécifiées, la liste des essais a été établie pour couvrir ces deux possibilités.

L'essai de tension appliquée (AV) permet de démontrer l'isolation entre neutre et terre, ainsi que l'isolation entre ligne et terre pour les transformateurs à isolation uniforme. Pour l'isolation non uniforme, étant donné la limitation du niveau d'essai par le niveau d'isolation de l'extrémité neutre, la démonstration de l'isolation entre la borne de ligne et la terre se révèle insuffisante. Ainsi, l'essai de l'extrémité de ligne par tension induite (LTAC) est un essai individuel pour les transformateurs à isolation non uniforme, mais il peut être remplacé, selon accord, par un essai au choc de manœuvre (SI) de manière à pouvoir soumettre cette classe de transformateur à des essais similaires à ceux pratiqués sur de plus grandes unités.

L'essai au choc de foudre (LI) individuel permet également de vérifier l'isolation entre phases et entre la phase et la terre. L'essai au choc de foudre en onde coupée est un essai spécial pour ces niveaux de tension à spécifier par l'acheteur uniquement lorsque des conditions de service particulières le requièrent.

Pour la vérification de l'isolation entre spires et de l'isolation entre phases, un essai de tenue de tension induite (IVW) à une tension équivalant au double de la tension assignée et un essai à tension induite avec mesure des décharges partielles (IVPD) sont spécifiés comme des essais individuels. Afin d'écourter la durée d'essai et de ne pas reproduire deux fois le même type de contrainte diélectrique dans le transformateur; il est possible de combiner ces essais dans la mesure où la tension de pointe de l'essai IVPD génère des contraintes similaires à l'essai IVW, les deux essais étant effectués dans une configuration similaire aux conditions de service.

E.2.3 Essais pour transformateurs avec $U_m > 170 \text{ kV}$

Cette catégorie de transformateur couvre les plus grands transformateurs de transport et de production. Le nombre limité d'appareils, ainsi que les contrôles qualité nécessaires pour ces unités importantes de grandes dimensions, conduisent aux essais suivants:

Afin de vérifier l'isolation à la terre, un essai de tension appliquée est requis comme essai individuel.

L'essai IVPD contrôle la qualité de l'isolation entre spires, entre ligne et terre et entre phases, avec une connexion identiques à celle du service. L'essai au choc de manœuvre (SI) démontre la tenue de l'isolation entre phases et entre ligne et terre. On considère par conséquent qu'un essai de tenue de tension induite distinct n'est pas nécessaire, mais il est possible d'augmenter la tension de pointe de l'essai IVPD lorsque souhaité, par exemple, pour obtenir une tension équivalant à deux fois la tension assignée.

Les essais au choc de foudre, y compris les ondes coupées, sont inclus en tant qu'essai individuel pour ces transformateurs, dans la mesure où l'on considère important de démontrer la capacité du transformateur à résister aux ondes de chocs, y compris celles comportant des composantes à fréquences plus élevées.

L'essai de l'extrémité de ligne par tension induite monophasée (LTAC) peut être spécifié comme essai spécial pour l'acheteur qui souhaite vérifier par un essai supplémentaire l'isolation ligne – terre avec un essai AC. Cet essai est issu de l'essai précédent de tenue de tension induite.

E.3 Tensions d'essai

Les tensions d'essai indiquées dans le Tableau 2 ont été établies sur la base de l'IEC 60071-1. Toutes les valeurs inférieures aux limites acceptables données dans cette norme de coordination de l'isolement ont été exclues du Tableau 2, mais le Tableau 3 introduit des valeurs inférieures qui peuvent être utilisées pour une coordination avec la pratique existante. Le Tableau 2 fournit toujours une gamme de valeurs de tension d'essai potentielles pour chaque valeur de U_m afin de permettre à la spécification d'un transformateur de répondre à une exigence système particulière, tout en prévoyant une norme minimale.

La règle générale, qui a prévalu pour l'établissement des valeurs indiquées dans le Tableau 2, repose sur le comportement d'une isolation constituée d'isolant solide à base de cellulose et d'huile minérale. Les études menées sur ce type d'isolation ont montré que la tension de tenue au choc de manœuvre (SI) se situe généralement entre 0,8 et 0,85 fois la tension de tenue au choc de foudre. La norme IEEE C57.12.00-2010 fournit des valeurs basées sur un rapport de 0,83.

Les valeurs indiquées dans le Tableau 2 ont été arrondies à l'unité supérieure, tant que cela n'a pas introduit d'écart excessif par rapport à la règle générale.

La tension de tenue en tension induite (IVW) de l'isolation entre la ligne et la terre correspond habituellement à environ 50 % de la tension de tenue au choc de manœuvre, c'est-à-dire environ de 40 % à 43 % de la tension de tenue au choc de foudre (LI). Les valeurs indiquées dans le Tableau 2 ont été établies sur la base de ce principe général et des chiffres normalisés relatifs à l'essai IVW de l'IEC 60071-1. Sauf pour les valeurs de U_m inférieures à 36 kV, pour lesquelles les pratiques existantes diffèrent quelque peu, la règle générale s'applique uniquement avec des différences limitées, afin de refléter la pratique existante.

La valeur $(1,58 \times U_r) / \sqrt{3}$ pour le niveau de mesure décharges partielles (DP) est égal à $1,5 \times U_r$ plus 5 % et représente le niveau utilisé dans la IEEE C57.12.00-2010. La valeur $(1,8 \times U_r) / \sqrt{3}$ est égale à $1,7 \times U_r$ plus 5 % afin de tenir compte du changement de la base entre la valeur U_m et U_r , et de l'harmoniser avec la IEEE C57.12.00-2010.

E.4 Distances d'isolement

Les valeurs données dans la colonne "Phase – terre" du Tableau 4 constituent les valeurs les plus élevées des valeurs indiquées dans l'IEC 60071-1:2011, pour le niveau de choc de foudre ou de manœuvre approprié. Les valeurs pointe-structure ont été utilisées pour des niveaux de choc de foudre $\leq 750 \text{ kV} < 850 \text{ kV}$ et les valeurs conducteur-structure pour celles supérieures à 750 kV. Lorsque l'IEC 60071-1 ne spécifie pas de chiffres, les valeurs correspondantes ont été obtenues par interpolation linéaire, et arrondies aux 10 mm ou 100 mm les plus proches.

Les valeurs indiquées dans la colonne "distance d'isolement entre phases" du Tableau 4 ont été obtenues en basant les valeurs entre conducteurs indiquées dans l'IEC 60071-1:2011 sur une valeur phase terre obtenue en divisant la valeur entre phases par 1,5 ce qui constitue une valeur appropriée pour les transformateurs ayant un enroulement en triangle. Lorsque l'IEC 60071-1 ne fournit pas de chiffres exacts, une régression polynomiale du troisième degré permet d'effectuer une interpolation entre les chiffres des valeurs phase-terre rétablis en divisant la valeur entre phases par 1,5. Un exemple de rétablissement de la base serait de prendre la distance d'isolement de 7 200 mm sous 1 425 kV avec un coefficient 1,7 comme équivalente celle sous 1 615 kV avec un coefficient de 1,5.

Bibliographie

IEC 60071-2, *Coordination de l'isolement – Partie 2: Guide d'application*

IEC 60076-4, *Transformateurs de puissance – Partie 4: Guide pour les essais au choc de foudre et au choc de manœuvre des transformateurs de puissance et bobines d'inductance*

IEC 60214-1, *Changeurs de prises – Partie 1: Prescriptions de performances et méthodes d'essai*

IEC 61083-1, *Appareils et logiciels utilisés pour les mesures pendant les essais de choc à haute tension – Partie 1: Prescriptions pour les appareils*

IEC 61083-2, *Appareils et logiciels utilisés pour les mesures pendant les essais de choc à haute tension – Partie 2: Prescriptions pour les logiciels*

IEC 62271-1, *Appareillage à haute tension – Partie 1: Spécifications communes*

IEEE C57.12.00-2010, *Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers*

IEEE C57.142-2010, *IEEE guide to describe the occurrence and mitigation of switching transients induced by transformers, switching device and system interaction*

CIGRÉ-report 12-14 (1984), *Resonance behaviour of high voltage transformers*. Paper presented in the name of Study Committee 12 by Working Group 12.07

FINAL VERSION

VERSION FINALE

**Power transformers –
Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air**

**Transformateurs de puissance –
Partie 3: Niveaux d'isolement, essais diélectriques et distances d'isolement
dans l'air**



CONTENTS

FOREWORD.....	4
INTRODUCTION.....	6
1 Scope.....	7
2 Normative references.....	7
3 Terms and definitions	7
4 General	8
5 Highest voltage for equipment and rated insulation level.....	10
6 Transformers with re-connectable windings.....	11
7 Dielectric tests	12
7.1 Overview	12
7.2 Test requirements.....	13
7.2.1 General	13
7.2.2 Test voltage levels	14
7.2.3 Test sequence	17
7.3 Test requirements for specific transformers	17
7.3.1 Tests for transformers with $U_m \leq 72,5$ kV.....	17
7.3.2 Tests on transformers with $72,5$ kV < $U_m \leq 170$ kV	18
7.3.3 Tests on Transformers with $U_m > 170$ kV.....	19
7.4 Assigning U_m and test voltages to the neutral terminal of a winding	20
7.4.1 Transformers with $U_m \leq 72,5$ kV	20
7.4.2 Transformers with $U_m > 72,5$ kV	20
8 Dielectric tests on transformers that have been in service	20
9 Insulation of auxiliary wiring (AuxW).....	21
10 Applied voltage test (AV).....	21
11 Induced voltage tests (IVW and IVPD)	22
11.1 General	22
11.2 Induced voltage withstand test (IVW)	22
11.3 Induced voltage test with partial discharge measurement (IVPD)	23
11.3.1 General	23
11.3.2 Test duration and frequency.....	23
11.3.3 Test sequence	23
11.3.4 Partial discharge (PD) measurement.....	24
11.3.5 Test acceptance criteria	25
12 Line terminal AC withstand test (LTAC).....	25
13 Lightning impulse tests (LI, LIC, LIN, LIMT).....	26
13.1 Requirements for all lightning impulse tests	26
13.1.1 General	26
13.1.2 Tap positions	26
13.1.3 Records of tests.....	26
13.1.4 Test connections.....	27
13.2 Full wave lightning impulse test (LI)	28
13.2.1 Wave shape, determination of test voltage value and tolerances	28
13.2.2 Tests on transformers without non-linear elements.....	29
13.2.3 Tests on transformers with non-linear elements.....	30
13.3 Chopped wave lightning impulse test (LIC).....	31

13.3.1	Wave shape.....	31
13.3.2	Tests on transformers without non-linear elements.....	31
13.3.3	Tests on transformers with non-linear elements.....	32
13.4	Lightning impulse test on a neutral terminal (LIN).....	33
13.4.1	General	33
13.4.2	Waveshape.....	33
13.4.3	Test sequence	34
13.4.4	Test criteria	34
14	Switching impulse test (SI).....	34
14.1	General	34
14.2	Test connections	34
14.3	Waveshape	35
14.4	Test sequence.....	35
14.5	Test criteria	35
15	Action following test failure	36
16	External clearances in air.....	36
16.1	General	36
16.2	Clearance requirements.....	37
Annex A (informative)	Application guide for partial discharge measurements on transformers	40
Annex B (informative)	Overtoltage transferred from the high-voltage winding to a low-voltage winding	45
Annex C (informative)	Information on transformer insulation and dielectric tests to be supplied with an enquiry and with an order.....	47
Annex D (informative)	Neutral insulation voltage level calculation	50
Annex E (informative)	Basis for dielectric tests, insulation levels and clearances	53
Bibliography	56
Figure 1	– Time sequence for the application of test voltage for induced voltage test with partial discharge measurement (IVPD)	24
Figure A.1	– Calibration circuit for partial discharge measurement using the test tap of condenser type bushing.....	41
Figure A.2	– Circuit for partial discharge measurement using a high-voltage coupling capacitor.....	42
Figure B.1	– Equivalent circuit for capacitive transfer of overvoltage	46
Table 1	– Requirements and tests for different categories of transformers based on the U_m of the highest voltage winding	14
Table 2	– Test voltage levels (1 of 2).....	15
Table 3	– Test voltage levels used in special cases	16
Table 4	– Minimum clearances in air (1 of 2)	38

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

POWER TRANSFORMERS –**Part 3: Insulation levels, dielectric tests
and external clearances in air**

FOREWORD

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as "IEC Publication(s)"). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC itself does not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC is not responsible for any services carried out by independent certification bodies.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

DISCLAIMER

This Consolidated version is not an official IEC Standard and has been prepared for user convenience. Only the current versions of the standard and its amendment(s) are to be considered the official documents.

This Consolidated version of IEC 60076-3 bears the edition number 3.1. It consists of the third edition (2013-07) [documents 14/745/FDIS and 14/749/RVD] and its amendment 1 (2018-03) [documents 14/947/FDIS and 14/952/RVD]. The technical content is identical to the base edition and its amendment.

This Final version does not show where the technical content is modified by amendment 1. A separate Redline version with all changes highlighted is available in this publication.

International Standard IEC 60076-3 has been prepared by IEC technical committee 14: Power transformers.

This third edition of IEC 60076-3 constitutes a technical revision. The main changes from the previous edition are as follows:

- Three categories of transformer are clearly identified together with the relevant test requirements, these are summarised in Table 1.
- Switching impulse levels are defined for all $U_m > 72,5\text{kV}$.
- The procedure for Induced voltage tests with PD has been revised to ensure adequate phase to phase test voltages.
- The AC withstand test has been redefined (LTAC instead of ACSD).
- Induced voltage tests are now based on U_r rather than U_m .
- New requirements for impulse waveshape (k factor) have been introduced.
- Tables of test levels have been merged and aligned with IEC 60071-1:2010.
- Additional test levels have been introduced for $U_m > 800\text{kV}$.
- A new Annex E has been introduced, which sets out the principles used in assigning the tests, test levels and clearances in air.

This publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 2.

A list of all the parts in the IEC 60076 series, under the general title *Power transformers*, can be found on the IEC website.

The committee has decided that the contents of the base publication and its amendment will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC web site under "<http://webstore.iec.ch>" in the data related to the specific publication. At this date, the publication will be

- reconfirmed,
- withdrawn,
- replaced by a revised edition, or
- amended.

INTRODUCTION

This part of IEC 60076 specifies the insulation requirements and the corresponding insulation tests with reference to specific windings and their terminals. It also recommends external clearances in air (Clause 16).

The insulation levels and dielectric tests which are specified in this standard apply to the internal insulation only. Whilst it is reasonable that the rated withstand voltage values which are specified for the internal insulation of the transformer should also be taken as a reference for its external insulation, this may not be true in all cases. A failure of the non-self-restoring internal insulation is catastrophic and normally leads to the transformer being out of service for a long period, while an external flashover may involve only a short interruption of service without causing lasting damage. Therefore, it may be that, for increased safety, higher test voltages are specified by the purchaser for the internal insulation of the transformer than for the external insulation of other components in the system. When such a distinction is made, the external clearances should be adjusted to fully cover the internal insulation test requirements.

Annex E sets out some of the principles used in assigning the tests, test levels and clearances in air to the transformer according to the highest voltage for equipment U_m .

POWER TRANSFORMERS –

Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air

1 Scope

This International Standard applies to power transformers as defined by and in the scope of IEC 60076-1. It gives details of the applicable dielectric tests and minimum dielectric test levels. Recommended minimum external clearances in air between live parts and between live parts and earth are given for use when these clearances are not specified by the purchaser.

For categories of power transformers and reactors which have their own IEC standards, this standard is applicable only to the extent in which it is specifically called up by cross reference in the other standards.

2 Normative references

The following documents, in whole or in part, are normatively referenced in this document and are indispensable for its application. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60050-421, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 421: Power transformers and reactors*

IEC 60060-1, *High-voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements*

IEC 60060-2, *High-voltage test techniques – Part 2: Measuring systems*

IEC 60071-1, *Insulation co-ordination – Part 1: Definitions, principles and rules*

IEC 60076-1, *Power transformers – Part 1: General*

IEC 60137, *Insulated bushings for alternating voltages above 1 000 V*

IEC 60270, *High-voltage test techniques – Partial discharge measurements*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC 60076-1, IEC 60050-421 and the following apply.

3.1

highest voltage for equipment applicable to a transformer winding

U_m

highest r.m.s. phase-to-phase voltage in a three-phase system for which a transformer winding is designed in respect of its insulation

3.2 rated voltage of a winding

U_r

voltage assigned to be applied, or developed at no-load, between the terminals of an untapped winding, or a tapped winding connected on the principal tapping, for a three-phase winding it is the voltage between line terminals

Note 1 to entry: The rated voltages of all windings appear simultaneously at no-load when the voltage applied to one of them has its rated value.

Note 2 to entry: For single-phase transformers intended to be connected in star to form a three-phase bank or to be connected between the line and the neutral of a three phase system, the rated voltage is indicated as the phase-to-phase voltage, divided by $\sqrt{3}$, for example $400/\sqrt{3}$ kV.

Note 3 to entry: For single phase transformers intended to be connected between phases of a network, the rated voltage is indicated as the phase-to-phase voltage.

Note 4 to entry: For the series winding of a three-phase series transformer, which is designed as an open winding, the rated voltage is indicated as if the windings were connected in star.

[SOURCE: IEC 60076-1:2011, 3.4.3]

3.3 rated insulation level

set of rated withstand voltages which characterise the dielectric strength of the insulation

3.4 rated withstand voltage

value of the assigned test voltage applied in one of the standard dielectric tests that proves that the insulation complies with the assigned test voltage

3.5 uniform insulation of a transformer winding

insulation of a transformer winding that has all its ends connected to terminals with the same rated insulation level

3.6 non-uniform insulation of a transformer winding

insulation of a transformer winding when it has a neutral terminal end for direct or indirect connection to earth, and is designed with a lower insulation level than that assigned to the line terminal

Note 1 to entry: Non-uniform insulation may also be termed graded insulation.

4 General

The insulation requirements for power transformers and the corresponding insulation tests are given with reference to specific windings and their terminals.

For liquid-immersed or gas-filled transformers, the requirements apply to the internal insulation only. Any additional requirements or tests regarding external insulation which are deemed necessary shall be subject to agreement between manufacturer and purchaser. If the purchaser does not specify any particular requirements for external clearances then the provisions of Clause 16 shall apply. If the purchaser intends to make the connections to the transformer in a way which may reduce the clearances provided by the transformer alone, this should be indicated in the enquiry.

Bushings shall be subject to separate type and routine tests according to IEC 60137 (including appropriate bushing test levels for the particular transformer test level), which verify their phase-to-earth insulation, external as well as internal.

When a transformer is specified for operation at an altitude higher than 1 000 m, clearances shall be designed accordingly. It may then be necessary to select bushings designed for higher insulation levels than otherwise required for operation at lower altitudes, see Clause 16 of this standard and IEC 60137.

The manufacturer may shield the bushing terminals if necessary during the dielectric tests but any shielding of the earthed parts closest to the terminals shall form part of the transformer structure in-service except for shielding required only during partial discharge measurement.

Bushings and tap-changers are specified, designed and tested in accordance with the relevant IEC standards. The dielectric tests on the complete transformer constitute a check on the correct application and installation of these components. In the case of tap-changers which according to IEC 60214-1 are not subjected to dielectric routine tests at the tap-changer manufacturer's works then the tests performed according to this standard also serve as the only dielectric tests routinely performed on this component.

The temperature of the insulation system shall not be less than 10 °C during the tests, but temperatures higher than those given in IEC 60076-1 may be used.

The transformer shall be completely assembled as in service in respect of all elements that might influence the dielectric strength of the transformer. It is normally assumed that the insulating liquid or gas is not circulated during the tests and coolers do not need to be assembled. Any equipment designed to collect or detect free gas produced by faults in the insulation shall be installed and monitored during the tests. If free gas is detected during any test, the nature and cause of the gas shall be investigated and any further actions shall be agreed between purchaser and manufacturer.

NOTE 1 External overvoltage protection devices such as surge arresters do not need to be assembled and bushing spark gaps can be removed or their spacing increased to avoid operation during the tests.

NOTE 2 It is common practice for larger transformers for oil samples to be taken for dissolved gas analysis before and after dielectric tests.

Liquid immersed transformers shall be tested with the same type (mineral, ester, silicone, etc.) and specification (with respect to the properties that might affect the test performance) of liquid that it will contain in service.

NOTE 3 Some purchasers can require that the insulating liquid be circulated on OD cooled transformers during an IVPD test to detect the possibility of static electrification, but this is a very specific requirement and is not covered by this standard.

Transformers for cable box connection or direct connection to metal-enclosed SF₆ installations should be designed so that temporary connections can be made for dielectric tests, using temporary bushings, if necessary. By agreement between manufacturer and purchaser, the service liquid to SF₆ bushings may be replaced by appropriate liquid to air bushings for test, in this case the design of the end of the bushing inside the transformer including the positions of the live parts and the clearances of the substitute bushings inside the transformer shall be the same (within the normal variation of dimensions of the bushing associated with manufacturing tolerances) as those of the in-service bushings.

When the manufacturer intends to use non-linear elements (for example surge arresters or spark gaps), built into the transformer or tap-changer or externally fitted, for the limitation of overvoltage transients, this shall be brought to the purchaser's attention by the manufacturer at the tender and order stage and shall be indicated on the transformer rating plate circuit diagram.

If any terminals of the transformer are to be left open when the transformer is energised in service then consideration needs to be given to the possibility of a transferred voltage occurring on the open terminals, see Annex B. During the lightning impulse tests all non-tested line and neutral terminals are normally connected to earth, see Clause 13.

5 Highest voltage for equipment and rated insulation level

A value of highest voltage for equipment U_m (see Clause 3) is assigned to both the line and neutral end of each winding, see IEC 60076-1.

The rules for dielectric testing depend on the value of U_m . When rules about tests for different windings in a transformer are in conflict, the rule for the winding with the highest U_m value shall apply for the whole transformer.

Series windings (for example found in autotransformers and phase shifting transformers) where the rated voltage of the winding is less than the rated voltage of the system, shall be assigned a value of U_m corresponding to the rated voltage of the highest voltage system to which the winding is connected.

Standardized values of U_m are listed in Table 2. Unless otherwise specified, the value to be used for a transformer winding is the one equal to, or nearest above, the value of the rated voltage of the winding.

NOTE 1 Single-phase transformers intended for connection in star to form a three-phase bank are designated by phase-to-phase rated voltage divided by $\sqrt{3}$, for example $400/\sqrt{3}$ kV. The phase-to-phase value determines the choice of U_m in this case, consequently, $U_m = 420$ kV (see also IEC 60076-1). The same principle applies to single-phase transformers intended for use in a single phase system in that the maximum phase to earth voltage is multiplied by $\sqrt{3}$ to obtain the equivalent U_m in order to define the test voltages.

NOTE 2 For transformer windings intended to be used for example in railway supply applications where two opposite phase to earth voltages are supplied, U_m relates to the phase to phase voltage unless otherwise specified.

NOTE 3 It might happen that certain tapping voltages are chosen slightly higher than a standardized value of U_m , but the system to which the winding will be connected has a system highest voltage which stays within the standard value. The insulation requirements are to be coordinated with actual conditions, and therefore this standard value can be accepted as U_m for the transformer, and not the nearest higher value.

NOTE 4 In certain applications with very special conditions the specification of other combinations of withstand voltages can be justified. In such cases, general guidance should be obtained from IEC 60071-1.

NOTE 5 In certain applications, delta-connected windings are earthed through one of the external terminals. In those applications, a higher withstand voltage with respect to the highest voltage for equipment U_m can be required for this winding and would need to be agreed between manufacturer and purchaser.

The highest voltage for equipment U_m and the rated insulation level (the set of assigned rated withstand voltages) determine the dielectric characteristics of a transformer. These characteristics are verified by a set of dielectric tests, see Clause 7.

The value of U_m and the rated insulation level which are assigned to each winding of a transformer are part of the information to be supplied with an enquiry and with an order. If there is a winding with non-uniform insulation, the assigned U_m and the rated insulation level of the neutral terminal may also be specified by the purchaser, see 7.4.

The rated insulation level shall be characterised as follows:

U_m / SI / LI / LIC / AC with the associated values (see examples below) for the line terminals of each winding

If the winding does not have an assigned SI or LIC withstand level then the abbreviation is omitted from the rating so for terminals without an assigned switching impulse withstand level or chopped wave lightning impulse withstand level and for neutral terminals the abbreviation would be:

U_m / LI / AC together with the associated values

If the neutral terminal of a winding has the same rated insulation level as the line terminal then the rated insulation level of the neutral does not need to be shown separately.

The abbreviations here and in the examples below have the following meaning:

- SI is the rated switching impulse withstand voltage level for the line terminals of the winding with the highest U_m ;
- LI is the rated lightning impulse withstand voltage level for the terminal of each individual winding;
- LIC is the rated lightning impulse withstand voltage level for the line terminals of each individual winding if a chopped wave lightning impulse test was performed;
- AC is the highest rated AC withstand voltage level to earth designed for the terminals of each winding.

NOTE 6 The AC is the value for which the transformer is designed, this is generally the highest AC voltage required to be achieved on test.

- HV high voltage;
- LV low voltage;
- MV medium voltage (intermediate voltage IEC 60076-1);
- N neutral.

The rated withstand voltages for all windings shall appear on the rating plate.

The principles of the standard abbreviated notation are shown in some examples below.

EXAMPLE 1

Transformer with a nominal rated voltage of 66 / 11 kV U_m (HV) = 72,5 kV and U_m (LV) = 12 kV, both uniformly insulated, Y connected, the rating plate would read:

HV U_m 72,5 / LI 325 / AC 140 kV
LV U_m 12 / LI 75 / AC 28 kV

EXAMPLE 2

U_m (HV) line = 245 kV, Y connected (220 kV rated voltage);

U_m (HV) neutral = 52 kV;

U_m (MV) line = 72,5 kV, uniform insulation, Y connected (LIC not specified);

U_m (LV) line = 24 kV, D connected LIC not required.

The rating plate would read:

HV U_m 245 / SI 750 / LI 950 / LIC 1045 / AC 395 kV
HVN U_m 52 / LI 250 / AC 95 kV
MV U_m 72,5 / LI 325 / AC 140 kV
LV U_m 24 / LI 125 / AC 50 kV

6 Transformers with re-connectable windings

Unless otherwise specified, windings which are specified to be capable of being connected in more than one configuration for service shall be tested in each configuration.

7 Dielectric tests

7.1 Overview

The dielectric capability of the transformer insulation is verified by dielectric tests. The following is a general explanation of the different tests.

– **Full wave lightning impulse test for the line terminals (LI)**, see 13.2

The test is intended to verify the capability of the transformer to withstand fast rise time transients in service typically associated with lightning strikes. The test verifies the withstand strength of the transformer under test, when the impulse is applied to its line terminals. The test contains high frequency voltage components and produces non-uniform stresses in the winding under test different to those for an alternating voltage test.

– **Chopped wave lightning impulse test for the line terminals (LIC)**, see 13.3

As well as covering the intention of the LI test, this test is intended to verify the capability of the transformer to withstand some high frequency phenomena that may occur in service. For this test the lightning impulse test includes both full wave impulses and impulses chopped on the tail to produce a very high rate of change of voltage. The chopped wave test voltage impulse has a higher peak value and contains higher frequency components than the full wave impulse.

– **Lightning impulse test for the neutral terminal (LIN)**, see 13.4

The test is intended to verify the impulse withstand voltage of the neutral terminal and its connected winding(s) to earth and other windings, and along the winding(s) under test.

– **Switching impulse test for the line terminal (SI)**, see Clause 14

The test is intended to verify the capability of the transformer to withstand slow rise time transient voltages typically associated with switching operations in service. The test verifies the switching impulse withstand strength of the line terminals and the connected winding(s) to earth and other windings. The test also verifies the withstand strength between phases and along the winding(s) under test. This is a single-phase test. The voltage is inductively distributed through all windings of the transformer, line terminals are open circuit for the test and the line terminals of the tested phase experience a voltage during the test approximately determined by the transformer turns ratio.

The voltage distribution in the tested phase is similar to that experienced during an induced voltage withstand test.

– **Applied voltage test (AV)**, see Clause 10

The test is intended to verify the alternating voltage withstand strength of the line and neutral terminals and their connected windings to earth and other windings. The voltage is applied to all the terminals of a winding, including the neutral, simultaneously so there is no turn-to-turn voltage.

– **Line terminal AC withstand voltage test (LTAC)**, see Clause 12

The test is intended to verify the alternating voltage (AC) withstand strength of each line terminal to earth. During the test, voltage appears at one or more of the line terminals. The test allows the line terminals of a transformer with non-uniform insulation to be tested at the applied voltage test level applicable to the line terminals.

– **Induced voltage withstand test (IVW)**, see 11.2

The test is intended to verify the alternating voltage withstand strength of each line terminal and its connected winding(s) to earth and other windings, along the winding(s) under test and the withstand strength between phases. The test is performed with the transformer connected as for service. During the test, symmetrical voltages appear at all the line terminals and between turns, with no voltage at the neutral. The test is performed with a three phase voltage on three phase transformers.

– **Induced voltage test with PD measurement (IVPD)**, see 11.3

This test is intended to verify that the transformer will be free of harmful partial discharges under normal operating conditions. The test voltage is applied in the same way as the voltage that the transformer will experience in service. During the test, symmetrical voltages appear at all the line terminals and between turns, with no voltage at the neutral. The test is performed with a three phase voltage on three phase transformers.

– **Auxiliary wiring insulation test (AuxW)**, see Clause 9

This test verifies the insulation of the auxiliary wiring of the transformer that is not connected to the windings.

– **Lightning impulses applied to two or more terminals simultaneously (LIMT)**, see 13.1.4.3

This test verifies that the transformer can withstand the internal voltage rises that may occur if two or more terminals are subjected to a lightning impulse simultaneously. The test is only applicable to some special types of transformer with either a series winding that may be shorted in service (for example some phase shifting transformers with an on-load bypass) or where impulses on two or more terminals may occur simultaneously in service.

NOTE This test is also referred to as a 'double-ended lightning impulse test'.

7.2 Test requirements

7.2.1 General

The requirements for dielectric tests, both the required tests and the test voltage levels, depend on the highest voltage for equipment U_m for the highest voltage winding of the particular transformer. The required tests are summarised in Table 1 and specific requirements are given in 7.3.

NOTE Lightning impulses applied to two or more line terminals simultaneously is a special test for only a few special types of transformer irrespective of U_m and is not included in the table for clarity.

Any additional tests above the requirements of this standard and the test voltage levels shall be specified by the purchaser at the time of enquiry and order since they may affect the transformer design (see Annex C).

Reference shall be made to IEC 60060-1 for details of the tests. Where tolerances on test parameters and values are not specifically given in this standard then the values given in IEC 60060-1 shall be used.

Table 1 – Requirements and tests for different categories of transformers based on the U_m of the highest voltage winding

	$U_m \leq 72,5 \text{ kV}$	$72,5 \text{ kV} < U_m \leq 170 \text{ kV}$		$U_m > 170 \text{ kV}$
Insulation	Uniform	Uniform	Non-uniform	Uniform and non-uniform
Full wave lightning impulse test for the line terminals (LI)	Type	Routine	Routine	Not applicable (included in LIC)
Chopped wave lightning impulse test for the line terminals (LIC)	Special	Special	Special	Routine
Lightning impulse test for the neutral terminals (LIN)	Special	Special	Special	Special
Switching impulse test for the line terminal (SI)	Not applicable	Special	Special	Routine
Applied voltage test (AV)	Routine	Routine	Routine	Routine
Induced voltage withstand test (IVW)	Routine	Routine	Routine	Not applicable
Induced voltage test with PD measurement (IVPD)	Special ^a	Routine ^a	Routine ^a	Routine
Line terminal AC withstand voltage test (LTAC)	Not applicable	Special	Routine ^b	Special
Auxiliary wiring insulation test (AuxW)	Routine	Routine	Routine	Routine
^a The requirements of the IVW test can be incorporated in the IVPD test so that only one test is required. ^b The LTAC test for this category of transformers can be replaced by a switching impulse test by agreement between manufacturer and purchaser.				

7.2.2 Test voltage levels

Levels of standard test voltages, identified by the highest voltage for equipment U_m of a winding are given in Table 2. The choice between the different levels of test voltages in these tables depends on the severity of overvoltage conditions to be expected in the system and on the importance of the particular installation. Guidance may be obtained from IEC 60071-1.

All test voltages are phase to earth.

The lowest values given in Table 2 for a particular value of U_m represent the minimum test voltage levels and shall be used if nothing else is specified. In general the values given in each row in Table 2 are co-ordinated. If only a lightning impulse level is specified then the other values on the same row shall be used. The purchaser may specify any value higher than the minimum for the particular U_m for each test, preferably standard values for coordination, but not necessarily the values from a single row in Table 2. If higher levels are specified this shall be stated in the enquiry and order.

If, under special circumstances, the minimum levels given in Table 2 are considered too high by the purchaser then the values in Table 3 may be used. The values in Table 3 may only be used if special precautions have been taken to avoid overvoltage conditions beyond the capability of the transformer and either extensive studies have been completed or the values used represent proven existing practice applicable to the installation.

NOTE Certain installation conditions, particularly where energisation of the transformer is from the remote end of a cable or a long overhead line, can lead to severe exposure to overvoltages which might be frequent and repetitive. In such cases, higher test voltages, lightning impulse, switching impulse and other tests on individual units could be agreed between manufacturer and purchaser. For example a winding with a $U_m < 1,1 \text{ kV}$ might be tested at the values appropriate to a winding with a U_m of 3,6 kV. The specific voltage-time characteristic of the overvoltage is an important consideration when deciding the type and level of the test required to assure satisfactory operation.

In particular, failures have been reported at $U_m = 36$ kV and below where the transformer is energised/de-energised by a vacuum type circuit breaker from the remote end of a cable because a resonant condition might exist causing re-ignitions and repetitive transients. In certain cases increasing the insulation level might not be sufficient and other methods such as the installation of a snubber circuit could be considered. Further information is contained in IEEE C57.142:2010 and CIGRE report 12-14.

Table 2 – Test voltage levels (1 of 2)

Highest Voltage for equipment winding U_m kV	Full Wave Lightning Impulse (LI) kV	Chopped Wave Lightning Impulse (LIC) kV	Switching impulse (SI) kV	Applied voltage or line terminal AC withstand (AV) (LTAC) kV
<1,1	–	–	–	3
3,6	20	22	–	10
	40	44	–	10
7,2	60	66	–	20
	75 ^a	83 ^a	–	20
12	75	83	–	28
	95	105	–	28
	110 ^a	121 ^a	–	34 ^a
17,5	95	105	–	38
	125 ^a	138 ^a	–	38
24	125	138	–	50
	145	160	–	50
	150 ^a	165 ^a	–	50
36	170	187	–	70
	200 ^a	220 ^a	–	70
52	250	275	–	95
72,5	325	358	–	140
	350 ^a	385 ^a	–	140
100	450	495	375 ^a	185
123	550	605	460 ^a	230
145	550	605	460 ^a	230
	650	715	540 ^a	275
170	650	715	540 ^a	275
	750	825	620 ^a	325
245	850	935	700 ^a	360
	950	1 045	750 ^a	395
	1 050	1 155	850 ^a	460
300	950	1 045	750	395
	1 050	1 155	850	460
362	1 050	1 155	850	460
	1 175	1 290	950	510
420	1 175	1 290	950	510
	1 300	1 430	1 050	570
	1 425	1 570	1 175 ^a	630

Table 2 (2 of 2)

Highest Voltage for equipment winding U_m kV	Full Wave Lightning Impulse (LI) kV	Chopped Wave Lightning Impulse (LIC) kV	Switching impulse (SI) kV	Applied voltage or line terminal AC withstand (AV) (LTAC) kV
550	1 300	1 430	1 050	570
	1 425	1 570	1 175	630
	1 550	1 705	1 300 ^a	680
	1 675 ^a	1 845 ^a	1 390 ^a	-
800	1 800	1 980	1 425	-
	1 950	2 145	1 550	-
	2 050 ^a	2 255 ^a	1 700 ^a	-
	2 100	2 310	1 675 ^a	-
1 100	1 950	2 145	1 425	-
	2 250	2 475	1 800	-
1 200	2 250	2 475	1 800	-

^a These values are not given in IEC 60071-1:2011 for the particular value of U_m but are included either because they represent common practice in some parts of the world or for some switching impulse levels, because they represent a co-ordinated value for a particular value of lightning impulse level.

Table 3 – Test voltage levels used in special cases

Highest Voltage for equipment winding U_m kV	Full Wave Lightning Impulse (LI) kV	Chopped Wave Lightning Impulse (LIC) kV	Switching impulse (SI) kV	Applied voltage or line terminal AC withstand (AV) (LTAC) kV
7,2	40	44	-	20
12	60	66	-	28
17,5	75	83	-	38
24	95	105	-	50
36	145	160	-	70
60 ^a	280 ^a	308 ^a	230 ^a	115 ^a
123 ^b	450 ^b	495 ^b	375 ^a	185 ^b
170 ^b	550 ^b	605 ^b	460 ^a	230 ^b
245	650 ^b	715 ^b	550 ^a	275 ^b
	750 ^b	825 ^b	620 ^a	325 ^b
300	850	935	750	395
362	950	1 045	850	395
420	1 050	1 155	850	460
550	1 175	1 290	950	510

^a These values are not given in IEC 60071-1:2011 for the particular value of U_m but are included because they represent existing practice in some parts of the world.

^b these values require special consideration, refer to IEC 60071-1:2011

7.2.3 Test sequence

The tests shall be performed in the sequence given below:

- a) lightning impulse tests (LI, LIC, LIN, LIMT);
- b) switching impulse (SI);
- c) applied voltage test (AV);
- d) line terminal AC withstand test (LTAC);
- e) induced voltage withstand test (IVW);
- f) induced voltage test with partial discharge measurement (IVPD).

NOTE This is a comprehensive list, not all these tests will be applicable to a particular transformer.

By agreement between the manufacturer and purchaser, the switching impulse test may be performed before the lightning impulse test.

If an IVPD test is to be performed then by agreement between the manufacturer and purchaser, the test sequence may be varied except that the IVPD test shall be the last dielectric test.

7.3 Test requirements for specific transformers

7.3.1 Tests for transformers with $U_m \leq 72,5$ kV

7.3.1.1 Routine tests

- a) Applied voltage test (AV)

An applied voltage test shall be performed according to the method given in Clause 10 on each separate winding of the transformer. Test voltages are given in Table 2.

NOTE Transformers with $U_m \leq 72,5$ kV are expected to have uniform winding insulation to satisfy this test.

- b) Induced voltage withstand test (IVW)

An induced voltage withstand test shall be performed according to the method given in 11.2 with a (phase to earth) test voltage of $(2 \times U_r) / \sqrt{3}$. If agreed by the purchaser this test may be substituted by an IVPD test with an enhancement voltage of $(2 \times U_r) / \sqrt{3}$ see 7.3.1.3 a).

7.3.1.2 Type tests

Full wave lightning impulse test (LI)

A full wave lightning impulse test shall be carried out on the line terminals using the method given in 13.1 and 13.2. Test voltages are given in Table 2.

7.3.1.3 Special tests

- a) Induced voltage test with partial discharge measurement (IVPD)

If specified by the purchaser, a test shall be carried out according to the method given in 11.3, with an enhancement (phase to earth) voltage level of $(1,8 \times U_r) / \sqrt{3}$ and a PD measurement voltage of $(1,58 \times U_r) / \sqrt{3}$. Alternative higher voltage levels may be used if specified by the purchaser. In particular an enhancement voltage of $(\sqrt{3} \times U_m) / \sqrt{3}$ and a PD measurement voltage of $(1,5 \times U_m) / \sqrt{3}$ may be used if higher.

If an enhancement voltage level of $(2 \times U_r) / \sqrt{3}$ is used this test can substitute for the routine induced voltage withstand test.

A shorter duration at the PD measurement voltage may be agreed between manufacturer and purchaser, a duration of 5 min is recommended.

- b) Chopped wave lightning impulse test (LIC)

If specified by the purchaser the full wave lightning impulse test shall be substituted by a chopped wave lightning impulse test according to the method given in 13.1 and 13.3.

The extension of the lightning impulse test to include impulses chopped on the tail as a special test is recommended in cases where the transformer is directly connected to GIS by means of liquid to SF6 bushings or when the transformer is protected by rod gaps.

c) Lightning impulse test on the neutral terminal (LIN)

If specified by the purchaser a full wave lightning impulse test shall be carried out on the neutral terminal according to the method given in 13.1 and 13.4. This normally applies if the neutral is not directly connected to earth in service.

d) Lightning impulses applied to multiple line terminals simultaneously (LIMT)

If specified by the purchaser an additional lightning impulse test on two or more terminals connected together shall be performed according to the method given in 13.1 with the test connections given in 13.1.4.3. If not otherwise specified the type of test is LI.

7.3.2 Tests on transformers with $72,5 \text{ kV} < U_m \leq 170 \text{ kV}$

7.3.2.1 Routine tests

a) Full wave lightning impulse test (LI)

A full wave lightning impulse test shall be carried out on the line terminals using the method given in Clause 13 Test voltages are given in Table 2.

b) Applied voltage test (AV)

An applied voltage test in accordance with the method given in Clause 10 shall be performed on each separate winding of the transformer. Test voltages are given in Table 2 for transformers with uniform insulation. For transformers with non-uniform insulation the test shall be carried out at the test voltage for the neutral terminal see 7.4.2.

c) Induced voltage withstand test (IVW)

An induced voltage withstand test shall be performed according to the method given in 11.2 with a (phase to earth) test voltage of $(2 \times U_r) / \sqrt{3}$. If agreed by the purchaser this test may be substituted by an IVPD test with an enhancement voltage $(2 \times U_r) / \sqrt{3}$, see e) below.

d) Line terminal AC withstand voltage test for non-uniformly insulated transformers (LTAC)

For windings with non-uniform insulation this test shall be performed at the test level given for the applied voltage test applicable to the line terminal in Table 2 using the method given in Clause 12. This test may be omitted if a switching impulse test is performed by agreement between manufacturer and purchaser.

e) Induced voltage test with partial discharge measurement (IVPD)

A test shall be carried out according to the method given in 11.3, with an enhancement (phase to earth) voltage level of $(1,8 \times U_r) / \sqrt{3}$ and a PD measurement voltage of $(1,58 \times U_r) / \sqrt{3}$. Alternative higher voltage levels may be used if specified by the purchaser. In particular an enhancement voltage of $(\sqrt{3} \times U_m) / \sqrt{3}$ and a PD measurement voltage of $(1,5 \times U_m) / \sqrt{3}$ may be used if higher.

If an enhancement voltage level of $(2 \times U_r) / \sqrt{3}$ is used this test can substitute for the routine induced voltage withstand test.

7.3.2.2 Special tests

a) Switching impulse test (SI)

If specified by the purchaser a switching impulse test using the method given in Clause 14 shall be performed on the line terminals. The test voltage is given in Table 2. If this test is carried out, then the Line Terminal AC Withstand Test (LTAC) may be omitted by agreement.

b) Chopped wave lightning impulse test (LIC)

If specified by the purchaser the full wave lightning impulse test shall be substituted by a chopped wave lightning impulse test according to the method given in 13.1 and 13.3.

The extension of the lightning impulse test to include impulses chopped on the tail as a special test is recommended in cases where the transformer is directly connected to GIS by means of liquid to SF6 bushings or when the transformer is protected by rod gaps.

c) Line terminal AC withstand voltage test (LTAC)

If specified by the purchaser for windings with uniform insulation, this test shall be performed at the test level given for the applied voltage test applicable to the line terminal in Table 2 using the method given in Clause 12.

d) Lightning impulse test on the neutral terminal (LIN)

If specified by the purchaser a full wave lightning impulse test shall be carried out on the neutral terminal. This normally applies if the neutral is not directly connected to earth in service.

e) Lightning impulses applied to multiple line terminals simultaneously (LIMT)

If specified by the purchaser an additional lightning impulse test on two or more terminals connected together shall be performed according to the method given in 13.1 with the test connections given in 13.1.4.3. If not otherwise specified the type of test is LI.

7.3.3 Tests on Transformers with $U_m > 170$ kV

7.3.3.1 Routine tests

a) Chopped wave lightning impulse test (LIC)

A chopped wave lightning impulse test shall be carried out on all line terminals with a $U_m > 170$ kV using the method given in Clause 13. A lightning impulse test (LI) shall be carried out on all line terminals with $U_m \leq 170$ kV using the method given in Clause 13. Test voltages are given in Table 2. If required by the purchaser in the contract, LIC tests shall additionally be carried out on line terminals with $U_m \leq 170$ kV.

b) Switching impulse test (SI)

A switching impulse test using the method given in Clause 14 shall be performed on the line terminals. The test voltage is given in Table 2.

c) Applied voltage test (AV)

An applied voltage test shall be performed in accordance with the method given in Clause 10 on each separate winding of the transformer. Test voltages are given in Table 2 for transformers with uniform insulation. For transformers with non-uniform insulation the test shall be carried out at the test voltage for the neutral terminal see 7.4.2.

d) Induced voltage test with partial discharge measurement (IVPD)

A test shall be carried out using the method given in 11.3, with an enhancement (phase to earth) voltage level of $(1,8 \times U_r) / \sqrt{3}$ and a one hour PD measurement voltage of $(1,58 \times U_r) / \sqrt{3}$. Alternative higher voltage levels may be used if specified by the purchaser. In particular an enhancement voltage of $(\sqrt{3} \times U_m) / \sqrt{3}$ and a one hour PD measurement voltage of $(1,5 \times U_m) / \sqrt{3}$ may be used if higher.

NOTE For three phase transformers, the voltage between the phases at the IVPD-enhancement level can be higher than the phase to earth AC withstand voltages given in Table 2 – Test voltage levels.

7.3.3.2 Special tests

a) Lightning impulse test on the neutral terminal (LIN)

If specified by the purchaser a full wave lightning impulse test shall be carried out on the neutral terminal. This normally applies if the neutral is not directly connected to earth in service.

b) Line terminal AC withstand voltage test for non-uniformly insulated windings (LTAC)

If specified by the purchaser this test shall be performed at the test level given for the applied voltage test applicable to the line terminal in Table 2 using the method given in Clause 12.

c) Lightning impulses applied to multiple line terminals simultaneously (LIMT)

If specified by the purchaser an additional lightning impulse test on two or more terminals connected together shall be performed according to the method given in 13.1 with the test connections given in 13.1.4.3. If not otherwise specified the type of test is LIC.

7.4 Assigning U_m and test voltages to the neutral terminal of a winding

7.4.1 Transformers with $U_m \leq 72,5$ kV

The neutral shall be tested at the applied voltage test level for the line terminals. If a lightning impulse test on the neutral terminal is specified then the test level shall be given in the enquiry and order.

NOTE Transformers with $U_m \leq 72,5$ kV need to be designed with uniform winding insulation to satisfy the test requirements.

7.4.2 Transformers with $U_m > 72,5$ kV

7.4.2.1 Directly earthed neutral terminal

If the neutral terminal is to be permanently connected to earth in service, either directly or through a current transformer, but without any intentionally added impedance in the connection then the applied voltage test voltage shall be at least 38 kV ($U_m \geq 17,5$ kV). Higher test levels may be specified.

No impulse test on the neutral terminal is recommended but it may be specified.

7.4.2.2 Neutral terminal not directly earthed

The U_m and test voltages for the neutral terminal shall be given by the purchaser at the time of enquiry and order. The U_m of the neutral depends on whether the neutral terminal is intended to be left open or earthed via an impedance (see Annex D). The value of U_m and the test voltages shall preferably be selected from Table 2. U_m shall in no case be less than 17,5 kV.

If a lightning impulse test on the neutral terminal is specified, then the test level shall be given in the enquiry and order, and the rated impulse withstand voltage of the neutral terminal shall be verified by the test described in 13.4. A chopped wave lightning impulse test on the neutral is not applicable.

8 Dielectric tests on transformers that have been in service

Any transformer that is to be regarded as complying with this standard in the same way as a new transformer (for example following a warranty repair or complete rewind and refurbishment intended to restore the transformer to the 'as new' condition) shall be subject to all the routine tests required by this standard for the transformer at 100 % of the required test voltage level after the repair or refurbishment is complete.

Any transformer that is repaired to restore its functionality (for example after a breakdown following many years in service) but is still to be regarded as compliant with this standard shall be subject to the tests described in this standard necessary to verify the repair at a test voltage of between 80 % and 100 % of the original test voltage level. As a general guide any new part of a repaired transformer should be tested at 100 %, but 80 % of the original test voltage level may be regarded as an adequate test voltage level for verifying that used parts or components are suitable for continued use. Where both old and new parts are tested at the same time then an agreement on the test voltage level shall be reached. The IVPD test shall be performed at

100 % of the original test voltage level. The partial discharge criteria may need to be modified depending on the circumstances of the test and this shall be subject to agreement.

9 Insulation of auxiliary wiring (AuxW)

The wiring for auxiliary power, and control circuitry shall be subjected to a 1 min AC separate source test of 2 kV to earth. The test is passed if no voltage collapse or other sign of breakdown occurs. The test shall be carried out at the manufacturer's works, unless the transformer is to be installed on-site by the manufacturer in which case the test may be performed on-site instead of in the factory. Wiring disconnected or removed for transport which has been subject to a 2 kV test at the factory shall be tested at site following erection using either a repeat of the 2 kV AC test or a 1 kV DC insulation resistance measurement with a minimum measured resistance of 1 M Ω .

The wiring for current transformer secondary windings shall be tested at 2,5 kV AC to earth for 1 min. The test shall be carried out at the manufacturer's works. If the current transformer knee-point voltage exceeds 2 kV AC the test shall be performed at 4 kV AC. The test is passed if no voltage collapse or other sign of breakdown occurs.

Motors and other apparatus for auxiliary equipment shall fulfil insulation requirements according to the relevant IEC standard (which are generally lower than the value specified for the wiring alone, and which may sometimes make it necessary to disconnect them in order to test the circuits). All solid state and microprocessor based devices shall be excluded from the test circuit. All three phase undervoltage relays and withdrawable type devices shall be removed from the test circuit.

NOTE It is normal practice for all the auxiliary wiring to be checked on-site at 1 kV DC for 1 min before energisation.

10 Applied voltage test (AV)

The test shall be carried out on each separate winding of the transformer in turn.

The full test voltage shall be applied for 60 s between all accessible terminals of the winding under test connected together and all accessible terminals of the remaining windings, core, frame and tank or casing of the transformer, connected to earth.

The test shall be made with an approximately sinusoidal single-phase alternating voltage at not less than 80 % of the rated frequency. The peak value of voltage shall be measured. The peak value divided by $\sqrt{2}$ shall be equal to the test value.

NOTE Approximately sinusoidal can be taken to mean that the peak value divided by $\sqrt{2}$ does not differ from the r.m.s value of the waveform by more than about 5 % (see IEC 60060-1), but wider deviations may be accepted.

The test shall commence at a voltage not greater than one-third of the specified test value, and the voltage shall be increased to the test value as rapidly as is consistent with measurement. At the end of the test, the voltage shall be reduced rapidly to less than one-third of the test value before switching off.

The test is successful if no collapse of the test voltage occurs.

For windings with non-uniform insulation, the test is carried out with the test voltage specified for the neutral terminal.

In transformers where windings having different U_m values are connected together within the transformer (usually auto-transformers), the test voltages shall be determined by the insulation of the common neutral and its assigned U_m .

11 Induced voltage tests (IVW and IVPD)

11.1 General

The test shall be carried out with any accessible neutral terminals and any other terminals that are normally at earth potential in service earthed. For three phase transformers a symmetrical three phase test voltage shall be used. Any line terminals not connected to the test supply shall be left open.

NOTE 1 When voltage is induced in a winding with no neutral connection, the voltages with respect to earth at each terminal of this winding will depend on the capacitances to earth and other windings. Any flashover from one of the line terminals to earth during the test can result in voltages exceeding the applied voltage test level appearing at the other terminals of the winding. Suitable precautions can be required to take account of this possibility.

During the test, the test voltage appropriate to a winding without voltage variation shall appear at the terminals of that winding so that the voltages between turns and between phases will have the same ratio between test voltage and rated voltage. The voltage shall either be measured on the highest voltage terminals, or if this is not practical the voltage shall be measured at the terminals of the transformer connected to the supply.

For transformers with tapplings, the test shall be carried out with the transformer on principal tap unless otherwise specified or agreed by the purchaser.

If the purchaser requires a specific test voltage for lower voltage windings higher than the voltage determined in this clause then this shall be clearly stated in the enquiry and tender and an agreement reached on the method of test and the test voltages that will appear on the higher voltage windings which may consequently exceed the specified test voltages.

The test shall be performed with the transformer excited exactly as it will be for service. The voltage may be induced from any winding or from a special winding or taps provided for test purposes.

An alternating voltage shall be applied to the terminals of one winding of the transformer. The form of the voltage shall be as nearly as possible sinusoidal and its frequency shall be sufficiently above the rated frequency to avoid excessive magnetizing current during the test.

The peak value, as defined in IEC 60060-1 divided by $\sqrt{2}$ and the r.m.s. value of the induced test voltage shall be measured and the lower of the peak value divided by $\sqrt{2}$ and the r.m.s. value shall be taken as the test value.

11.2 Induced voltage withstand test (IVW)

The test time at full test voltage shall be 60 s for any test frequency up to and including twice the rated frequency, unless otherwise specified. When the test frequency exceeds twice the rated frequency, the test time in seconds of the test shall be:

$$120 \times \frac{\text{rated frequency}}{\text{test frequency}}, \text{ but not less than } 15 \text{ s}$$

The test shall commence at a voltage not greater than one-third of the specified test value, and the voltage shall be increased to the test value as rapidly as is consistent with measurement. At the end of the test, the voltage shall be reduced rapidly to less than one-third of the test value before switching off.

The test is successful if no collapse of the test voltage occurs.

11.3 Induced voltage test with partial discharge measurement (IVPD)

11.3.1 General

When a particular type of bushing is specified by the purchaser that is expected to have a partial discharge level that will prevent accurate partial discharge measurements of the transformer on test it is permitted to exchange the bushings for a partial discharge free type during the testing of the transformer.

11.3.2 Test duration and frequency

The test time at the enhancement voltage shall be 60 s in case $U_m \leq 800$ kV and 300 s in case $U_m > 800$ kV for any test frequency up to and including twice the rated frequency, unless otherwise specified. When the test frequency exceeds twice the rated frequency, the test time in seconds of the test shall be:

$$120 \times \frac{\text{rated frequency}}{\text{test frequency}}, \text{ but not less than 15 s for } U_m \leq 800 \text{ kV}$$

or

$$600 \times \frac{\text{rated frequency}}{\text{test frequency}}, \text{ but not less than 75 s for } U_m > 800 \text{ kV}$$

The duration of the test, except for the enhancement level, shall be independent of the test frequency

11.3.3 Test sequence

The test sequence shall be as follows:

- a) The voltage shall be switched on at a voltage not higher than $(0,4 \times U_r) / \sqrt{3}$.
- b) The voltage shall be raised to $(0,4 \times U_r) / \sqrt{3}$ and a background PD measurement shall be made and recorded.
- c) The voltage shall be raised to $(1,2 \times U_r) / \sqrt{3}$ and held there for a minimum duration of 1 min and only long enough to make a stable PD measurement.
- d) The PD level shall be measured and recorded.
- e) The voltage shall be raised to the one hour PD measurement voltage and held there for a minimum duration of 5 min and only long enough to make a stable PD measurement.
- f) The PD level shall be measured and recorded.
- g) The voltage shall be raised to the enhancement voltage and held there for the test time in 11.3.2.
- h) Immediately after the test time, the voltage shall be reduced without interruption to the one hour PD measurement voltage.
- i) The PD level shall be measured and recorded.
- j) The voltage shall be held at the one hour PD measurement voltage for a duration of at least one hour following the PD measurement.
- k) The PD level shall be measured and recorded every 5 min during the one hour period.
- l) After the last PD measurement in the one hour period the voltage shall be reduced to $(1,2 \times U_r) / \sqrt{3}$ and held there for a minimum duration of 1 min and only long enough to make a stable PD measurement.

- m) The PD level shall be measured and recorded.
- n) The voltage shall be reduced to $(0,4 \times U_r) / \sqrt{3}$ and the background PD level shall be measured and recorded.
- o) The voltage shall be reduced to a value below $(0,4 \times U_r) / \sqrt{3}$.
- p) The voltage shall be switched off.

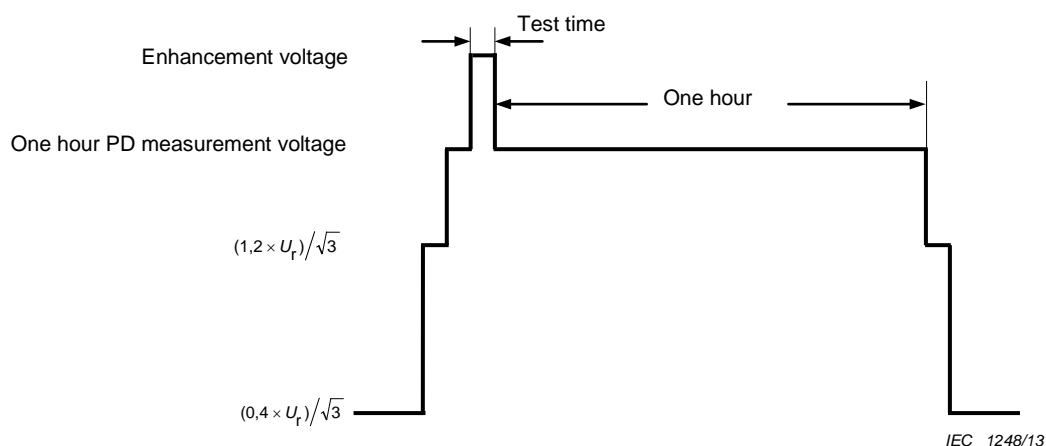
The partial discharge level shall be continuously observed on at least one measuring channel for the entire duration of the test.

During the test sequence the inception and extinction voltages of any significant PD activity should be noted to aid the evaluation of the test result if the test criteria are not met.

NOTE It can also be helpful to record the PD pattern (phase angle, apparent charge and number) of any significant PD activity to aid evaluation.

Enhancement voltage level and one hour PD measurement voltage are given in 7.3.1.3, 7.3.2.1 and 7.3.3.1 depending on the U_m of the transformer.

The main features of the test sequence are illustrated in Figure 1.



NOTE Enhancement voltage level and one hour PD measurement voltage are given in 7.3.1.3, 7.3.2.1 and 7.3.3.1

Figure 1 – Time sequence for the application of test voltage for induced voltage test with partial discharge measurement (IVPD)

11.3.4 Partial discharge (PD) measurement

Partial discharges shall be measured by a method according to IEC 60270.

Each PD measurement channel including the associated bushing or coupling capacitor shall be calibrated in terms of apparent charge (pC) according to the method given in IEC 60270.

The PD measurement shall be given in pC and shall refer to the highest steady-state repetitive impulses indicated by the measuring instrument.

Occasional bursts of high partial discharge level may be disregarded.

For each required PD measurement step in the test sequence, PD measurements shall be made and recorded on all the line terminals equipped with bushings with a $U_m \geq 72,5$ kV, during the test, however if there are more than six such terminals then only six measurements need to be made (one on each of the highest voltage terminals) unless otherwise specified.

NOTE Bushings with $U_m \geq 72,5$ kV are equipped with test taps according to IEC 60137 which can be used for the measurement, if this test is specified as a special test for transformers with a $U_m < 72,5$ kV then the method of measurement will have to be agreed between the manufacturer and purchaser.

11.3.5 Test acceptance criteria

The test can only be considered valid if the measured background PD level does not exceed 50 pC at both the beginning and the end of the test. For tests on shunt reactors a background PD level of up to 100pC may be accepted.

NOTE The higher background level for shunt reactors is because filtering of the test supply might not be possible where high current and high voltage is required.

The test is successful if all the following criteria are fulfilled:

- a) no collapse of the test voltage occurs;
- b) none of the PD levels recorded during the one hour period exceed 250 pC;
- c) the PD levels measured during the one hour period do not exhibit any rising trend and no sudden sustained increase in the levels occur during the last 20 min of the test;
- d) the measured PD levels during the one hour period do not increase by more than 50 pC;
- e) the PD level measured at a voltage level of $(1,2 \times U_T) / \sqrt{3}$ after the one hour period does not exceed 100 pC.

If the criteria c) or d) are not met, the one hour period may be extended and these criteria will be considered to have been met if they are fulfilled for a continuous period of one hour.

As long as no breakdown occurs, and unless very high partial discharges are sustained for a long time, the test is regarded as non-destructive. A failure to meet the partial discharge acceptance criteria shall therefore not warrant immediate rejection, but lead to consultation between purchaser and manufacturer about further investigations. Suggestions for such procedures are given in Annex A.

12 Line terminal AC withstand test (LTAC)

The test shall be arranged so that the test voltage appears between the tested terminal and earth. Each phase terminal of the tested winding shall be tested in turn. The test time, frequency and voltage application shall be as given for the induced voltage withstand test see 11.2.

For transformers with taps and a non-uniformly insulated lower voltage winding, the tap position for test shall be selected so that when the required test voltage appears on the highest voltage winding terminals, the voltage appearing on the lower voltage winding terminals shall be as close as possible to the required applied test value. For transformers with a uniformly insulated lower voltage winding subject to an applied voltage test, the tap position may be chosen by the manufacturer.

The test is successful if no collapse of the test voltage occurs.

NOTE This test is intended only as a withstand test for each line terminal of a non-uniformly insulated transformer to earth, it is not intended to test the phase to phase or turn to turn insulation so the test arrangement can be made in any convenient way, for example with voltage at the neutral to reduce the turn to turn voltage and the test will normally be carried out as three single phase tests. Under normal circumstances the switching impulse test fully covers the intent of this test. If required by the purchaser partial discharge measurements can be made during this test.

13 Lightning impulse tests (LI, LIC, LIN, LIMT)

13.1 Requirements for all lightning impulse tests

13.1.1 General

General definitions of terms related to impulse tests and requirements for test circuits are given in IEC 60060-1. General definitions of terms related to performance tests and routine checks on approved measuring devices are given in IEC 60060-2. Further information is given in IEC 60076-4.

For liquid-immersed transformers, the test voltage is normally of negative polarity, because this reduces the risk of erratic external flashovers in the test circuit. One, more or all of the impulses may be specified by the purchaser to be of positive polarity. If positive impulses are required by the purchaser this shall be stated in the enquiry and order. If a mixture of impulse polarities are used then additional reference impulses will be required and the test sequence shall be agreed between the manufacturer and purchaser.

Before an impulse of opposite polarity is applied, sufficient time should be allowed for any residual charge to dissipate.

13.1.2 Tap positions

If the tapping range is $\pm 5\%$ or less and the rated power of the transformer is $\leq 2\,500$ kVA then, the lightning impulse tests shall be made with the transformer connected on the principal tapping.

If the tapping range is larger than $\pm 5\%$ or the rated power of the transformer is $> 2\,500$ kVA then, unless otherwise agreed, the two extreme tappings and the principal tapping shall be used, one tapping for each of the three individual phases of a three-phase transformer or the three single-phase transformers designed to form a three-phase bank.

Alternatively if specified by the purchaser and in special cases such as one single phase transformer, or multiple tap-changers, or when the tapping-range is not symmetrical, the tap-position which gives the highest internal voltages (determined either by calculation or by performing low voltage impulse measurements) shall be used. If different tap-positions give highest internal voltages in different parts of the insulation then by agreement those different tap positions may be tested, one on each phase of a three phase transformer.

NOTE Particular attention is drawn to the difference between the raise and lower positions at the change-over tap position(s) of a reversing type tapping winding or of a coarse-fine type tapping winding as these give different internal voltages.

In the case of a coarse-fine type tapping winding, if the tap-changer diverter is provided with a non-linear element or arcing gap, which might operate if the transformer is tested on a particular tap-position, then an alternative tap-position may be chosen. Guidance is given in IEC 60076-4.

13.1.3 Records of tests

The applied test voltage shall be recorded using a measurement system according to IEC 60060-2. The records obtained shall clearly show the applied voltage impulse shape (front time, time-to-half value and amplitude).

The recorded curve and the extreme value of the recorded curve (as defined in IEC 60060-1) shall be presented in the test record.

The value of the test voltage (after the application of any filtering or correction for overshoot, U_t see IEC 60060-1) shall be reported in the test record.

At least one more measurement channel shall be used. In most cases an oscillogram of the current flowing to earth from the tested winding (neutral current) or the capacitive probe current, i.e. the current transferred to the non-tested and shorted winding, will represent the best sensitivity for fault indication. The current flowing from tank to earth, or the transferred voltage in a non-tested winding, are examples of alternative suitable measuring quantities. The detection method chosen shall be agreed between manufacturer and purchaser.

Further recommendations about failure detection, suitable time-base durations, etc. are given in IEC 60076-4.

13.1.4 Test connections

13.1.4.1 Test connections during tests on line terminals

The impulse test sequence is applied to each of the line terminals of the tested winding in succession. The other line terminals of the transformer shall be earthed directly or, if needed to achieve the required waveshape, through an impedance. The impedance shall not exceed the surge impedance of the connected line (if a value is supplied by the purchaser) or 400 Ω whichever is lower. In all circumstances, the voltage appearing during the impulse test at the other line terminals shall not be more than 75 % of their rated lightning impulse withstand voltage for star-connected windings, or 50 % for delta-connected windings. The lowest value of impedance at each terminal needed to achieve the required waveshape shall be used.

If the winding has a neutral terminal, the neutral shall be earthed directly or through a low impedance such as a current measuring shunt. The tank shall be earthed. If the required waveshape cannot be obtained without the use of a resistor between neutral and earth, then an additional complete impulse test sequence shall be applied. In this case the first impulse test sequence tests the winding at the full voltage without the resistor but the required waveshape may not be achieved and the second sequence with the resistor achieves the waveshape. Chopped waves, if required, would not be repeated in the second sequence.

When a transformer is fitted with internal non-linear elements such as surge arresters which will limit the voltage on internal parts during the impulse test then the provisions of 13.2.3 apply. Any such internal non-linear elements which are present in the service condition shall be present during the tests. External non-linear elements and other external voltage control elements such as capacitors shall be disconnected for test.

The impulse circuit and measuring connections shall remain unchanged during reference and full voltage tests.

Exceptions from this main procedure are given in 13.3.2 and 13.3.3.

NOTE If an impulse test is required by the purchaser on an LV winding with $U_m \leq 1,1$ kV then this is normally applied to all the LV terminals (including the LV neutral) connected together with the higher voltage terminals earthed.

13.1.4.2 Test connections for lightning impulse on the neutral

Lightning impulses are applied directly to the neutral with all other terminals earthed.

When a transformer is fitted with internal non-linear elements such as surge arresters which will limit the voltage on internal parts during the impulse test then the provisions of 13.2.3 apply. Any such internal non-linear elements which are present in the service condition shall be present during the tests. External non-linear elements shall be disconnected for test.

For transformers having a tapped winding near the neutral end of the winding, the tapping connection with the maximum turns ratio shall be chosen for the impulse test, if not otherwise agreed between purchaser and manufacturer.

The impulse circuit and measuring connections shall remain unchanged during reference and full voltage tests.

13.1.4.3 Test connections for lightning impulses applied to multiple line terminals simultaneously (LIMT)

The purchaser shall specify the terminals which are to be connected together for this test.

Lightning impulses shall be applied simultaneously to the specified line terminals connected together with the other terminals earthed. The test levels and details of the test arrangement shall be agreed. The test shall be carried out on each phase in turn.

NOTE The voltages appearing within the winding during this test can significantly exceed the terminal voltages during this test.

13.2 Full wave lightning impulse test (LI)

13.2.1 Wave shape, determination of test voltage value and tolerances

The test impulse shall be a full standard lightning impulse: $1,2 \pm 30 \% / 50 \mu\text{s} \pm 20 \%..$

The test voltage value shall be the test voltage value as defined in IEC 60060-1 (after the test voltage function is applied). If the maximum relative overshoot magnitude is 5 % or less, the test voltage value may be taken as the extreme value as defined in IEC 60060-1.

The tolerance on the test voltage value is $\pm 3 \%$.

It is important that the manufacturer assesses the adequacy of the test equipment to achieve a waveshape within the tolerances for the particular combination of transformer and test equipment at the bid stage and has a reasonable expectation of meeting the requirements. In circumstances where the manufacturer believes that it is not reasonably possible to meet the waveshape because of the transformer characteristics and the variations to the waveshape allowed in the following paragraphs will need to be applied then this shall be clearly stated in the tender. The value of the effective energy of the impulse generator shall be made available to the purchaser on request.

NOTE 1 The minimum impulse generator energy required to meet the tail time (50 μs) during an impulse test on a transformer can be estimated by using the following equation (this equation is only a guide and might underestimate the energy required. Information from previous experience of testing similar transformers can be used if available):

$$E_{\min} = \frac{100 \times 2\pi \times f \times (t_2)^2}{z \times U^2} \times \left(\frac{U_{LI}}{\eta} \right)^2 \times S_r$$

where

- E_{\min} is the minimum energy required from the impulse generator in joules;
- f is the rated frequency of the transformer in hertz;
- t_2 is the tail time in seconds; t_2 equal 50×10^{-6} s;
- z is the short circuit impedance in % seen from the impulse terminal see IEC 60076-1;
- U is the winding rated voltage in volts, phase-to-phase;
- U_{LI} is the full wave lightning impulse test voltage of the tested winding in volts;
- η is the impulse generator efficiency per unit; $\eta = 1,0$;
- S_r is the three-phase power rating in volt-amperes for which the impedance 'z' is defined.

If the standard impulse shape cannot reasonably be obtained because of low winding inductance or high capacitance to earth and the resulting impulse shape is oscillatory so that the relative overshoot magnitude exceeds 5 % then for windings that will receive a chopped wave lightning impulse test, the front time may be increased to reduce the overshoot. In all cases with $U_m \leq 800$ kV the front time shall not exceed 2,5 μs . If the relative overshoot magnitude exceeds 5 % at the full wave voltage level, then a test voltage function shall be

applied in accordance with IEC 60060-1 to determine the test voltage value. It is permissible to apply the requirements of IEC 60060-1 Annex B to the evaluation of the parameters of the lightning impulse irrespective of the overshoot value.

NOTE 2 This clause gives two methods of dealing with an overshoot of more than 5 %. The front time can be increased, but if $1,2 \mu\text{s} + 30 \%$ is exceeded then chopped waves are required to provide a high frequency test. Alternatively or in addition, the peak voltage of the impulse (maximum value of the recorded curve) is increased if the overshoot exceeds 5 % and the frequency of oscillation is higher than about 100 kHz by the application of the test voltage function in accordance with IEC 60060-1.

For transformers with a $U_m > 800 \text{ kV}$ there may be cases where a front time of less than $2,5 \mu\text{s}$ cannot be reasonably achieved because of a very high capacitance to earth. In these cases a longer front time may be accepted by agreement between purchaser and manufacturer.

If the minimum tail time is not achieved then by agreement between manufacturer and purchaser a shorter tail time may be accepted but the test voltage shall be increased by 1 % for each $2 \mu\text{s}$ by which the tail time is less than $40 \mu\text{s}$. The minimum allowable tail time is $20 \mu\text{s}$. In the case of the low voltage winding of generator step-up transformers where the connection is arranged so that a direct lightning impulse cannot occur in service then this requirement may be varied by agreement.

Further guidance may be obtained from IEC 60076-4.

13.2.2 Tests on transformers without non-linear elements

13.2.2.1 Test sequence

The test sequence shall consist of:

- a) one reference impulse of a voltage between 50 % and 70 % of the full test voltage
- b) three subsequent impulses at full voltage.

If, during any of these applications, an external flashover in the circuit or across a bushing spark gap occurs, or if the recording fails on any of the specified measuring channels, that application shall be disregarded and a further application made.

NOTE Additional impulses at amplitudes not higher than the reference impulse voltage level can be used, these do not need to be shown in the test report.

13.2.2.2 Test acceptance criteria

The test is successful if there are no significant differences between voltage and current transients recorded from the reference impulse and those recorded at the full test voltage.

NOTE The detailed interpretation of the test records and the discrimination between marginal differences and differences indicating failure requires a great deal of skill and experience. Further information is given in IEC 60076-4.

If there is a voltage collapse or deviation and it is agreed between the manufacturer and purchaser that the test is not immediately failed, the test sequence shall be completed and then the full test sequence repeated using the original reference impulse. If any further voltage collapse or deviation is observed then the test is failed.

Additional observations during the test (abnormal sounds, etc.) may be used to confirm the interpretation of the records, but they do not constitute evidence in themselves.

13.2.3 Tests on transformers with non-linear elements

13.2.3.1 Test sequence

If non-linear elements or surge arresters are built into the transformer for the limitation of transferred overvoltage transients, they may operate during the test procedure and this may cause differences between impulse records made at different voltages. There will be a threshold voltage at which the differences caused by the non-linear elements start to appear and the test sequence shall include at least one record below this threshold.

The test sequence shall consist of:

- a) one reference impulse at between 50 % and 60 % of the full test voltage;
- b) one reference impulse at between 60 % and 75 % of the full test voltage;
- c) one reference impulse at between 75 % and 90 % of the full test voltage;
- d) three consecutive 100 % full wave impulses;
- e) a comparison impulse at as nearly as possible the same voltage as c) above;
- f) a comparison impulse at as nearly as possible the same voltage as b) above;
- g) a comparison impulse at as nearly as possible the same voltage as a) above.

The reference impulse voltages shall be at least 10 % (of the 100 % level) different from each other.

If none of the 100 % full wave records differ from the lowest voltage record of the reference impulse records, then impulses e), f) and g) above may be omitted.

NOTE Additional impulses at amplitudes not higher than the reference impulse voltage level can be used, these do not need to be shown in the test report.

If, during any of these applications, an external flashover in the circuit or across a bushing spark gap should occur, or if the recording should fail on any of the specified measuring channels, that application shall be disregarded and a further application made.

13.2.3.2 Test criteria

The test is successful if there are no significant differences between voltage and current transients recorded from the lowest voltage reference impulse and those recorded at the full test voltage.

If this is not the case then the records of current and voltage from the following impulses shall be compared:

- a) and g)
- b) and f)
- c) and e)
- all the 100 % level impulse records.

The test is successful if there is no significant difference between the compared records (beyond that which can reasonably be explained by small differences in the test voltage) and any changes between successive records are progressive and smooth, consistent with the proper operation of the non-linear element.

NOTE Further information is given in IEC 60076-4.

If there is a voltage collapse or deviation and it is agreed between the manufacturer and purchaser that the test is not immediately failed, the test sequence shall be completed and then the full test sequence repeated using the original reference impulse. If any further voltage collapse or deviation is observed then the test is failed.

Additional observations during the test (abnormal sounds, etc.) may be used to confirm the interpretation of the records, but they do not constitute evidence in themselves.

13.3 Chopped wave lightning impulse test (LIC)

13.3.1 Wave shape

The wave shape of the full wave impulses shall be as given in 13.2.1. The chopped wave lightning impulse shall have a time to chopping between 3 μs and 6 μs . The time to first voltage zero after the instant of chopping shall be as short as possible. The test shall be made without the deliberate addition of impedance in the chopping circuit, but if the overswing observed during a reduced voltage application is more than 30 % then the minimum impedance required to bring the overswing below 30 % may be added to the chopping circuit.

A time to chopping of between 2 μs and 3 μs can be accepted by agreement provided that the peak value of the lightning impulse wave is achieved before the chop.

NOTE Transformers are normally designed to withstand an overswing to the opposite polarity of 30 % of the amplitude of the chopped wave lightning impulse. If the transformer is to be tested by a third party the overswing is to be limited to this value.

Usually, the same settings of the impulse generator and measuring equipment are used, and only the chopping gap equipment is added.

Different time bases may be used to record the chopped wave lightning impulses.

It is recommended to use a triggered-type chopping gap with adjustable timing, although a plain rod-rod gap is allowed.

The peak value of the chopped wave lightning impulse shall be as given in Table 2.

13.3.2 Tests on transformers without non-linear elements

13.3.2.1 Test sequence

The test is combined with the full impulse test in a single sequence. Unless otherwise specified the order of the different impulse applications shall be:

- a) one full wave reference impulse at between 50 % and 70 % of the full wave lightning impulse test voltage;
- b) one full wave impulse at the full wave lightning impulse test voltage;
- c) two chopped impulses at the chopped wave lightning impulse test voltage;
- d) two full wave impulses at the full wave lightning impulse test voltage.

The same types of measuring channels and oscillographic records are specified as for the full-wave impulse test.

NOTE Additional impulses (full or chopped) at amplitudes not higher than the reference impulse voltage level can be used, these do not need to be shown in the test report

If, during any of these applications, an external flashover in the circuit or across a bushing spark gap should occur, or if the recording should fail on any of the specified measuring channels, that application shall be disregarded and a further application made.

As far as possible the same time to chop shall be used for all chopped wave lightning impulses in the sequence.

13.3.2.2 Test criteria

The test is successful if there are no significant differences between voltage and current transients recorded from the reference reduced level full impulse and those recorded at the full test voltage including the chopped impulses up to the time of chop. In the case of the chopped impulses differences after the chopping time may be due to minor variations in the performance and timing of the chopping gap.

NOTE The detailed interpretation of the test records and the discrimination between marginal differences and differences indicating failure requires a great deal of skill and experience. Further information is given in IEC 60076-4.

If there is a voltage collapse or deviation and it is agreed between the manufacturer and purchaser that the test is not immediately failed the test sequence shall be completed and then the full test sequence repeated using the original reference impulse. If any further voltage collapse or deviation is observed then the test is failed.

Additional observations during the test (abnormal sounds, etc.) may be used to confirm the interpretation of the records, but they do not constitute evidence in themselves.

13.3.3 Tests on transformers with non-linear elements

13.3.3.1 Test sequence

The test is combined with the full impulse test in a single sequence.

If non-linear elements or surge diverters are built into the transformer for the limitation of transferred overvoltage transients, they may operate during the test procedure and this may cause differences between impulse records made at different voltages. There will be a threshold voltage at which the differences caused by the non-linear elements start to appear and the test sequence shall include at least one record below this threshold.

The test sequence shall consist of:

- a) one full wave reference impulse at between 50 % and 60 % of the full wave lightning impulse test voltage;
- b) one full wave reference impulse at between 60 % and 75 % of the full wave lightning impulse test voltage;
- c) one full wave reference impulse at between 75 % and 90 % of the full wave lightning impulse test voltage;
- d) one full wave impulse at the full wave lightning impulse test voltage;
- e) two chopped impulses at the chopped wave lightning impulse test voltage;
- f) two full wave impulses at the full wave lightning impulse test voltage;
- g) a comparison impulse at as nearly as possible the same voltage as c) above;
- h) a comparison impulse at as nearly as possible the same voltage as b) above;
- i) a comparison impulse at as nearly as possible the same voltage as a) above.

The reference impulse voltages shall be at least 10 % (of the 100 % level) different from each other.

If none of the 100 % full wave records differ from the lowest voltage of the reference impulse record then impulses g), h) and i) above may be omitted.

The time interval between the application of the last chopped wave and the first full wave after the chop waves shall be as short as practicable.

NOTE Additional impulses (full or chopped) at amplitudes not higher than 75 % of the full level can be used, these do not need to be shown in the test report.

If, during any of these applications, an external flashover in the circuit or across a bushing spark gap should occur, or if the recording should fail on any of the specified measuring channels, that application shall be disregarded and a further application made.

The same types of measuring channels and oscillographic records are specified as for the full-wave impulse test.

As far as possible the same time to chop shall be used for all chopped impulses in the sequence.

13.3.3.2 Test criteria

The test is successful if there are no significant differences between voltage and current transients recorded from the lowest voltage reference impulse and those recorded at the full test voltage including the chopped wave impulses up to the time of chop. In the case of the chopped impulses differences after the chopping time may be due to minor variations in the performance and timing of the chopping gap.

If this is not the case then the records of current and voltage from the following impulses shall be compared:

- a) and i);
- b) and h);
- c) and g);
- all the 100 % level impulse records;
- both the chopped wave records up to the time of chop.

The test is successful if there is no significant difference between the compared records (beyond that which can reasonably be explained by small differences in the test voltage) and any changes between successive records should be progressive and smooth, consistent with the proper operation of the non-linear element.

NOTE 1 Further information is given in IEC 60076-4.

If there is a voltage collapse or deviation and it is agreed between the manufacturer and purchaser that the test is not immediately failed, the test sequence shall be completed and then the full test sequence repeated using the original reference impulse. If any further voltage collapse or deviation is observed then the test is failed.

Additional observations during the test (abnormal sounds, etc.) may be used to confirm the interpretation of the records, but they do not constitute evidence in themselves.

NOTE 2 The information given in IEC 60076-4 with reference to waveshape evaluation is based on the visual observation of oscillographic records. Under certain circumstances it might be appropriate to evaluate the waveshape parameters of non-standard waveshapes and perform the interpretation of deviations manually rather than relying completely on software tools.

13.4 Lightning impulse test on a neutral terminal (LIN)

13.4.1 General

Full wave lightning impulses at the impulse voltage level specified for the neutral are applied directly to the neutral with all other terminals earthed.

13.4.2 Waveshape

The wave shape of the full wave impulses shall be as given in 13.2.1 except that the duration of the front may be up to a maximum of 13 μ s.

13.4.3 Test sequence

The test sequence shall be as given in 13.2.2.1 for transformers without a non-linear element and 13.2.3.1 for transformers with a non-linear element.

13.4.4 Test criteria

The test criteria shall be as given in 13.2.2.2 for transformers without a non-linear element and 13.2.3.2 for transformers with a non-linear element.

14 Switching impulse test (SI)

14.1 General

During switching impulse tests, the voltages developed across different windings are approximately proportional to the ratio of numbers of turns.

The switching impulse test voltage shall be as specified for the winding with the highest U_m value. If the ratio between the windings is variable by tapplings, the tapplings shall be used to bring the test voltage for the winding with lower U_m as close as possible to the corresponding test value given in Table 2. The windings with lower U_m values may not receive their full test voltage; this shall be accepted. If lower voltage windings do not have a switching impulse level given in Table 2 then the manufacturer may choose the tap position for test unless otherwise specified by the purchaser.

In a three-phase transformer, the voltage developed between line terminals during the test shall be approximately 1,5 times the voltage between line and neutral terminals.

14.2 Test connections

The impulses are applied either directly from the impulse voltage source to a line terminal of the highest voltage winding, or to a lower voltage winding so that the test voltage is inductively transferred to the highest voltage winding. The specified test voltage shall appear between the line terminal of the highest voltage winding and earth. The voltage shall be measured at the line terminal of the highest voltage winding.

A three-phase transformer shall be tested phase by phase.

Star connected windings with the neutral brought out shall be earthed at the neutral terminal either directly or through a low impedance such as a current measuring shunt. A voltage of opposite polarity and about half amplitude appears on the two remaining line terminals which may be connected together but not connected to earth. To limit the voltage of opposite polarity to approximately 50 % of the applied level, it is permissible to connect high resistance damping resistors (5 k Ω to 20 k Ω) to earth at the non-tested phase terminals.

For delta connected windings the terminal corresponding to the end of the phase under test shall be earthed either directly or through a small measuring impedance, the other terminals shall be open circuit. Tests on a three-phase transformer shall be arranged so that a different terminal of the delta is earthed for each phase test. Delta connected windings with more than three terminals brought out shall have the delta closed for the test.

For a single phase transformer with one or more windings which will have both ends connected to a line in service and with a switching impulse test specified, then the switching impulse test shall be applied to both ends of the winding.

For a star connected winding with a neutral connection not brought out and not connected to earth internally, it is not always possible to achieve the appropriate test voltages by earthing

one or more line terminals, in this case the test connection shall be agreed between manufacturer and purchaser.

Bushing spark gaps may be removed or their spacing increased to prevent sparkover during the test.

14.3 Waveshape

The test voltage is normally of negative polarity to reduce the risk of erratic external flashover in the test circuit.

The voltage impulse shall have a time to peak (T_p as defined in IEC 60060-1) of at least 100 μs , a time above 90 % (T_d as defined in IEC 60060-1) of the specified amplitude of at least 200 μs , and a time to zero (T_z as defined in IEC 60060-1) of a minimum of 1 000 μs .

NOTE 1 The impulse wave shape is purposely different from the standard waveshape of 250 / 2 500 μs recommended in IEC 60060-1, since IEC 60060-1 is intended for equipment without a saturable magnetic circuit. The time to peak is chosen to be long enough to give an essentially linear voltage distribution along the winding.

The time to zero can be increased by inducing a remnant flux into the core of opposite direction to that induced during the test before each full-voltage test impulse. This is normally accomplished by applying impulses of similar shape but opposite polarity at a voltage not exceeding 70 % of the full test level, but other methods may be used. A time to zero of less than 1 000 μs is permissible if as far as practicable full reverse saturation of the core is achieved.

NOTE 2 During the test considerable flux is developed in the magnetic circuit. The impulse voltage can be sustained up to the instant when the core reaches saturation and the magnetizing impedance of the transformer becomes drastically reduced.

For test objects without a magnetic core or with a gapped core design, it is permissible to have a time to zero of less than 1 000 μs . See IEC 60076-4.

14.4 Test sequence

The test sequence shall consist of one reference impulse of a voltage between 50 % and 70 % of the full test voltage and three impulses at full voltage. Sufficient reverse polarity applications shall be made before each full impulse to ensure the magnetization of the core is similar before each full wave impulse in order to make the time to first zero as uniform as possible.

NOTE If the core does not saturate during the full voltage applications then reverse polarity applications might not be required.

Oscillographic records shall be made of the impulse wave-shape on the line terminal under test and the current between the tested winding and earth. If during any of these applications an external flashover in the circuit or across a bushing spark gap should occur, or if the recording should fail on any of the specified measuring channels, that application shall be disregarded and a further application made.

14.5 Test criteria

The test is successful if there is no sudden collapse of voltage or discontinuity in the voltage or current indicated on the oscillographic records.

Additional observations during the test (abnormal sounds, etc.) may be used to confirm the oscillographic records, but they do not constitute evidence in themselves.

NOTE Successive oscillograms might differ because of the influence of magnetic saturation on impulse duration.

15 Action following test failure

If the transformer fails any of the dielectric tests then the complete sequence of dielectric tests shall be repeated at the full level following repair. However, under circumstances where it is clear that some parts of the transformer that have been fully tested are not involved in the failure or repair, then at the discretion of the purchaser these parts may not need to be tested again. Particular account needs to be taken of the possibility of contamination or internal transients having damaged other parts of the transformer.

If a transformer fails to meet its test requirements and the fault is in a bushing, provided that the purchaser is satisfied that the transformer is not in any way affected by the failure, it is permissible to replace this bushing and continue the test on the transformer to completion without delay.

If a test failure occurs as the result of a flashover external to the transformer, then the particular test may be repeated and if successful the test sequence may be completed and no repeat of previously successful tests is required.

16 External clearances in air

16.1 General

This part of the standard is applicable when clearances in air are not specified by the purchaser. Where such clearances are specified, the manufacturer may use higher values if required for test.

Clearance in air is understood as the shortest distance between any metallic part of the bushing terminal and any part of the transformer, taking a line which does not pass through the bushing insulator.

This standard is not applicable to the clearance between parts of the bushing itself and the length of the bushing may need to be greater than the given clearances to pass the required tests on the bushing.

This standard does not consider the risk from intrusion of birds and other animals.

The line to earth clearance figures given in this standard are based on those given in IEC 60071-1 for a rod to structure electrode configuration for < 850 kV lightning impulse level and the conductor to structure clearance for higher lightning impulse levels. The highest clearance determined by switching impulse or lightning impulse is used. The phase-to-phase clearances are based on those given in IEC 60071-1 for a conductor-to-conductor electrode structure based on the switching impulse level with a phase-to-phase divided by phase-to-earth value of 1,5. It is therefore assumed that at ≥ 850 kV lightning impulse level the bushing ends and any connections normally have rounded electrode shapes.

It is assumed that conductor clamps with their associated shield electrodes are suitably shaped so that they do not reduce the flashover voltage. It is also assumed that the arrangement of incoming conductors does not reduce the effective clearances provided by the transformer itself. The design shall provide for suitable conductors to be connected to the bushing terminals leading away from the transformer without infringing the clearances given in this document.

If the purchaser intends to make the connection in a particular way which is likely to reduce the effective clearances, this shall be stated in the enquiry.

In general, the provision of adequate clearances in air becomes technically difficult mainly at high system voltages, particularly for relatively small units, or when the installation space is restricted. The principle followed in this standard is to provide minimum, non-critical clearances

which are satisfactory without further discussion or proof under various system conditions and in different climates. Other clearances based on past or current practice shall be subject to agreement between purchaser and manufacturer.

The recommended clearances are referred to the rated withstand voltages of the internal insulation of the transformer, unless otherwise specified in the enquiry and order. When the clearances of the transformer are equal to or larger than the values specified in this standard and the bushings have properly selected ratings according to IEC 60137, then the external insulation of the transformer shall be regarded as satisfactory without further testing.

NOTE 1 The impulse withstand strength of the external insulation is polarity dependant, in contrast to what is assumed for the internal insulation. The tests prescribed for the internal insulation of the transformer do not automatically verify that the external insulation is satisfactory. The recommended clearances are dimensioned for the more onerous polarity (positive).

NOTE 2 It is recognised that in some countries, clearances can be different if based on LI and AC withstand voltages only.

NOTE 3 If a clearance smaller than that according to the paragraph above is to be used, a type test either using the general methods given in Clauses 10 to 14 of this standard using the test voltages applicable to the transformer, or the tests given in another standard (for example IEC 62271-1) applicable to the connected substation equipment might be required on an arrangement simulating the actual clearance.

If the transformer is specified for operation at an altitude higher than 1 000 m, the clearance requirements shall be increased by 1 % for every 100 m by which the altitude exceeds 1 000 m.

Requirements are given for the following clearances:

- clearance phase-to-earth and phase-to-neutral;
- clearance phase-to-phase between phases of the same winding;
- clearance between a line terminal of the high voltage winding and a line terminal of a lower voltage winding (see 16.2).

It follows from the above that the recommended values are in effect minimum values. The design clearances shall be stated on the outline drawing. These are nominal values subject to normal manufacturing tolerances and they have to be selected so that the actual clearances will be at least equal to the specified values.

These statements shall be taken as proof that the transformer complies with the recommendations of this standard, or with the modified values which may have been agreed for the particular contract.

16.2 Clearance requirements

The clearance requirements are given in Table 4 for each value of lightning and switching impulse voltage for each value of U_m .

The phase-to-phase clearance applies only between line terminals of the same winding, the phase to earth clearance applies to all other distances including to the line terminals of other windings and neutral terminals.

Table 4 – Minimum clearances in air (1 of 2)

Highest Voltage for equipment U_m kV	Full Wave Lightning Impulse (LI) kV	Switching impulse (SI) kV	Minimum air clearance	
			Line to earth mm	Phase to phase mm
<1,1	-	-		
3,6	20	-	60	60
	40	-	60	60
7,2	60	-	90	90
	75 ^a	-	120	120
12	75	-	120	120
	95	-	160	160
	110 ^a	-	200 ^a	200 ^a
17,5	95	-	160	160
	125 ^a	-	220	220
24	125	-	220	220
	145	-	270	270
	150 ^a	-	280 ^a	280 ^a
36	170	-	320	320
	200 ^a	-	380	380
52	250	-	480	480
72,5	325	-	630	630
	350 ^a	-	630	630
100	450	375 ^a	900	900
123	550	460 ^a	1 100	1 100
145	550	460 ^a	1 100	1 100
	650	540 ^a	1 300	1 500 ^a
170	650	540 ^a	1 300	1 500 ^a
	750	620 ^a	1 500	1 700 ^a
245	850	700 ^a	1 600	2 100 ^a
	950	750 ^a	1 700	2 300
	1 050	850 ^a	1 900	2 600
300	950	750	1 700	2 300
	1 050	850	1 900	2 600
362	1 050	850	1 900	2 600
	1 175	950	2 200	3 100
420	1 175	950	2 200	3 100
	1 300	1 050	2 600	3 600
	1 425	1 175 ^a	3 100	4 200
550	1 300	1 050	2 600	3 600
	1 425	1 175	3 100	4 200
	1 550	1 300 ^a	3 600	5 000 ^a
	1 675 ^a	1 390 ^a	4 000 ^a	5 600 ^a

Table 4 (2 of 2)

Highest Voltage for equipment U_m kV	Full Wave Lightning Impulse (LI) kV	Switching impulse (SI) kV	Minimum air clearance	
			Line to earth mm	Phase to phase mm
800	1 800	1 425	4 200	5 800 ^a
	1 950	1 550	4 900	6 700 ^a
	2 050 ^a	1 700 ^a	5 800 ^a	7 900 ^a
	2 100	1 675 ^a	5 600	7 700 ^a
1 100	1 950	1 425	b	b
	2 250	1 800	6 300	c
1 200	2 250	1 800	6 300	c

^a These values are not given in IEC 60071-1:2011 for the particular value of U_m but are included either because they represent common practice in some parts of the world or for some switching impulse levels, and clearances because they represent a co-ordinated value for a particular value of lightning impulse level.

^b No clearance values are given for this value of rated insulation level because it is not applicable to air insulation according to IEC 60071-1.

^c No value of phase-phase clearance is given as transformers with this value of rated insulation level are usually single phase.

Annex A (informative)

Application guide for partial discharge measurements on transformers

A.1 General

This annex is particularly applicable to the partial discharge measurements made during induced voltage test with partial discharge measurement (IVPD) according to 11.3 but it may be applied to any other partial discharge measurements made.

A partial discharge (PD) is an electric discharge that only partially bridges electrically stressed insulation. In a transformer, such a partial discharge causes a transient change of the voltage to earth at every externally available winding terminal.

Measuring impedances are connected effectively between the earthed tank and the terminals, usually through a bushing tap or through a separate coupling capacitor, as detailed in A.2.

The actual charge transferred at the site of a partial discharge cannot be measured directly, instead the apparent charge q as defined in IEC 60270 is measured at the terminal as determined by a suitable calibration, see A.2.

A particular partial discharge gives rise to different values of apparent charge at different terminals of the transformer. The comparison of simultaneously collected indications at different terminals may give information about the location of the partial discharge source within the transformer, see A.5.

The acceptance test procedure specified in 11.3 calls for measurements of apparent charge at the winding line terminals.

A.2 Connection of measuring and calibration circuits – Calibration procedure

The measuring technique and equipment is described in IEC 60270.

The principle of the measurement is to determine the voltage change at the terminal caused by the injection of a calibrated amount of charge. The voltage change is measured using a series coupling capacitance (usually a condenser type bushing) and a measuring impedance. The normal arrangement for transformer tests is to have the measuring impedance directly connected to the bushing test tap.

The measuring equipment may be connected to the measuring impedance by a matched coaxial cable. The impedance of the cable and the matched input impedance of the measuring instrument may form part of the measuring impedance. Some systems use a fiber optic cable between the measuring impedance and the recording equipment. Normally the measuring impedance, the cable and the measuring instrument are supplied together so that the overall performance of the measuring system is optimised.

During the measurement of partial discharge between a line terminal of a winding and the earthed tank, the normal arrangement is to install the measuring impedance Z_m between the condenser bushing test tap and the earthed flange of the bushing, see Figure A.1. If a test tap is not provided, it is also possible to insulate the bushing flange from the tank and use it as the measuring terminal. The capacitances between the central conductor and the measuring terminal, and between the measuring terminal and earth, act as a capacitive voltage divider for the partial discharge signal. The calibration is therefore made between the top terminal of the

bushing and earth. As much of the de-energised test circuit as possible should be connected to the terminal during calibration to take account of additional capacitance and any filter circuits.

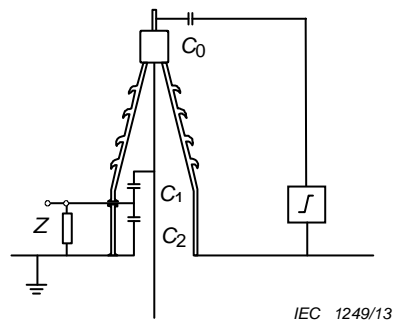


Figure A.1 – Calibration circuit for partial discharge measurement using the test tap of condenser type bushing

If PD measurements need to be made at a terminal where a bushing test tap or insulated flange is not available then a separate high-voltage coupling capacitor is used. A partial discharge free capacitor is required and its capacitance value C should be suitably large in comparison with the calibration generator capacitance C_0 (see IEC 60270 for specific requirements). The measuring impedance (with a protective gap) is connected between the low voltage terminal of the capacitor and earth, see Figure A.2.

The calibration of the complete measuring system is made by the injection of a known charge into the transformer terminal. According to IEC 60270, a calibration generator consists of a step voltage pulse generator with short rise time and a small series capacitor of known capacitance C_0 . C_0 should be small in comparison to C_1 (see IEC 60270 for specific requirements regarding rise time and the choice of C_0). When this generator is connected between the transformer terminal and earth the injected charge from the pulse generator will be:

$$q_0 = U_0 \times C_0$$

where

- q_0 is the calibration apparent charge
- U_0 is the voltage step chosen to give the required q_0
- C_0 is the value of the series capacitance

The calibration level q_0 should be representative of the specified discharge level limit (usually between 50 % and 200 %). Additional measurements using the calibrator at different values of q_0 may be useful to check the operation of the measuring instrument.

It is convenient if the calibration generator has a repetition frequency synchronised to the power frequency so that the resulting pulse can be viewed on an instrument also synchronised to the power frequency.

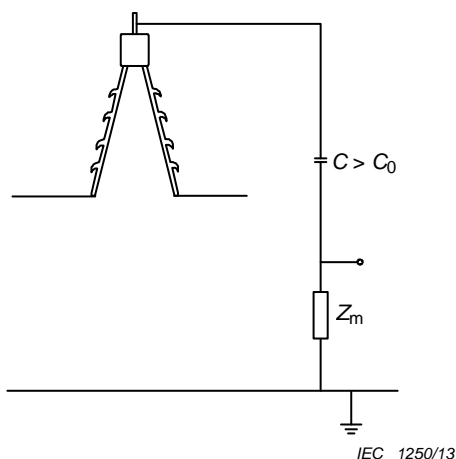


Figure A.2 – Circuit for partial discharge measurement using a high-voltage coupling capacitor

To avoid errors the leads between the terminal and the calibrator and between the calibrator and earth (at the bushing flange) should be kept as short as practicable. The calibration pulse generator should preferably be battery-operated and have small physical dimensions for convenient use at the transformer terminals.

This method of calibration provides for measurement of apparent charge at the terminal, which is the basis of this standard, but it does not give the real value of a partial discharge occurring away from the terminal because the transmission path between the discharge and the terminal is not included in the calibration.

A.3 Instruments, frequency range

The characteristics of the measuring instruments should be as specified in IEC 60270.

A graphical display of any detected partial discharge is generally useful, particularly because it offers a possibility of discriminating between true partial discharge in the transformer and certain forms of external disturbances. This is based on rate of repetition, point on the wave, polarity differences, etc.

The level of partial discharge should be observed continuously or at frequent intervals throughout the test period. Continuous recording of the signal is not obligatory.

Measuring systems for partial discharges are classified as narrow-band or wideband systems. A narrow-band system operates with a bandwidth of about 10 kHz or less at a certain tuning frequency (for example, radio noise meters). A wideband system utilises a relatively large ratio between lower and upper limits of the frequency band, for example 50 kHz to 800 kHz.

By the use of a narrow-band system, interference from local broadcasting stations may be avoided by suitably adjusting the mid-band frequency, but a check has to be made to show that winding resonances near the measuring frequency do not greatly affect the measurement. The narrow-band instrument should be operated at a frequency no higher than 500 kHz, and preferably less than 300 kHz. There are two reasons for this. First, the transmission of the discharge pulse entails a high attenuation of the higher frequency components, and second, when applying a calibration pulse to the line terminal, the pulse is likely to excite local oscillations at and near the terminal, and this will complicate the calibration when mid-band frequencies greater than 500 kHz are used.

A wideband measuring system is less critical as to attenuation and response to different pulse shapes, but is more receptive to disturbances in test locations without electromagnetic

shielding. Band-stop or other types of filters may be used to reduce the interference from external influences such as radio transmitters.

The choice of measuring bandwidth does not affect the partial discharge pulse pattern and the statistical behaviour of the discharge which can be used to identify the discharge source.

In summary a wide-band measuring system is the first preference because of the greater chance of detecting a partial discharge, the bandwidth should not be less than 100 kHz. A narrow band system may be required in certain circumstances to eliminate interference. Care should however be taken over the choice of measuring centre frequency to ensure a reasonable sensitivity to PD in the transformer.

A.4 Procedure after an unsuccessful test

In 11.3.5 PD level acceptance criteria are given. If there has been no voltage collapse, but the test has been unsuccessful because of a PD level above the acceptance criteria then the test shall initially be regarded as non-destructive and the test object should not be rejected immediately upon such a result, but further investigations should be undertaken to identify and locate the partial discharge source.

A further important consideration is whether phase correlated partial discharges are sustained below the operating voltage level, when triggered at the test level, because such partial discharges are most likely to be detrimental to the transformer in service.

The testing environment should first be investigated to find any obvious sign of irrelevant sources of partial discharges. This should be followed by consultations between the manufacturer and purchaser to agree on further supplementary tests or other action to show either the presence of serious partial discharge, or that the transformer is satisfactory for service operation.

Below are some suggestions which may be useful during the above courses of action.

- Investigation as to whether the indications are truly correlated to the test sequence or just represent coincident, irrelevant sources. This is often facilitated by oscillographic monitoring or recording of the pattern of the partial discharges, external disturbances may for example be identified by their being asynchronous with the test voltage.
- Investigation as to whether the partial discharge may be transmitted from the supply source. Low-pass filters on the supply leads to the transformer under test can help in such cases.
- Investigation to determine whether the partial discharge source is within the transformer or outside (spitting from objects at floating potential in the hall, from live parts in air, or from sharp edges on earthed parts of the transformer). As the test concerns the internal insulation, provisional electrostatic shielding on the outside is permitted and recommended.
- Investigation of the probable location of the source(s) in terms of the electrical circuit diagram of the transformer, for example single phase and applied voltage tests may be useful. There are several known and published methods to locate discharges. One is based on correlation of readings and calibrations at different pairs of terminals (in addition to the obligatory readings between line terminals and earth). It is also possible to identify individual pulse shapes during the test with corresponding calibration waveforms, if records from wideband circuits are used. A particular case is the identification of partial discharge in the dielectric of the capacitance graded bushings.
- Investigation by acoustic or ultrasonic detection of the location of the source(s) within the tank.
- Investigation of the location and nature of the source using ultra high frequency electromagnetic sensors introduced into the tank.

- Determination of the probable physical nature of the source by conclusions drawn from variation with test voltage level, hysteresis effect, pulse pattern along the test voltage wave, development of the partial discharge with time, etc.
- Partial discharge in the insulation system may be caused by insufficient drying or insufficient liquid impregnation, generally this will be apparent from the pattern of the partial discharge. Re-processing of the transformer, or a period of rest, and subsequent repetition of the test may therefore be tried in this case.
- Even a limited exposure to a relatively high partial discharge may lead to local cracking of oil or liquid and temporarily reduced extinction and re-inception voltages, but the original conditions may be self-restored in a matter of hours.
- Relatively limited variation of the partial discharge level with voltage increase, a partial discharge pattern typical of a floating particle in the electrical field and an absence of an increase of level with time, may be accepted as evidence that the transformer is suitable for service. In this case it may be agreed to repeat the test, possibly with extended duration, and possibly with an increased voltage level, as this may reduce the discharge level over time.
- Traces of partial discharges visible after untanking are usually not found unless the transformer has been exposed for a considerable duration of time to levels which are very high in comparison with the acceptance limit. Such a procedure may be the last resort if other means of improving the behaviour of the transformer or identifying the source have failed.

Annex B (informative)

Overvoltage transferred from the high-voltage winding to a low-voltage winding

B.1 General

The problem of transferred overvoltage is treated from a system point of view in IEC 60071-2. The information given below concerns only problems associated with the transformer itself under particular conditions of service. The transferred overvoltages to be considered are either transient surges or overvoltages.

NOTE It is the responsibility of the purchaser to define the loading of a low-voltage winding. If no information can be given, the manufacturer can provide information about the expected transferred voltages when the low-voltage terminals are open-circuited, and about the values of resistors or capacitors which are needed to keep the voltages within acceptable limits.

B.2 Transfer of surge voltage

B.2.1 General

A study of particular transformer installation with regard to transferred surge overvoltages is, in general, justified only for large generator transformers, which have a large voltage ratio, and for large high-voltage system transformers with a low-voltage tertiary winding.

As single phase auto transformers are tested separately, the transferred voltages appearing on the tertiary terminals when the transformers are connected as a three-phase bank needs to be considered

In order to ensure that the transferred voltages do not exceed the specified level, or to confirm that surge arresters are not required, transferred surge measurements can be made using a low voltage recurrent surge generator. Alternatively these measurements can be made at a reduced voltage during impulse tests.

It is convenient to distinguish between two mechanisms of surge transfer, namely capacitive transfer and inductive transfer.

B.2.2 Capacitive transfer

The capacitive transfer of overvoltage to a low-voltage winding may in the first approximation be described as a capacitive voltage division. The simplest equivalent circuit as seen from the low-voltage winding consists of an electromotive force (e.m.f.) source in series with a transfer capacitance C_t , see Figure B.1.

The equivalent e.m.f. is a fraction s of the incoming surge on the high-voltage side. C_t is of the order of 10^{-9} F; s and C_t are not well-defined quantities but dependent on the shape of the surge front. They can be determined together by oscillographic measurements. Pre-calculation is uncertain.

A loading of the secondary terminals with switchgear, short cables or added capacitors (a few nF), which act as lumped capacitance C_s directly on the terminals (even during the first microsecond), will reduce the transferred overvoltage peak. Longer cables or busbars are represented by their characteristic impedance. The resulting shape of secondary overvoltage will normally have the character of a short (microsecond) peak, corresponding to the front of the incoming surge.

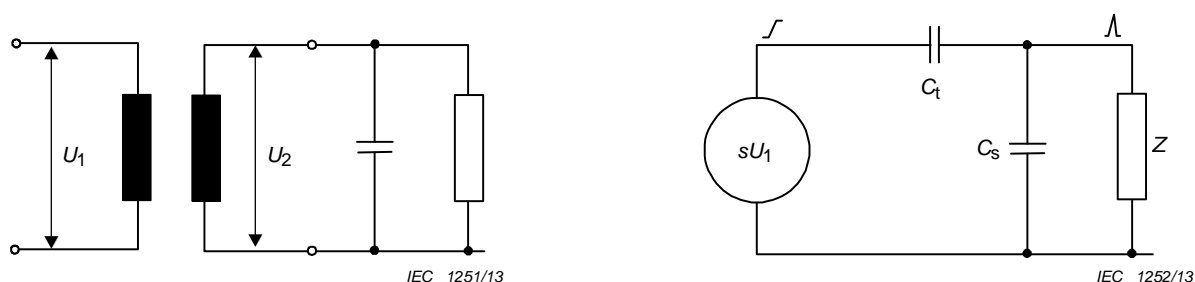


Figure B.1 – Equivalent circuit for capacitive transfer of overvoltage

B.2.3 Inductive transfer

The inductive transfer of surge voltage depends on the flow of surge current in the high-voltage winding.

If no external loading is applied to the secondary winding, the voltage transient usually has a superimposed damped oscillation with a frequency determined by leakage inductance and winding capacitances.

A reduction of the inductively transferred overvoltage component can be effected either by resistive damping through a surge diverter or by modification of the oscillation with capacitive loading. If capacitors are used, the capacitance value has usually to be of the order of tenths of microfarads. (They will therefore automatically eliminate the capacitively transferred component as long as the circuit inductance is low.)

The transformer parameters which are involved in inductive surge transfer are better defined and less dependent on rate of rise (or frequency) than those involved in capacitive transfer. For further information, see the literature on the subject.

B.3 Power-frequency transferred overvoltage

If a low-voltage winding which is physically adjacent to the high-voltage winding is left without connection to earth or with only a high-impedance connection to earth while the high-voltage winding is energised, there is a risk of power frequency overvoltage by capacitance division.

The risk is obvious for a single-phase winding, but it can also exist for a three-phase winding if the primary winding voltage becomes asymmetric, as occurs during earth faults. In particular circumstances, resonance conditions may arise.

Tertiary windings and stabilizing windings in large transformers are also subjected to the same risk. It is the responsibility of the purchaser to prevent a tertiary winding from being accidentally left with too high an impedance to earth. A stabilizing winding should normally be arranged for permanent connection to earth (tank) either externally or internally.

The overvoltage is determined by capacitances between windings and between windings and earth. These can be measured at low frequency from the terminal of the transformer in different combinations, and they can also be calculated with sufficient accuracy.

Annex C (informative)

Information on transformer insulation and dielectric tests to be supplied with an enquiry and with an order

C.1 General

For each winding of the transformer the following information should be supplied with the enquiry and order according to the U_m of the winding.

NOTE Although SI and IVW can be specified for a lower voltage winding on a transformer the values might not be achieved during the test depending on the ratio of the transformer.

It is recommended that test connections and procedures should be discussed at the time of placing the order or at the design review stage, particularly with regard to the connection for induced withstand voltage tests on complicated transformers with non-uniformly insulated high-voltage windings and the method to be used for impulse tests on high-power low-voltage windings and neutral terminals (see 13.1.4). The application of non-linear protection devices, built into the transformer is to be indicated by the manufacturer at the enquiry and at the order stage, and should be shown in the connection diagram on the rating plate.

C.2 For transformers and windings with $U_m \leq 72,5$ kV

In all cases:

- value of U_m ;
- value of U_r ;
- applied voltage test level (AV);
- full wave lightning impulse test level (LI).

In special cases:

- whether partial discharge measurements are required and whether this is to be done with the induced voltage test or separately, and whether it is to be done on only one unit (type test unit) or all units. The length of time at the PD measurement voltage should be given if this is less than one hour;
- whether a lightning impulse test is required on any or all units to be supplied under the order rather than just on the first unit of the design;
- whether chopped wave lightning impulse tests are required and whether it is to be done on only the first or on all units;
- whether a lightning impulse test on the neutral terminal is required and whether it is to be done on only the first or on all units;
- whether a lightning impulse applied to multiple line terminals simultaneously is required and whether it is to be done on only the first or on all units;
- clearances in air if different from the clearances given in Clause 16.

The values of U_m , LI and AV should preferably be chosen from a single line of Table 2 as they will then be a co-ordinated set, however it is permissible to choose values from different lines within the same U_m or from a higher U_m to match existing system insulation co-ordination. The LIC value, if specified, should be taken from the same line in Table 2 as the LI value. Any mix of values coming from different lines may result in over design in respect of some parameters.

C.3 For transformers and windings with $72,5 \text{ kV} < U_m \leq 170 \text{ kV}$

In all cases:

- value of U_m ;
- value of U_r ;
- applied voltage test level;
- full wave lightning impulse test level.

Additionally for transformers with non-uniform insulation:

- line terminal AC test level or the switching impulse test level if specified as an alternative;

In special cases:

- whether alternative higher voltage levels are to be used for the induced voltage test with partial discharge measurement and whether it can be combined with the IVW test;
- whether chopped wave lightning impulse tests are required and whether it is to be done on only the first or on all units;
- whether a lightning impulse test on the neutral terminal is required and whether it is to be done on only the first or on all units;
- whether the required test voltage for the induced test voltage differs from twice rated voltage;
- whether a switching impulse test is required and whether it is to be done on only the first or on all units and whether the SI test replaces the LTAC test;
- whether a lightning impulse applied to multiple line terminals simultaneously is required and whether it is to be done on only the first or on all units;
- whether a line terminal AC withstand voltage test is required for transformers with non-uniformly insulated windings and if so the test voltage required;
- clearances in air if different from the clearances given in Clause 16.

The values of U_m , LI, AV, and if specified LTAC and SI should preferably be chosen from a single line of Table 2 as they will then be a co-ordinated set, however it is permissible to choose values from different lines within the same U_m or from a higher U_m to match existing system insulation co-ordination. The LIC value, if specified, should be taken from the same line in Table 2 as the LI value. Any mix of values coming from different lines may result in over design in respect of some parameters.

C.4 For transformers and windings $U_m > 170 \text{ kV}$

In all cases:

- value of U_m ;
- value of U_r ;
- lightning impulse test level;
- switching impulse test level;
- applied voltage test level.

In special cases:

- whether alternative higher voltage levels are to be used for the induced voltage test with partial discharge measurement;
- whether a lightning impulse test on the neutral terminal is required and whether it is to be done on only the first or on all units;

- whether a lightning impulse applied to multiple line terminals simultaneously is required and whether it is to be done on only the first or on all units;
- whether a line terminal AC withstand voltage test is required for transformers with non-uniformly insulated windings and if so the test voltage required;
- clearances in air if different from the clearances given in Clause 16.

The values of U_m , LI, SI, AV and if specified, LTAC should preferably be chosen from a single line of Table 2 as they will then be a co-ordinated set, however it is permissible to choose values from different lines within the same U_m or from a higher U_m to match existing system insulation co-ordination. The LIC value should be taken from the same line in Table 2 as the LI value. Any mix of values coming from different lines may result in over design in respect of some parameters.

Annex D (informative)

Neutral insulation voltage level calculation

D.1 General

The recommendations in this annex allow the determination of the minimum withstand voltage for the neutral terminal of a transformer with non-uniform insulation which is not directly earthed. To control fault levels or for other reasons the neutral terminal may be connected to earth through a considerable impedance (for example an arc-suppression reactor, earthing reactor or resistor).

The determination of the withstand voltage of the neutral terminals of a transformer designed for use with a separate neutral end voltage regulating transformer is not covered by this annex.

When the neutral terminal is not directly earthed, an overvoltage protective device shall be installed between the neutral terminal and earth in order to limit transient voltages. It is the responsibility of the purchaser to select the overvoltage protective device, to determine its impulse protection level, and to specify the corresponding impulse withstand voltage for the neutral terminal of the transformer.

NOTE For non-uniform insulation the manufacturer might design the winding with a higher than specified neutral insulation level because of the line terminal withstand test (special test).

The AC withstand voltage shall be higher than the maximum overvoltage arising under system fault conditions. There should be a margin between the impulse level of the neutral terminal and the operating voltage of the protective device, both of these voltages shall be above the maximum voltage arising under system fault conditions. The formulae below give guidance for the calculation of the maximum voltages which can occur at a neutral terminal earthed through an impedance.

D.2 Neutral fault current calculation

The maximum neutral fault current I_{fault} for a two winding three phase transformer (single phase earth fault on a star connected winding) can be calculated according to the following formula:

$$I_{\text{fault}} = \frac{3 \times E}{(Z_{1t} + Z_{1s} + Z_{2t} + Z_{2s} + Z_{0t} + Z_{0s}) + 3 \times Z_N + 3 \times Z_{\text{fault}}}$$

where

- E is the phase to earth voltage taken as $U_m/\sqrt{3}$ in V
- Z_{1s} is the positive sequence impedance of the network in Ω
- Z_{2s} is the negative sequence impedance of network in Ω
- Z_{0s} is the zero sequence impedance of the network in Ω
- Z_{1t} is the positive sequence impedance of the transformer in Ω
- Z_{2t} is the negative sequence impedance of the transformer in Ω
- Z_{0t} is the zero sequence impedance of the transformer in Ω (including any tertiary or stabilizing winding)
- Z_N is the impedance between the neutral and earth in Ω

Z_{fault} is the fault impedance in Ω (taken as zero)

NOTE As a guide, in accordance with common practice to calculate the worst case, the following values might be used:

$$\begin{aligned} E &= U_m / \sqrt{3} \\ Z_{1s} &= 0 \\ Z_{2s} &= 0 \\ Z_{0s} &= 0 \\ Z_{\text{fault}} &= 0 \end{aligned}$$

D.3 Minimum insulation level

D.3.1 Applied voltage minimum insulation level

The minimum AV level for the neutral should be chosen from Table 2 of this standard to be greater than $U_{\text{ACneutral}}$ Where:

$$U_{\text{ACneutral}} = I_{\text{fault}} \times Z_{\text{N}}$$

D.3.2 Minimum impulse level

The impulse level should be chosen to provide a margin above the operating level of the protective device, which should be chosen so that it does not operate under system short-circuit fault conditions. The highest asymmetrical peak voltage under these conditions is given by

$$U_{\text{neutral max}} = U_{\text{ACneutral}} \times K_v \times \sqrt{2}$$

where

K_v is the voltage asymmetry factor.

In the case of a purely resistive Z_{N} , K_v is the same as the current asymmetry factor k as defined in IEC 60076-5, but for an inductive Z_{N} , K_v will be lower because of the DC component of current. The factor K_v can be taken as 2 in the worst case of a very high transformer X/R and a small resistive Z_{N} but will be < 2 in practical cases. In the case of a purely inductive Z_{N} , K_v can be taken as 1,05 as this represents the worst case with a transformer X/R of about 7. It is recommended that $U_{\text{neutral max}}$ is calculated using a system model.

D.4 Example

A transformer connected Ynd11 with a rated HV voltage of 155 kV (i.e. U_m is 170 kV) and a rated power of 100 MVA with a 12 % positive sequence impedance on a 100 MVA base and a zero sequence impedance of 10,8 %, and with the HV neutral earthed through a 39 Ω reactor will experience the following fault current in the HV neutral for an HV line to earth fault considering an infinite short circuit power of the network:

$$I_{\text{fault}} = \frac{3 \times E}{(Z_{1t} + Z_{1s} + Z_{2t} + Z_{2s} + Z_{0t} + Z_{0s}) + 3 \times Z_{\text{N}} + 3 \times Z_{\text{fault}}}$$

$$I_{\text{fault}} = \frac{3 \times 170\,000 / \sqrt{3}}{(28,83 + 0 + 28,83 + 0 + 25,95 + 0) + 3 \times 39 + 0} \text{ A}$$

$$I_{\text{fault}} = 1\,468 \text{ A}$$

which gives a voltage of:

$$U_{ACneutral} = I_{fault} \times Z_N$$

$$U_{ACneutral} = 1\,468 \times 39\text{ V}$$

$$U_{ACneutral} = 57\,243\text{ V}$$

therefore the minimum AV level from Table 2 is 70 kV

Assuming $K_V = 1,05$ for a reactive neutral impedance, the highest voltage on the neutral under system fault conditions is:

$$U_{neutral\ max} = 57\,243 \times 1,05 \times \sqrt{2}\text{ V}$$

$$U_{neutral\ max} = 85,0\text{ kV}$$

Since the protective device should not operate at a peak level of 85 kV its highest continuous AC level should not be less than $85/\sqrt{2}\text{ kV} = 60,1\text{ kV}$. A suitable surge arrester for this voltage (10 second withstand) has a 10 kA protective level of 140 kV and allowing a margin on this gives an LI level of 170 kV for the neutral.

A lightning impulse level of 170 kV corresponds to a U_m of 36 kV and this would be specified for the neutral.

Annex E (informative)

Basis for dielectric tests, insulation levels and clearances

E.1 General

It is the intention of this standard that the line to earth, neutral to earth, phase to phase and turn to turn insulation of the transformer shall be properly tested.

Depending on the voltage level and on the type of transformer different tests have been selected to achieve this, and appropriately coordinated test voltage levels are given in Table 2.

This annex summarises the rules, which prevailed during the revision of this standard. In general the revision has been aimed at simplifying the required testing and clarifying the requirements without increasing or reducing the overall level of testing, which is considered to have given good performance in service over many years.

E.2 Tests

E.2.1 Tests for transformers with $U_m \leq 72,5$ kV

These transformers include distribution transformers, which are often produced in large quantities of a particular design. The testing of such transformers should remain quick and affordable.

As all transformers and windings with a U_m of 72,5 kV and below are produced with uniform insulation, the line to earth and neutral to earth insulation are both verified during the applied voltage test (AV).

The induced test withstand (IVW), therefore, only needs to check the turn to turn insulation, and as in the previous edition a test at twice the normal operating voltage have been considered as offering a sufficient margin.

The design of the phase to phase and phase to earth insulation is also proven with the lightning impulse (LI) test but in order to limit the testing equipment necessary for this category of transformer the lightning impulse test has been retained as a type rather than a routine test.

The chopped wave lightning impulse test (LIC) is not regarded as necessary in general. This test is defined as a special test available at the request of the purchaser for use only when there are particularly onerous service conditions.

The induced test with partial discharge measurement (IVPD) has been considered also as too costly and too long for general application on these transformers, and furthermore its goals are covered by the IVW and AV tests. This test is defined as a special test available if required possibly with a reduced duration at the request of the purchaser for use when there are special service conditions.

E.2.2 Tests for transformers with a $72,5$ kV $< U_m \leq 170$ kV

Transformers in this middle range are generally built to order but because of the higher powers transmitted, requirements for higher quality checks are included. As both uniform and non-uniform insulation can be specified the list of tests has been prepared to accommodate both possibilities.

The neutral to earth insulation and for uniformly insulated transformers the line to earth insulation is proven with the applied voltage test (AV). For non-uniform insulation as the test level is limited by the neutral insulation it is insufficient to prove the line to earth insulation. For this reason a line terminal AC (LTAC) test is routine for non-uniformly insulated transformers, but this can be replaced by agreement with a switching impulse (SI) test so that this class of transformer can be tested in a similar manner to larger units.

The phase-to-phase and phase to earth insulation is also tested with the routine lightning impulse (LI) test. The chopped wave lightning impulse test is a special test for these voltage levels to be specified only when required by the purchaser for particular service conditions.

To test the turn-to-turn insulation and phase-to-phase insulation, an induced voltage withstand test (IVW) at twice rated voltage and an induced voltage test with partial discharge measurement (IVPD) are specified as routine tests. In order to shorten the test time and not to reproduce twice the same type of dielectric stress in the transformer, the opportunity to combine these tests is given as the enhancement of the IVPD test gives similar stresses to the IVW and both are made in a configuration similar to the service conditions.

E.2.3 Tests for transformers with $U_m > 170$ kV

This category of transformer covers the largest transmission and generation transformers. The limited number of units as well as the necessary quality checks for these large and important units leads to the following tests:

To check the insulation to earth an applied voltage test is required as a routine test.

The IVPD test checks the quality of the turn to turn and line to earth and phase to phase insulation connected in the service condition. The switching impulse test (SI) proves the phase to phase and line to earth withstand. It is considered therefore that a separate induced voltage withstand test is not necessary but the enhancement voltage of the IVPD test can be increased if desired for example to twice rated voltage.

Lightning impulse tests including chopped waves are included as a routine test for these transformers as it is considered important to prove the ability of the transformer to withstand impulses including those containing higher frequency components.

For the purchaser who wishes to further test the line to earth insulation with an AC test, the single phase line terminal AC test (LTAC) can be specified as a special test. This test is derived from the previous induced voltage withstand test.

E.3 Test voltages

The test voltages contained in Table 2 have been established based on IEC 60071-1. All values below the acceptable limits given in this insulation coordination standard have been excluded from Table 2, but Table 3 has been introduced with lower values which may be used to co-ordinate with existing practice. Table 2 continues to give a range of possible test voltage values for each U_m to allow the specification of a transformer to match a particular system requirement, whilst providing a minimum standard.

The general rule, which prevailed when establishing the values given in Table 2 is based on the behaviour of insulation containing cellulose-based solid insulation and mineral oil. The studies made on this type of insulation have shown that the switching impulse withstand (SI) is usually between 0,8 and 0,85 times the lightning impulse withstand. IEEE C57.12.00-2010 gives figures based on a ratio of 0,83.

In Table 2 the values were rounded up whenever this did not introduce an excessive bias to the general rule.

The induced voltage withstand (IVW) of the line to earth is usually around 50 % of the switching impulse voltage i.e. about 40 % to 43 % of the lightning impulse withstand voltage (LI). The values in Table 2 have been set using this general principle and the standardized figures for the IVW present in the IEC 60071-1. Except for U_m below 36 kV where the practices in use are somewhat different, the general rule is followed with only limited discrepancies to reflect existing practice.

The $(1,58 \times U_r) / \sqrt{3}$ value for the PD measurement level is $1,5 \times U_r$ plus 5 % and is the level used in IEEE C57.12.00-2010 $(1,8 \times U_r) / \sqrt{3}$ is $1,7 \times U_r$ plus 5 % to account for the changed basis from U_m to U_r and to harmonise with IEEE C57.12.00-2010.

E.4 Clearances

The values given in the line to earth column of Table 4 are the highest of those given in IEC 60071-1:2011 for the relevant lightning impulse or switching impulse level. Rod to structure values have been used for lightning impulse levels < 850 kV and conductor to structure values above 750 kV. Where figures are not given in IEC 60071-1 they have been obtained by linear interpolation rounded to the nearest 10 mm or 100 mm.

The values given in the phase-phase clearance column of Table 4 have been obtained by re-basing the conductor to conductor values given in IEC 60071-1:2011 to a phase to phase divided by phase to earth value of 1,5 which is relevant to transformers with a delta winding. Where exact figures are not available from IEC 60071-1 a third order polynomial regression was used to interpolate between the figures re-based to a phase to phase divided by phase to earth value of 1,5. An example of the re-basing would be the clearance of 7 200 mm at 1 425 kV and 1,7 is taken to be equivalent to 1 615 kV and 1,5.

Bibliography

IEC 60071-2, *Insulation co-ordination – Part 2: Application guide*

IEC 60076-4, *Power transformers – Part 4: Guide to the lightning impulse and switching impulse testing – Power transformers and reactors*

IEC 60214-1, *Tap-changers – Part 1: Performance requirements and test methods*

IEC 61083-1, *Instruments and software used for measurement in high-voltage impulse tests – Part 1: Requirements for instruments*

IEC 61083-2, *Instruments and software used for measurement in high-voltage impulse tests – Part 2: Requirements for software*

IEC 62271-1, *High-voltage switchgear and controlgear – Part 1: Common specifications*

IEEE C57.12.00-2010, *Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers*

IEEE C57.142-2010, *IEEE guide to describe the occurrence and mitigation of switching transients induced by transformers, switching device and system interaction*

CIGRÉ-report 12-14 (1984), *Resonance behaviour of high voltage transformers*. Paper presented in the name of Study Committee 12 by Working Group 12.07

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	60
INTRODUCTION	62
1 Domaine d'application	63
2 Références normatives	63
3 Termes et définitions	63
4 Généralités	64
5 Tension la plus élevée pour le matériel et niveau d'isolement assigné	66
6 Transformateurs avec enroulements reconnectables	68
7 Essais diélectriques	68
7.1 Vue d'ensemble	68
7.2 Exigences d'essai	70
7.2.1 Généralités	70
7.2.2 Niveaux de tension d'essai	71
7.2.3 Séquence d'essai	74
7.3 Exigences d'essai concernant les transformateurs spécifiques	74
7.3.1 Essais pour transformateurs avec $U_m \leq 72,5$ kV	74
7.3.2 Essais sur transformateurs avec $72,5$ kV < $U_m \leq 170$ kV	76
7.3.3 Essais sur transformateurs avec $U_m > 170$ kV	77
7.4 Attribution de valeurs de tensions U_m et d'essai à la borne neutre d'un enroulement	78
7.4.1 Transformateurs avec $U_m \leq 72,5$ kV	78
7.4.2 Transformateurs avec $U_m > 72,5$ kV	78
8 Essais diélectriques sur des transformateurs ayant déjà été mis en service	78
9 Isolement des circuits auxiliaires (AuxW)	79
10 Essai de tension appliquée (AV)	79
11 Essais de tension induite (IVW et IVPD)	80
11.1 Généralités	80
11.2 Essai de tenue de tension induite (IVW)	81
11.3 Essai de tension induite avec mesure des décharges partielles (IVPD)	81
11.3.1 Généralités	81
11.3.2 Durée et fréquence d'essai	81
11.3.3 Séquence d'essai	81
11.3.4 Mesure des décharges partielles (DP)	83
11.3.5 Critères d'acceptation de l'essai	83
12 Essai de tenue de tension alternative d'une borne de ligne (LTAC)	84
13 Essais au choc de foudre (LI, LIC, LIN, LIMT)	84
13.1 Exigences concernant tous les essais au choc de foudre	84
13.1.1 Généralités	84
13.1.2 Positions des prises	85
13.1.3 Enregistrements des essais	85
13.1.4 Connexions d'essai	86
13.2 Essai au choc de foudre en onde pleine (LI)	87
13.2.1 Forme d'onde, détermination de la valeur de la tension d'essai et des tolérances	87
13.2.2 Essais sur les transformateurs sans éléments non linéaires	88

13.2.3	Essais sur les transformateurs avec éléments non linéaires	89
13.3	Essai au choc de foudre en onde coupée (LIC)	90
13.3.1	Forme d'onde.....	90
13.3.2	Essais sur les transformateurs sans éléments non linéaires	91
13.3.3	Essais sur les transformateurs avec éléments non linéaires	91
13.4	Essai au choc de foudre sur une borne neutre (LIN)	93
13.4.1	Généralités	93
13.4.2	Forme d'onde.....	93
13.4.3	Séquence d'essai.....	93
13.4.4	Critères d'essai.....	93
14	Essai au choc de manœuvre (SI)	93
14.1	Généralités.....	93
14.2	Connexions d'essai.....	94
14.3	Forme d'onde	94
14.4	Séquence d'essai	95
14.5	Critères d'essai.....	95
15	Mesure prise suite à un défaut en essais.....	95
16	Distances d'isolement dans l'air	96
16.1	Généralités.....	96
16.2	Exigences concernant les distances d'isolement	97
Annexe A (informative) Guide d'application pour les mesures de décharges partielles sur les transformateurs		100
Annexe B (informative) Surtension transmise de l'enroulement haute tension à un enroulement basse tension.....		105
Annexe C (informative) Informations concernant l'isolation du transformateur et les essais diélectriques à fournir avec un appel d'offres et avec une commande.....		108
Annexe D (informative) Calcul du niveau de tension avec isolement des bornes neutres		111
Annexe E (informative) Base applicable aux essais diélectriques, niveaux d'isolement et distances d'isolement		114
Bibliographie		117
Figure 1 – Séquence d'application de la tension d'essai pour la tension induite avec mesure de décharges partielles (IVPD).....		83
Figure A.1 – Circuit d'étalonnage pour la mesure des décharges partielles utilisant la prise d'essai d'une traversée à condensateur		101
Figure A.2 – Circuit pour mesure des décharges partielles utilisant un condensateur de liaison haute tension		102
Figure B.1 – Circuit équivalent pour la transmission capacitive de surtension.....		106
Tableau 1 – Exigences et essais pour différentes catégories de transformateurs basés sur l'enroulement haute tension le plus élevé U_m		71
Tableau 2 – Niveaux de tension d'essai (1 de 2).....		72
Tableau 3 – Niveaux de tension d'essai utilisés dans des cas particuliers		74
Tableau 4 – Distances minimales d'isolement dans l'air (1 de 2).....		98

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE –

**Partie 3: Niveaux d'isolement, essais diélectriques
et distances d'isolement dans l'air**

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de l'IEC). L'IEC a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, l'IEC – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de l'IEC"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'IEC, participent également aux travaux. L'IEC collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de l'IEC concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de l'IEC intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de l'IEC se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de l'IEC. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que l'IEC s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; l'IEC ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de l'IEC s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de l'IEC dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de l'IEC et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) L'IEC elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de l'IEC. L'IEC n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à l'IEC, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de l'IEC, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de l'IEC ou de toute autre Publication de l'IEC, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de l'IEC peuvent faire l'objet de droits de brevet. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

DÉGAGEMENT DE RESPONSABILITÉ

Cette version consolidée n'est pas une Norme IEC officielle, elle a été préparée par commodité pour l'utilisateur. Seules les versions courantes de cette norme et de son(s) amendement(s) doivent être considérées comme les documents officiels.

Cette version consolidée de l'IEC 60076-3 porte le numéro d'édition 3.1. Elle comprend la troisième édition (2013-07) [documents 14/745/FDIS et 14/749/RVD] et son amendement 1 (2018-03) [documents 14/947/FDIS et 14/952/RVD]. Le contenu technique est identique à celui de l'édition de base et à son amendement.

Cette version Finale ne montre pas les modifications apportées au contenu technique par l'amendement 1. Une version Redline montrant toutes les modifications est disponible dans cette publication.

La Norme internationale IEC 60076-3 a été établie par le comité d'études 14 de l'IEC: Transformateurs de puissance.

Cette troisième édition de l'IEC 60076-3 constitue une révision technique. Les modifications principales par rapport à l'édition antérieure sont les suivantes:

- Trois catégories de transformateurs sont clairement identifiées ainsi que les exigences d'essais correspondantes, elles sont résumées dans le Tableau 1.
- Les niveaux de tenue au choc de manœuvre sont définis pour toutes les valeurs de $U_m > 72,5\text{kV}$.
- La procédure d'essais de tension induite avec PD a été révisée pour garantir des tensions d'essais entre phase adéquates.
- L'essai de tenue en tension alternative a été redéfini (LTAC à la place de ACSD).
- Les niveaux d'essais de tenue en tension induite sont à présent fondés sur U_f plutôt que sur U_m .
- De nouvelles exigences relatives à la forme de l'onde de choc (facteur k) ont été introduites.
- Les tableaux des niveaux d'essai ont été fusionnés et leurs valeurs alignés sur celles de l'IEC 60071-1:2010.
- Des niveaux d'essai supplémentaires ont été introduits pour $U_m > 800\text{kV}$.
- Une nouvelle Annexe E a été introduite, qui fixe certains des principes utilisés pour le choix des essais, des niveaux d'essai et des distances d'isolement dans l'air.

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/IEC, Partie 2.

Une liste de toutes les parties de la série IEC 60076, présentées sous le titre général *Transformateurs de puissance*, peut être consultée sur le site web de l'IEC.

Le comité a décidé que le contenu de la publication de base et de son amendement ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives à la publication recherchée. A cette date, la publication sera

- reconduite,
- supprimée,
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

INTRODUCTION

La présente partie de l'IEC 60076 spécifie les exigences d'isolement et d'essais diélectriques correspondants en faisant référence aux enroulements spécifiques et à leurs bornes. Elle recommande également les distances d'isolement dans l'air (Article 16).

Les niveaux d'isolement et les essais diélectriques qui sont spécifiés dans la présente norme s'appliquent uniquement à l'isolation interne. Il convient que les valeurs de tension de tenue assignée spécifiées pour l'isolation interne du transformateur soient également choisies comme référence pour son isolation externe, mais ceci peut ne pas être vrai dans tous les cas. Un défaut de l'isolation interne non auto-régénératrice est catastrophique et conduit normalement à une mise hors service du transformateur pour une longue période, tandis qu'un claquage externe peut entraîner seulement une courte interruption de service sans causer de dommage durable. Par conséquent, il est possible que soient spécifiées par l'acheteur pour accroître la sûreté de fonctionnement, des tensions d'essai plus élevées pour l'isolation interne du transformateur, que pour l'isolation externe des autres composants du réseau. Lorsqu'une telle distinction est faite, il convient que les distances d'isolement externes soient ajustées afin de satisfaire pleinement aux exigences d'essai de l'isolation interne.

L'Annexe E énonce certains des principes utilisés pour le choix des essais, des niveaux d'essai et des distances d'isolement dans l'air des transformateurs en fonction de la tension la plus élevée pour le matériel U_m .

TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE –

Partie 3: Niveaux d'isolement, essais diélectriques et distances d'isolement dans l'air

1 Domaine d'application

La présente Norme internationale s'applique aux transformateurs de puissance définis dans le domaine d'application de l'IEC 60076-1. Elle fournit les détails des essais diélectriques et des niveaux d'essai diélectriques minimum applicables. Des distances d'isolement dans l'air minimales recommandées entre les parties sous tension et entre ces dernières et la terre sont précisées pour être utilisées lorsque ces distances dans l'air ne sont pas spécifiées par l'acheteur.

Pour les catégories de transformateurs de puissance et de bobines d'inductance qui disposent d'une norme IEC qui leur est propre, la présente norme est applicable uniquement dans la mesure où il y est fait explicitement référence dans les autres normes.

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités en référence de manière normative, en intégralité ou en partie, dans le présent document et sont indispensables pour son application. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

IEC 60050-421, *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) – Chapitre 421: Transformateurs de puissance et bobines d'inductance*

IEC 60060-1, *Techniques des essais à haute tension – Partie 1: Définitions et exigences générales*

IEC 60060-2, *Techniques des essais à haute tension – Partie 2: Systèmes de mesure*

IEC 60071-1, *Coordination de l'isolement – Partie 1: Définitions, principes et règles*

IEC 60076-1, *Transformateurs de puissance – Partie 1: Généralités*

IEC 60137, *Traversées isolées pour tensions alternatives supérieures à 1 000 V*

IEC 60270, *Techniques des essais à haute tension – Mesures des décharges partielles*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions donnés dans les normes IEC 60076-1, IEC 60050-421, ainsi que les suivants s'appliquent.

3.1

tension la plus élevée pour le matériel applicable à un enroulement de transformateur

U_m

tension efficace vraie (r.m.s) la plus élevée entre phases, dans un réseau triphasé, pour laquelle est conçue l'isolation de l'enroulement du transformateur

3.2 tension assignée d'un enroulement

U_r

tension spécifiée pour être appliquée ou développée en fonctionnement à vide entre les bornes d'un enroulement sans prise, ou d'un enroulement avec prise connecté à la prise principale, pour un enroulement triphasé, il s'agit de la tension entre les bornes de ligne

Note 1 à l'article: Les tensions assignées de tous les enroulements, apparaissent simultanément en fonctionnement à vide, lorsque la tension appliquée à l'un d'entre eux est à sa valeur assignée.

Note 2 à l'article: Dans le cas des transformateurs monophasés destinés à être connectés en étoile pour construire un groupe triphasé, ou à être connectés entre la ligne et le neutre d'un système triphasé, la tension assignée est indiquée par la tension entre phases divisée par $\sqrt{3}$, par exemple $400/\sqrt{3}$ kV.

Note 3 à l'article: Dans le cas des transformateurs monophasés destinés à être connectés entre les phases d'un réseau, la tension assignée est indiquée par la tension entre phases.

Note 4 à l'article: Pour l'enroulement série d'un transformateur série triphasé, qui est conçu avec des enroulements de phase indépendants, la tension assignée est indiquée comme si les enroulements de phases étaient connectés en étoile.

[SOURCE: IEC 60076-1:2011, 3.4.3]

3.3 niveau d'isolement assigné

ensemble de tensions de tenue assignées qui caractérisent la rigidité diélectrique de l'isolation

3.4 tension de tenue assignée

valeur de la tension d'essai appliquée dans l'un des essais diélectriques normalisés qui démontre que l'isolation satisfait à la tension d'essai assignée

3.5 isolation uniforme d'un enroulement de transformateur

isolation d'un enroulement de transformateur dont toutes les extrémités connectées aux bornes ont le même niveau d'isolement assigné

3.6 isolation non uniforme d'un enroulement de transformateur

isolation de l'enroulement d'un transformateur dont l'extrémité neutre est prévue pour être connectée directement ou indirectement à la terre, et qui est conçue avec un niveau d'isolement inférieur à celui attribué à la borne de ligne

Note 1 à l'article: L'isolation non uniforme peut également être désignée par le terme "isolation graduée".

4 Généralités

Les exigences concernant l'isolement des transformateurs de puissance et les essais d'isolement correspondants sont indiqués en référence à des enroulements spécifiques et à leurs bornes.

Pour les transformateurs immergés dans un liquide ou à isolation gazeuse, les exigences s'appliquent uniquement à l'isolation interne. Les exigences ou les essais additionnels éventuels concernant l'isolation externe qui sont jugés nécessaires doivent faire l'objet d'un accord entre le constructeur et l'acheteur. Lorsque l'acheteur ne spécifie aucune exigence particulière concernant les distances d'isolement dans l'air, les dispositions de l'Article 16 doivent alors s'appliquer. Si l'acheteur a l'intention de réaliser le branchement du transformateur d'une manière qui peut réduire les distances d'isolement dans l'air du transformateur seul, il convient que cela soit indiqué dans l'appel d'offres.

Les traversées doivent être soumises séparément à des essais de type et à des essais individuels de série conformément à l'IEC 60137 (y compris les niveaux d'essai des traversées adaptés au niveau d'essai de transformateur spécifique), qui consistent à vérifier leur isolation phase-terre, tant externe qu'interne.

Lorsqu'un transformateur est spécifié pour être mis en service à une altitude supérieure à 1 000 m, les distances d'isolement dans l'air doivent être conçues en conséquence. Il peut être alors nécessaire de choisir des traversées conçues pour des niveaux d'isolement plus élevés que ceux requis pour un fonctionnement à des altitudes moins élevées, voir l'Article 16 de la présente norme et l'IEC 60137.

Le constructeur peut protéger par un déflecteur les extrémités des traversées, si nécessaire, au cours des essais diélectriques, mais tous les déflecteurs installés sur les parties à la terre les plus proches des traversées doivent faire partie intégrante de la structure du transformateur en service, à l'exception des déflecteurs requis uniquement lors de la mesure des décharges partielles.

Les traversées et les changeurs de prises sont spécifiés, conçus et soumis à essai conformément aux normes IEC qui leur sont applicables. Les essais diélectriques effectués sur le transformateur complet, constituent une vérification que le choix et l'installation de ces composants sont satisfaisants. Dans le cas de changeurs de prises qui, selon l'IEC 60214-1, ne sont pas soumis à des essais individuels diélectriques dans l'usine du constructeur de changeurs de prises, les essais effectués selon la présente norme constituent également les seuls essais diélectriques individuels de série effectués sur ce composant.

La température du système d'isolement ne doit pas être inférieure à 10 °C pendant les essais, mais des températures plus élevées que celles données dans l'IEC 60076-1 peuvent être acceptées.

Le transformateur doit être assemblé entièrement comme en service, vis à vis de tous les éléments susceptibles d'influer sur sa tenue diélectrique. Il est habituellement admis que le liquide ou le gaz isolant ne circule pas pendant les essais, il n'est donc pas nécessaire de monter les réfrigérants. Tout équipement ou matériel conçu pour recueillir ou détecter un gaz libre produit par des défauts d'isolement, doit être installé et surveillé pendant les essais. Lorsque la présence de gaz libre est détectée au cours de l'un des essais, la nature et l'origine de production du gaz doivent être analysées et toute action ultérieure éventuelle doit faire l'objet d'un accord entre l'acheteur et le constructeur.

NOTE 1 Les dispositifs de protection contre les surtensions externes tels que les parafoudres n'ont pas besoin d'être assemblés et les éclateurs de traversée peuvent être enlevés ou leur écartement augmenté pour éviter un fonctionnement au cours des essais.

NOTE 2 Il est de pratique courante pour les grands transformateurs, de procéder à des prises d'échantillon d'huile afin d'analyse des gaz dissous, avant et après les essais diélectriques pour analyser les gaz dissous.

Les transformateurs immergés dans un liquide doivent être soumis aux essais avec le même type de liquide (minéral, ester, silicone, etc.) et répondant aux mêmes spécifications (eu égard aux propriétés susceptibles d'affecter les résultats des essais) que celui qu'ils contiendront en service.

NOTE 3 Certains acheteurs peuvent exiger que le liquide isolant circule dans des transformateurs refroidis par circulation dirigée de liquide (OD) au cours de l'essai IVPD afin de détecter la tendance à l'électrification statique, ceci constituant une exigence très spécifique n'est pas couvert par la présente norme.

Il convient de concevoir les transformateurs raccordés par boîtes à câbles ou par connexion directe à des installations sous enveloppe métallique isolée au SF₆ de telle sorte que des connexions temporaires puissent être utilisées pour les essais diélectriques, en utilisant des traversées provisoires si nécessaire. Par accord entre le constructeur et l'acheteur, les traversées définitives liquide vers SF₆ peuvent être remplacé par des traversées liquide vers air pour les essais, dans ce cas, la conception de l'extrémité intérieure au transformateur de la traversée, y compris les positions des parties sous tension et les distances d'isolement des

traversées de remplacement, doit être identique (dans la limite des variations normales des dimensions de la traversée liées aux tolérances de fabrication), à celle des traversées utilisées en service.

Lorsque le constructeur a l'intention d'utiliser des éléments non linéaires (par exemple, des parafoudres ou des éclateurs), intégrés au transformateur ou au changeur de prises, ou disposés à l'extérieur, afin de limiter les surtensions transitoires, cela doit être porté à la connaissance de l'acheteur au moment de l'appel d'offres et de la commande, et doit par ailleurs être indiqué sur le schéma de circuits de la plaque signalétique du transformateur.

Lorsque des bornes du transformateur doivent être laissées non connectées lorsque ce dernier est mis sous tension en service, il est alors nécessaire de tenir compte de la possibilité d'un transfert de tension au niveau des bornes non connectées, voir Annexe B. Lors des essais au choc de foudre, toutes les bornes de ligne et neutres non soumises à l'essai sont reliées normalement à la terre, voir Article 13.

5 Tension la plus élevée pour le matériel et niveau d'isolement assigné

Une valeur de tension la plus élevée pour le matériel U_m (voir Article 3) est attribuée tant à l'extrémité de ligne, qu'à l'extrémité neutre de chaque enroulement, voir l'IEC 60076-1.

Les règles applicables aux essais diélectriques dépendent de la valeur de U_m . Lorsque les règles concernant les essais pour les différents enroulements d'un transformateur sont en contradiction, la règle relative à l'enroulement disposant de la valeur de U_m la plus élevée doit s'appliquer pour le transformateur dans son ensemble.

Les enroulements série (que l'on trouve, par exemple, dans les autotransformateurs et les transformateurs déphaseurs) dont la tension assignée est inférieure à celle du réseau, doivent avoir valeur de U_m correspondant à la tension assignée la plus élevée du réseau auquel l'enroulement est connecté.

Les valeurs normalisées de U_m sont énumérées dans le Tableau 2. Sauf spécification contraire, la valeur à utiliser pour un enroulement de transformateur est celle qui est égale, ou immédiatement supérieure, à la valeur de la tension assignée de l'enroulement.

NOTE 1 Les transformateurs monophasés destinés au couplage étoile pour former un banc triphasé sont désignés par leur tension assignée entre phases divisé par $\sqrt{3}$, par exemple $400 / \sqrt{3}$ kV. La valeur entre phases détermine le choix de U_m dans ce cas, et par conséquent, $U_m = 420$ kV (voir également l'IEC 60076-1). Le même principe s'applique aux transformateurs monophasés destinés à être utilisés dans un réseau monophasé, en ce sens que la tension maximale phase-terre est multipliée par $\sqrt{3}$ afin d'obtenir la valeur U_m équivalente de manière à définir les tensions d'essai.

NOTE 2 Pour les enroulements de transformateurs destinés à être utilisés dans les applications d'alimentation de réseaux ferroviaires où deux tensions phase-terre opposées sont fournies, la valeur U_m se rapporte à la tension entre phases, sauf spécification contraire.

NOTE 3 Il peut arriver que certaines tensions de prise soient choisies légèrement supérieures à une valeur normalisée de U_m mais que le réseau auquel l'enroulement sera connecté ait une tension la plus élevée qui reste au inférieure à la valeur normalisée. Les exigences d'isolement sont coordonnées avec les conditions réelles, et cette valeur normalisée peut être acceptée comme valeur de U_m pour le transformateur, et non pas la valeur immédiatement supérieure.

NOTE 4 Dans certaines applications avec des conditions très spéciales, la spécification d'autres combinaisons de tensions de tenue peut être justifiée. Dans de tels cas, il convient de suivre les recommandations générales de l'IEC 60071-1.

NOTE 5 Dans certaines applications, les enroulements couplés en triangle sont mis à la terre sur une des bornes extérieures. Dans ces applications, une tension de tenue plus élevée eu égard à la tension la plus élevée pour le matériel U_m peut être requise pour cet enroulement, et est susceptible de faire l'objet d'un accord entre le constructeur et l'acheteur.

La tension la plus élevée pour le matériel U_m et le niveau d'isolement assigné (ensemble des tensions de tenue assignées définies) déterminent les caractéristiques diélectriques d'un transformateur. Ces caractéristiques sont vérifiées par un ensemble d'essais diélectriques, voir l'Article 7.

La valeur de U_m et le niveau d'isolement assigné qui sont attribués à chaque enroulement d'un transformateur font partie intégrante des informations qui doivent accompagner un appel d'offres et une commande. S'il existe un enroulement à isolation non uniforme, la valeur de U_m attribuée et le niveau d'isolement assigné de l'extrémité neutre peuvent également être spécifiés par l'acheteur, voir 7.4.

Le niveau d'isolement assigné doit être caractérisé comme suit:

U_m / SI / LI / LIC / AC avec les valeurs associées (voir les exemples ci-dessous) pour les bornes de ligne de chaque enroulement

Lorsqu' aucun niveau de tension de tenue SI ou LIC n'est attribué à l'enroulement, alors l'abréviation correspondante est exclue des caractéristiques assignées, et ainsi pour les bornes auxquelles aucun niveau de tension de tenue au choc de manœuvre ou aucun niveau de tension de tenue au choc de foudre en onde coupée n'est attribué, de même que pour les bornes neutres, l'abréviation serait la suivante:

U_m / LI / AC avec les valeurs associées

Lorsque le même niveau d'isolement assigné que celui de la borne de ligne est attribué à la borne neutre d'un enroulement, il n'est alors pas nécessaire de présenter de manière séparée le niveau d'isolement assigné du neutre.

Les abréviations ci-dessus et dans les exemples ci-dessous ont les significations suivantes:

- SI est le niveau de tension de tenue au choc de manœuvre assigné (*Switching Impulse* en anglais) pour les bornes de ligne de l'enroulement avec la valeur de U_m la plus élevée;
- LI est le niveau de tension de tenue au choc de foudre (*Lightning Impulse* en anglais) assigné pour la borne de chaque enroulement;
- LIC est le niveau de tension de tenue au choc de foudre en onde coupée (*Lightning Impulse Chopped wave* en anglais) assigné pour les bornes de ligne de chaque enroulement individuel en cas de réalisation d'un essai au choc de foudre en onde coupée;
- AC est le niveau de tension de tenue alternative (*Alternative Current* en anglais) assigné le plus élevé à la terre, conçu pour les bornes de chaque enroulement.

NOTE 6 La valeur AC est la valeur pour laquelle le transformateur est conçu, il s'agit généralement de la tension alternative la plus élevée qui doit être obtenue en essai.

HT haute tension;

BT basse tension;

MT moyenne tension (tension intermédiaire, IEC 60076-1);

N neutre.

Les tensions de tenue assignées pour tous les enroulements doivent apparaître sur la plaque signalétique.

Les principes des notations abrégées normalisées sont indiqués dans les exemples ci-dessous.

EXEMPLE 1

Transformateur de tensions assignées de 66 / 11 kV U_m (HT) = 72,5 kV et U_m (BT) = 12 kV, tous les deux à isolation uniforme et à couplage Y (étoile), la plaque signalétique serait la suivante:

HT U_m 72,5 / LI 325 / AC 140 kV

BT U_m 12 / LI 75 / AC 28 kV

EXEMPLE 2

U_m (HT) ligne = 245 kV, à couplage Y (étoile) (tension assignée de 220 kV);

U_m (HT) neutre = 52 kV;

U_m (MT) ligne = 72,5 kV, à isolation uniforme et à couplage Y (étoile) (LIC non spécifié);

U_m (BT) ligne = 24 kV, à couplage D (triangle) LIC non requis.

La plaque signalétique serait la suivante:

HT U_m 245 / SI 750 / LI 950 / LIC 1045 / AC 395 kV

HTN U_m 52 / LI 250 / AC 95 kV

MT U_m 72,5 / LI 325 / AC 140 kV

BT U_m 24 / LI 125 / AC 50 kV

6 Transformateurs avec enroulements reconnectables

Sauf spécification contraire, les enroulements spécifiés comme pouvant être connectés selon plus d'une configuration en service doivent être soumis à essai dans chaque configuration.

7 Essais diélectriques

7.1 Vue d'ensemble

L'aptitude diélectrique de l'isolement d'un transformateur est vérifiée par des essais diélectriques. Ce qui suit constitue une explication générale des différents essais.

- **Essai de tenue au choc de foudre en onde pleine pour les bornes de ligne (LI)¹**, voir 13.2

L'essai est destiné à vérifier la capacité du transformateur à résister en service aux tensions transitoires à temps de montée rapide, généralement associés aux coups de foudre. L'essai permet de vérifier la tenue du transformateur en essai, lorsque l'onde de choc est appliquée sur ses extrémités de ligne. L'essai comporte des composantes de tension haute fréquence et génère des contraintes non uniformes dans l'enroulement en essai, différentes de celles générées pour un essai en tension alternative.

- **Essai de tenue au choc de foudre en onde coupée pour les bornes de ligne (LIC)²**, voir 13.3

Cet essai, en plus de couvrir les objectifs de l'essai du choc de foudre en onde pleine, permet également de vérifier la capacité du transformateur à résister à certains phénomènes haute fréquence susceptibles d'apparaître en service. Pour cet essai, l'essai au choc de foudre comprend à la fois des chocs en onde pleine et des chocs en onde coupée sur la queue afin de produire vitesses de changement de tension très élevées. La tension de choc pour l'essai en onde coupée a une valeur de crête plus élevée et comporte des composantes à fréquence plus élevée que le choc en onde pleine.

¹ *Lightning Impulse*, en anglais.

² *Lightning Impulse Chopped wave*, en anglais.

– **Essai de tenue au choc de foudre pour la borne neutre (LIN)**³, voir 13.4

L'essai est destiné à vérifier la tenue en tension de choc de l'extrémité neutre et du ou des enroulements reliés par rapport à la terre et aux autres enroulements, ainsi que le long du ou des enroulements en essai.

– **Essai de tenue au choc de manœuvre pour la borne de ligne (SI)**⁴, voir l'Article 14

L'essai est destiné à vérifier la capacité du transformateur à résister aux tensions transitoires ayant des temps de montée lent, généralement associées aux manœuvres en service. L'essai permet de vérifier la tenue au choc de manœuvre des extrémités de ligne et du ou des enroulements reliés par rapport à la terre et aux autres enroulements. L'essai permet également de vérifier la tenue entre phases, ainsi que le long du ou des enroulements en essai. Il s'agit d'un essai monophasé. La tension est répartie de manière inductive dans l'ensemble des enroulements du transformateur, les extrémités de ligne sont non connectées pendant l'essai et celles de la phase en essai sont portées par induction à une tension, déterminée approximativement par le rapport du nombre de spires du transformateur.

La répartition de la tension dans la phase soumise à l'essai est similaire à celle apparaissant pendant un essai de tenue de tension induite.

– **Essai par tension appliquée (AV)**⁵, voir l'Article 10

L'essai est destiné à vérifier la tenue en tension alternative des extrémités de ligne et de neutres et des enroulements qui y sont connectés par rapport à la terre et aux autres enroulements. La tension est appliquée simultanément à toutes les bornes d'un enroulement, y compris la borne neutre, excluant ainsi toute tension entre spires.

– **Essai de tenue en tension induite des extrémités de ligne (LTAC)**⁶, voir l'Article 12

L'essai est destiné à vérifier la tenue de tension alternative (AC) de chaque borne de ligne par rapport à la terre; Pendant l'essai, la tension apparaît à une ou plusieurs des bornes de ligne. Cet essai permet aux bornes de ligne d'un transformateur à isolation non uniforme d'être soumises à un essai au niveau d'essai de tension appliquée, correspondant aux extrémités de ligne.

– **Essai de tenue en tension induite (IVW)**⁷, voir 11.2

L'essai est destiné à vérifier la tenue en tension alternative de chaque borne de ligne et du ou des enroulements qui y sont connectés par rapport à la terre et aux autres enroulements et le long du ou des enroulements en essai, ainsi que la tenue entre phases. L'essai est effectué avec le transformateur connecté comme dans des conditions de service. Pendant l'essai, des tensions symétriques apparaissent à toutes les bornes de ligne et entre les spires, aucune tension n'apparaissant toutefois à la borne neutre. L'essai est effectué en appliquant une tension triphasée sur des transformateurs triphasés.

– **Essai de tenue en tension induite avec mesure de décharges partielles (IVPD)**⁸, voir 11.3

Cet essai est destiné à vérifier que le transformateur est exempt de toutes décharges partielles dangereuses dans les conditions normales de fonctionnement. La tension d'essai est appliquée de la même manière que la tension à laquelle est soumis le transformateur en service. Pendant l'essai, des tensions symétriques apparaissent à toutes les bornes de

³ *Lightning Impulse on Neutral*, en anglais.

⁴ *Switching Impulse*, en anglais.

⁵ *Applied Voltage*, en anglais.

⁶ *Line Terminal AC*, en anglais.

⁷ *Induced Voltage Withstand test*, en anglais.

⁸ *Induced Voltage with Partial Discharge measurement*, en anglais.

ligne et entre spires, aucune tension n'apparaissant au neutre. L'essai est effectué en appliquant une tension triphasée sur des transformateurs triphasés.

– **Essai d'isolement des circuits auxiliaires (AuxW)**⁹, voir l'Article 9

Cet essai permet de vérifier l'isolement des circuits auxiliaires du transformateur non connecté aux enroulements.

– **Chocs de foudre appliqués simultanément sur deux bornes ou plus (LIMT)**¹⁰, voir 13.1.4.3

Cet essai permet de vérifier que le transformateur peut résister aux surtensions internes susceptibles de se produire lorsque deux bornes ou plus sont soumises simultanément à un choc de foudre. L'essai s'applique uniquement à certains types particuliers de transformateur comportant un enroulement série court-circuitées en service (par exemple, certains transformateurs déphaseurs avec shuntage en charge), ou lorsque des chocs peuvent se produire simultanément en service sur deux bornes ou plus.

NOTE Cet essai est également appelé "essai au choc de foudre appliqué".

7.2 Exigences d'essai

7.2.1 Généralités

Les exigences concernant les essais diélectriques, à savoir les essais requis et les niveaux de tension d'essai, dépendent de la tension la plus élevée pour le matériel U_m pour l'enroulement à tension la plus élevée du transformateur considéré. Les essais requis sont résumés dans le Tableau 1 et les exigences spécifiques sont indiquées en 7.3.

NOTE Les essais de tenue aux chocs de foudre appliqués simultanément sur deux bornes de ligne ou plus constituent un essai spécial uniquement pour quelques types particuliers de transformateur, indépendamment de U_m , et ne figurent pas dans le tableau pour des raisons de clarté.

Les essais supplémentaires éventuels complétant les exigences de la présente norme et les niveaux de tension d'essai doivent être spécifiés par l'acheteur lors de l'appel d'offres et de la commande, car ils sont susceptibles d'affecter la conception du transformateur (voir Annexe C).

Il doit être fait référence à l'IEC 60060-1 pour obtenir les détails des essais. Lorsque la présente norme ne fournit aucune tolérance spécifique concernant les paramètres et les valeurs d'essai, les valeurs indiquées dans l'IEC 60060-1 doivent alors être utilisées.

⁹ *Auxiliary Wiring*, en anglais.

¹⁰ *Lightning Impulse Multi Terminal*, en anglais

Tableau 1 – Exigences et essais pour différentes catégories de transformateurs basés sur l'enroulement haute tension le plus élevé U_m

Isolation	$U_m \leq 72,5 \text{ kV}$	$72,5 \text{ kV} < U_m \leq 170 \text{ kV}$		$U_m > 170 \text{ kV}$
	Uniforme	Uniforme	Non uniforme	Uniforme et non uniforme
Essai au choc de foudre en onde pleine pour les bornes de ligne (LI)	Type	Individuel	Individuel	Non applicable (inclus dans LIC)
Essai au choc de foudre en onde coupée pour les bornes de ligne (LIC)	Spécial	Spécial	Spécial	Individuel
Essai au choc de foudre pour les bornes neutres (LIN)	Spécial	Spécial	Spécial	Spécial
Essai au choc de manœuvre pour la borne de ligne (SI)	Non applicable	Spécial	Spécial	Individuel
Essai de tension appliquée (AV)	Individuel	Individuel	Individuel	Individuel
Essai de tenue en tension induite (IVW)	Individuel	Individuel	Individuel	Non applicable
Essai de tenue en tension induite avec mesure de décharges partielles (IVPD)	Spécial ^a	Individuel ^a	Individuel ^a	Individuel
Essai de tenue en tension induite des extrémités de ligne (LTAC)	Non applicable	Spécial	Individuel ^b	Spécial
Essai d'isolement des circuits auxiliaires (AuxW)	Individuel	Individuel	Individuel	Individuel
^a Les exigences de l'essai IVW peuvent être intégrées à l'essai IVPD, de sorte qu'un seul essai soit requis. ^b Un essai au choc de manœuvre peut, par un accord entre le constructeur et l'acheteur, se substituer à l'essai LTAC pour cette catégorie de transformateurs.				

7.2.2 Niveaux de tension d'essai

Les niveaux des tensions de tenue normalisées, identifiés par la tension la plus élevée pour le matériel U_m d'un enroulement sont donnés dans le Tableau 2. Le choix entre les différents niveaux de tensions d'essai dans ces tableaux dépend de la sévérité des conditions de surtension prévisibles dans le réseau et de l'importance de l'installation particulière. Des indications sont fournies dans l'IEC 60071-1.

Toutes les tensions d'essai sont des tensions phase-terre.

Les valeurs les plus faibles indiquées dans le Tableau 2 pour une valeur particulière de U_m représentent les niveaux de tension d'essai minimum et doivent être appliquées en l'absence de toute autre spécification. Les valeurs indiquées dans chaque ligne du Tableau 2 sont généralement coordonnées. Lorsque seul un niveau de tension de choc de foudre est spécifié, les autres valeurs de la même ligne doivent alors être utilisées. L'acheteur peut spécifier pour chaque essai une valeur supérieure à la valeur minimale pour la valeur de U_m considérée, de préférence des valeurs normalisées et coordonnées, mais pas nécessairement des valeurs issues d'une seule ligne du Tableau 2. Lorsque des niveaux supérieurs sont spécifiés, ceci doit être indiqué dans l'appel d'offres et la commande.

Si, dans des circonstances particulières, l'acheteur considère que les niveaux minimum donnés dans le Tableau 2 sont trop élevés, les valeurs indiquées dans le Tableau 3 peuvent alors être utilisées. Les valeurs indiquées dans le Tableau 3 peuvent être utilisées uniquement si d'une part des mesures de prévention particulières ont été prises pour éviter l'apparition de surtension au-delà de l'aptitude du transformateur, et si d'autre part, soit des études

approfondies ont été menées à bien soit les valeurs utilisées représentent une pratique existante éprouvée applicable à l'installation particulière.

NOTE Certaines conditions d'installation, notamment lorsque la mise sous tension du transformateur s'effectue à partir de l'extrémité distante d'un câble ou d'une ligne aérienne de grande longueur, peuvent entraîner une exposition importante à des surtensions susceptibles d'être fréquentes et répétitives. Dans de tels cas, des tensions d'essais plus élevées, des essais au choc de foudre, des essais au choc de manœuvre et d'autres essais sur des unités particulières pourraient faire l'objet d'un accord entre le constructeur et l'acheteur. Par exemple, un enroulement avec une valeur $U_m < 1,1$ kV pourrait être soumis à des essais aux valeurs correspondantes à un enroulement avec une valeur U_m de 3,6 kV. La caractéristique tension-temps spécifique de la surtension est une considération importante lorsqu'il s'agit de déterminer le type et le niveau de l'essai requis pour garantir un fonctionnement satisfaisant.

Des défaillances ont notamment été signalées à des valeurs de U_m inférieures ou égales à 36 kV, lorsque le transformateur est mis sous/hors tension par un disjoncteur à vide, à partir de l'extrémité distante d'un câble, en raison de l'existence potentielle d'une condition résonante, provoquant des réamorçages et des tensions transitoires répétitives. Dans certains cas, il peut ne pas être suffisant d'accroître le niveau d'isolement, et d'autres méthodes, telles que l'installation d'un circuit amortisseur pourraient être envisagées. Des informations supplémentaires sont fournies dans la norme IEEE C57.142:2010 et le rapport CIGRE 12-14.

Tableau 2 – Niveaux de tension d'essai (1 de 2)

Tension la plus élevée pour l'enroulement du matériel U_m kV	Choc de foudre en onde pleine (LI) kV	Choc de foudre en onde coupée (LIC) kV	Choc de manœuvre (SI) kV	Tension appliquée ou tension de tenue en tension induite des extrémités de ligne (AV) (LTAC) kV
<1,1	–	–	–	3
3,6	20	22	–	10
	40	44	–	10
7,2	60	66	–	20
	75 ^a	83 ^a	–	20
12	75	83	–	28
	95	105	–	28
	110 ^a	121 ^a	–	34 ^a
17,5	95	105	–	38
	125 ^a	138 ^a	–	38
24	125	138	–	50
	145	160	–	50
	150 ^a	165 ^a	–	50
36	170	187	–	70
	200 ^a	220 ^a	–	70
52	250	275	–	95
72,5	325	358	–	140
	350 ^a	385 ^a	–	140
100	450	495	375 ^a	185
123	550	605	460 ^a	230
145	550	605	460 ^a	230
	650	715	540 ^a	275
170	650	715	540 ^a	275
	750	825	620 ^a	325
245	850	935	700 ^a	360
	950	1 045	750 ^a	395
	1 050	1 155	850 ^a	460

Tableau 2 (2 de 2)

Tension la plus élevée pour l'enroulement du matériel U_m kV	Choc de foudre en onde pleine (LI) kV	Choc de foudre en onde coupée (LIC) kV	Choc de manœuvre (SI) kV	Tension appliquée ou tension de tenue en tension induite des extrémités de ligne (AV) (LTAC) kV
300	950	1 045	750	395
	1 050	1 155	850	460
362	1 050	1 155	850	460
	1 175	1 290	950	510
420	1 175	1 290	950	510
	1 300	1 430	1 050	570
	1 425	1 570	1 175 ^a	630
550	1 300	1 430	1 050	570
	1 425	1 570	1 175	630
	1 550	1 705	1 300 ^a	680
	1 675 ^a	1 845 ^a	1 390 ^a	–
800	1 800	1 980	1 425	–
	1 950	2 145	1 550	–
	2 050 ^a	2 255 ^a	1 700 ^a	–
	2 100	2 310	1 675 ^a	–
1 100	1 950	2 145	1 425	–
	2 250	2 475	1 800	–
1 200	2 250	2 475	1 800	–

^a Ces valeurs ne figurent pas dans l'IEC 60071-1:2011 pour la valeur de U_m considérée, mais sont toutefois incluses dans la mesure où elles représentent soit la pratique courante dans certaines régions du monde, soit pour certains niveaux de choc de manœuvre, une valeur coordonnée à la valeur particulière du niveau de choc de foudre.

Tableau 3 – Niveaux de tension d'essai utilisés dans des cas particuliers

Tension la plus élevée pour l'enroulement du matériel U_m kV	Choc de foudre en onde pleine (LI) kV	Choc de foudre en onde coupée (LIC) kV	Choc de manœuvre (SI) kV	Tension appliquée ou tension de tenue en tension induite des extrémités de ligne (AV) (LTAC) kV
7,2	40	44	-	20
12	60	66	-	28
17,5	75	83	-	38
24	95	105	-	50
36	145	160	-	70
60 ^a	280 ^a	308 ^a	230 ^a	115 ^a
123 ^b	450 ^b	495 ^b	375 ^a	185 ^b
170 ^b	550 ^b	605 ^b	460 ^a	230 ^b
245	650 ^b	715 ^b	550 ^a	275 ^b
	750 ^b	825 ^b	620 ^a	325 ^b
300	850	935	750	395
362	950	1 045	850	395
420	1 050	1 155	850	460
550	1 175	1 290	950	510

^a Ces valeurs ne figurent pas dans l'IEC 60071-1:2011 pour la valeur particulière de U_m mais sont toutefois incluses dans la mesure où elles représentent la pratique courante dans certaines régions du monde.

^b Ces valeurs nécessitent une considération particulière, se reporter à l'IEC 60071-1:2011

7.2.3 Séquence d'essai

Les essais doivent être effectués selon l'ordre ci-dessous:

- a) essais au choc de foudre (LI, LIC, LIN, LIMT);
- b) choc de manœuvre (SI);
- c) essai de tension appliquée (AV);
- d) essai de tenue alternative d'une borne de ligne (LTAC);
- e) essai de tenue de tension induite (IVW);
- f) essai de tension induite avec mesure de décharges partielles (IVPD).

NOTE Il s'agit d'une liste exhaustive, et ces essais ne sont pas tous applicables à un transformateur particulier.

Par un accord entre le constructeur et l'acheteur, l'essai au choc de manœuvre peut être effectué avant l'essai au choc de foudre.

Si un essai IVPD doit être effectué, la séquence d'essai peut alors, par accord entre le constructeur et l'acheteur, être modifiée, à l'exception du fait que l'essai IVPD doit être le dernier essai diélectrique.

7.3 Exigences d'essai concernant les transformateurs spécifiques

7.3.1 Essais pour transformateurs avec $U_m \leq 72,5$ kV

7.3.1.1 Essais individuels

- a) Essai par tension appliquée (AV)

Un essai par tension appliquée doit être effectué selon la méthode indiquée à l'Article 10 sur chaque enroulement distinct du transformateur. Les tensions d'essai sont indiquées dans le Tableau 2.

NOTE Les transformateurs avec la valeur $U_m \leq 72,5$ kV sont supposés avoir une isolation d'enroulement uniforme afin de satisfaire à cet essai.

b) Essai de tenue en tension induite (IVW)

Un essai de tenue de tension induite doit être effectué selon la méthode indiquée en 11.2 avec une tension d'essai (phase-terre) de $(2 \times U_r) / \sqrt{3}$. Cet essai peut, lorsque l'acheteur en est d'accord, être remplacé par un essai IVPD avec une tension de pointe de $(2 \times U_r) / \sqrt{3}$, voir 7.3.1.3 a).

7.3.1.2 Essais de type

Essai au choc de foudre en ondes pleines (LI)

Un essai au choc de foudre en ondes pleines doit être effectué sur les bornes de ligne en appliquant la méthode indiquée en 13.1 et 13.2. Les tensions d'essai sont indiquées dans le Tableau 2.

7.3.1.3 Essais spéciaux

a) Essai de tension induite avec mesure des décharges partielles (IVPD)

Lorsque spécifié par l'acheteur, un essai doit être effectué selon la méthode indiquée en 11.3, avec un niveau de tension (phase-terre) de pointe de $(1,8 \times U_r) / \sqrt{3}$ et une tension de mesure de décharges partielles (DP) de $(1,58 \times U_r) / \sqrt{3}$. Des niveaux de tension alternative supérieurs peuvent être utilisés lorsque spécifiés par l'acheteur. Notamment une tension de pointe de $(\sqrt{3} \times U_m) / \sqrt{3}$ et une tension de mesure de DP de $(1,5 \times U_m) / \sqrt{3}$ peuvent être appliquées si elles sont plus élevées.

Lorsqu'un niveau de tension de pointe de $(2 \times U_r) / \sqrt{3}$ est appliqué, cet essai peut remplacer l'essai individuel de tenue de tension induite (IVW).

Une durée plus courte à la tension de mesure DP peut être convenue entre le constructeur et l'acheteur, mais une durée de 5 min est recommandée.

b) Essai au choc de foudre en ondes coupées (LIC)

Lorsque spécifié par l'acheteur, l'essai au choc de foudre en ondes pleines doit être remplacé par un essai au choc de foudre en ondes coupées selon la méthode indiquée en 13.1 et 13.3.

L'extension de l'essai au choc de foudre visant à inclure des chocs en ondes coupées sur la queue est recommandée, en tant qu'essai spécial, dans les cas où le transformateur est directement connecté à un poste sous enveloppe métallique isolé au SF6 par l'intermédiaire de traversées liquide/SF6 ou lorsque le transformateur est protégé par des éclateurs.

c) Essai au choc de foudre sur la borne neutre (LIN)

Lorsque spécifié par l'acheteur, un essai au choc de foudre en ondes pleines doit être effectué sur la borne neutre selon la méthode indiquée en 13.1 et 13.4. Ceci s'applique normalement si la borne neutre n'est pas reliée directement à la terre en service.

d) Chocs de foudre appliqués simultanément sur plusieurs bornes de ligne (LIMT)

Lorsque spécifié par l'acheteur, un essai au choc de foudre supplémentaire sur deux bornes ou plus connectées entre elles doit être effectué selon la méthode indiquée en 13.1, avec les connexions d'essai indiquées en 13.1.4.3. Sauf spécification contraire, le type d'essai est LI.

7.3.2 Essais sur transformateurs avec $72,5 \text{ kV} < U_m \leq 170 \text{ kV}$

7.3.2.1 Essais individuels

a) Essai au choc de foudre en ondes pleines (LI)

Un essai au choc de foudre en ondes pleines doit être effectué sur les bornes de ligne en appliquant la méthode indiquée à l'Article 13. Les tensions d'essai sont données dans le Tableau 2.

b) Essai par tension appliquée (AV)

Un essai par tension appliquée conforme à la méthode indiquée à l'Article 10 doit être effectué sur chaque enroulement distinct du transformateur. Les tensions d'essai sont indiquées dans le Tableau 2 pour les transformateurs à isolation uniforme. Pour les transformateurs à isolation non uniforme, l'essai doit être effectué avec la tension d'essai correspondant à l'extrémité neutre, voir 7.4.2.

c) Essai de tenue de tension induite (IVW)

Un essai de tenue de tension induite doit être effectué selon la méthode indiquée en 11.2 avec une tension d'essai (phase-terre) de $(2 \times U_r) / \sqrt{3}$. Cet essai peut, lorsque l'acheteur en est d'accord, être remplacé par un essai IVPD avec une tension de pointe de $(2 \times U_r) / \sqrt{3}$, voir e) ci-dessous.

d) Essai de tenue en tension induite des extrémités de ligne pour des transformateurs à isolation non uniforme (LTAC),

Pour les enroulements à isolation non uniforme, cet essai doit être effectué au niveau d'essai indiqué pour l'essai de tension appliquée correspondant à l'extrémité de ligne mentionnée dans le Tableau 2, en appliquant la méthode indiquée à l'Article 12. Sur accord entre le constructeur et l'acheteur, cet essai peut être omis lorsqu'un essai au choc de manœuvre est effectué.

e) Essai de tension induite avec mesure de décharges partielles (IVPD)

Un essai doit être effectué selon la méthode indiquée en 11.3, avec un niveau de tension (phase-terre) de pointe de $(1,8 \times U_r) / \sqrt{3}$ et une tension de mesure de décharges partielles (DP) de $(1,58 \times U_r) / \sqrt{3}$. D'autres niveaux de tension supérieurs peuvent être utilisés lorsque spécifiés par l'acheteur. Notamment une tension de pointe de $(\sqrt{3} \times U_m) / \sqrt{3}$ et une tension de mesure de DP de $(1,5 \times U_m) / \sqrt{3}$ peuvent être appliquées si elles sont plus élevées.

Lorsqu'un niveau de tension de pointe de $(2 \times U_r) / \sqrt{3}$ est appliqué, cet essai peut remplacer l'essai individuel de tenue de tension induite (IVW).

7.3.2.2 Essais spéciaux

a) Essai au choc de manœuvre (SI)

Lorsque spécifié par l'acheteur, un essai au choc de manœuvre, en appliquant la méthode indiquée à l'Article 14, doit être effectué sur les bornes de ligne. La tension d'essai est indiquée dans le Tableau 2. Lorsque cet essai est effectué, l'essai de tenue en tension induite des extrémités de ligne (LTAC) peut alors être omis selon accord.

b) Essai au choc de foudre en ondes coupées (LIC)

Lorsque spécifié par l'acheteur, l'essai au choc de foudre en ondes pleines doit être remplacé par un essai au choc de foudre en ondes coupées selon la méthode indiquée en 13.1 et 13.3.

L'extension de l'essai au choc de foudre visant à inclure des chocs en ondes coupées sur la queue est recommandée, en tant qu'essai spécial, dans les cas où le transformateur est directement connecté à un poste sous enveloppe métallique isolé au SF6 par l'intermédiaire de traversées liquide/SF6 ou lorsque le transformateur est protégé par des éclateurs.

c) Essai de tenue en tension induite des extrémités de ligne pour des transformateurs à isolation non uniforme (LTAC),

Lorsque spécifié par l'acheteur, pour les enroulements à isolation non uniforme, cet essai doit être effectué au niveau d'essai indiqué pour l'essai de tension appliquée correspondant à l'extrémité de ligne mentionnée dans le Tableau 2, en appliquant la méthode indiquée à l'Article 12.

d) Essai au choc de foudre sur la borne neutre (LIN)

Lorsque spécifié par l'acheteur, un essai au choc de foudre en ondes pleines doit être effectué sur la borne neutre. Ceci s'applique normalement si la borne neutre n'est pas reliée directement à la terre en service.

e) Chocs de foudre appliqués simultanément sur plusieurs bornes de ligne (LIMT)

Lorsque spécifié par l'acheteur, un essai au choc de foudre supplémentaire sur deux bornes ou plus connectées entre elles doit être effectué selon la méthode indiquée en 13.1, avec les connexions d'essai indiquées en 13.1.4.3. Sauf spécification contraire, le type d'essai est LI.

7.3.3 Essais sur transformateurs avec $U_m > 170$ kV

7.3.3.1 Essais individuels

a) Essai au choc de foudre en ondes coupées (LIC)

Un essai au choc de foudre en ondes coupées doit être effectué sur toutes les bornes de ligne avec une valeur $U_m > 170$ kV en appliquant la méthode indiquée à l'Article 13. Un essai au choc de foudre (LI) doit être effectué sur toutes les bornes de ligne avec une valeur $U_m \leq 170$ kV en appliquant la méthode indiquée à l'Article 13. Les tensions d'essai sont indiquées dans le Tableau 2. Si l'acheteur l'exige dans le contrat, les essais LIC doivent être en outre effectués sur les bornes de ligne avec une valeur $U_m \leq 170$ kV.

b) Essai au choc de manœuvre (SI)

Un essai au choc de manœuvre, en appliquant la méthode indiquée à l'Article 14, doit être effectué sur les bornes de ligne. La tension d'essai est indiquée dans le Tableau 2.

c) Essai par tension appliquée (AV)

Un essai par tension appliquée doit être effectué conformément à la méthode indiquée à l'Article 10 sur chaque enroulement distinct du transformateur. Les tensions d'essai sont indiquées dans le Tableau 2 pour les transformateurs à isolation uniforme. Pour les transformateurs à isolation non uniforme, l'essai doit être effectué avec la tension d'essai correspondant à l'extrémité neutre, voir 7.4.2.

d) Essai de tension induite avec mesure de décharges partielles (IVPD)

Un essai doit être effectué en appliquant la méthode indiquée en 11.3, avec un niveau de tension (phase-terre) de pointe de $(1,8 \times U_T)/\sqrt{3}$ et une tension de mesure des décharges partielles (DP) de $(1,58 \times U_T)/\sqrt{3}$ pendant une heure. Des niveaux de tension alternative supérieurs peuvent être utilisés lorsque spécifiés par l'acheteur. Notamment une tension de pointe de $(\sqrt{3} \times U_m)/\sqrt{3}$ et une tension de mesure des décharges partielles de $(1,5 \times U_m)/\sqrt{3}$ pendant une heure peuvent être appliquées si elles sont plus élevées.

NOTE Pour les transformateurs triphasés, la tension entre les phases au niveau de la pointe de l'essai IVPD peut être supérieure aux tensions de tenue alternatives phase-terre indiquées dans le Tableau 2.

7.3.3.2 Essais spéciaux

a) Essai au choc de foudre sur la borne neutre (LIN)

Lorsque spécifié par l'acheteur, un essai au choc de foudre en onde pleine doit être effectué sur la borne neutre. Ceci s'applique normalement si la borne neutre n'est pas reliée directement à la terre en service.

b) Essai de tenue en tension induite des extrémités de ligne pour des enroulements à isolation non uniforme (LTAC)

Lorsque spécifié par l'acheteur, cet essai doit être effectué au niveau d'essai indiqué pour l'essai de tension appliquée correspondant à l'extrémité de ligne mentionnée dans le Tableau 2, en appliquant la méthode indiquée à l'Article 12.

c) Chocs de foudre appliqués simultanément sur plusieurs bornes de ligne (LIMT)

Lorsque spécifié par l'acheteur, un essai au choc de foudre supplémentaire sur deux bornes ou plus connectées entre elles doit être effectué selon la méthode indiquée en 13.1, avec les connexions d'essai indiquées en 13.1.4.3. Sauf spécification contraire, le type d'essai est LIC.

7.4 Attribution de valeurs de tensions U_m et d'essai à la borne neutre d'un enroulement

7.4.1 Transformateurs avec $U_m \leq 72,5$ kV

Le neutre doit être soumis à un essai par tension appliqué à un niveau de tension identique à celui appliqué pour les extrémités de ligne. Lorsqu'un essai au choc de foudre sur la borne neutre est spécifié, le niveau d'essai doit alors être indiqué dans l'appel d'offres et la commande.

NOTE Les transformateurs dont la valeur $U_m \leq 72,5$ kV, doivent être conçus avec une isolation d'enroulement uniforme afin de satisfaire aux exigences d'essai.

7.4.2 Transformateurs avec $U_m > 72,5$ kV

7.4.2.1 Borne neutre directement mise à la terre

Lorsque la borne neutre doit être reliée de façon permanente à la terre en service, soit directement, soit par l'intermédiaire d'un transformateur de courant, mais sans ajout délibéré d'aucune impédance dans la connexion, la tension d'essai par tension appliquée doit alors être au moins égale à 38 kV ($U_m \geq 17,5$ kV). Des niveaux d'essai supérieurs peuvent être spécifiés.

Aucun essai de tenue au choc de foudre sur la borne neutre n'est recommandé, mais il peut cependant être spécifié.

7.4.2.2 Borne neutre non directement mise à la terre

La valeur U_m et les tensions d'essai applicables à l'extrémité neutre doivent être indiquées par l'acheteur lors de l'appel d'offres et la commande. La valeur U_m de la borne neutre varie suivant que la borne neutre est destinée à rester ouverte ou à être mise à la terre via une impédance (voir Annexe D). La valeur de U_m et les tensions d'essai doivent de préférence être choisies dans le Tableau 2. La valeur U_m ne doit en aucun cas être inférieure à 17,5 kV.

Lorsqu'un essai de tenue au choc de foudre sur la borne neutre est spécifié, le niveau d'essai doit alors être indiqué dans l'appel d'offres et la commande, et la tension de tenue de choc assignée de l'extrémité neutre doit être vérifiée par l'essai décrit en 13.4. Un essai au choc de foudre en onde coupée sur la borne neutre n'est pas applicable.

8 Essais diélectriques sur des transformateurs ayant déjà été mis en service

Tout transformateur devant être considéré comme conforme à la présente norme, de façon identique à un transformateur neuf (par exemple, suite à une réparation couverte par la garantie ou à un rembobinage et une réhabilitation complète destinée à remettre le transformateur dans un état "comme neuf"), doit être soumis une fois la réparation ou la remise à neuf achevées, à l'ensemble des essais individuels qu'exige la présente norme pour ce transformateur, et ce, à une tension égale à 100 % du niveau de la tension d'essai requise..

Tout transformateur réparé afin de recouvrer sa fonctionnalité (par exemple, suite à un claquage après de nombreuses années en service), mais qui doit toujours être considéré comme conforme à la présente norme, doit être soumis aux essais décrits dans la présente

norme, qui sont nécessaires pour vérifier la réparation à une tension d'essai comprise entre 80 % et 100 % du niveau de la tension d'essai d'origine. En règle générale, il convient de soumettre à essai toute nouvelle pièce d'un transformateur réparé, et ce, à une tension de 100 %, une tension de 80 % du niveau de la tension d'essai d'origine pouvant toutefois être considérée comme un niveau de tension d'essai adéquat permettant de vérifier que les pièces ou composants usagés sont adaptés à une poursuite de leur utilisation. Lorsque les anciennes et les nouvelles pièces font l'objet d'un essai simultanément, un accord portant sur le niveau de tension d'essai doit être conclu. L'essai IVPD doit être effectué à une tension égale à 100 % du niveau de tension d'essai d'origine. Il peut se révéler nécessaire de modifier les critères de décharge partielle selon les circonstances de l'essai, et cette modification doit faire l'objet d'un accord.

9 Isolement des circuits auxiliaires (AuxW)

Les circuits auxiliaires d'alimentation et de commande doivent être soumis à un essai par source séparée alternative, sous une tension par rapport à la terre de 2 kV pendant 1 min. L'essai est satisfait si aucun effondrement de tension ou aucun autre signe de claquage ne se produit. L'essai doit être effectué dans l'usine du constructeur, à moins que le transformateur ne doive être installé sur site par le constructeur, auquel cas l'essai peut être effectué sur site et non pas en usine. Les circuits déconnectés ou retirés pour être transportés, qui ont été soumis à un essai de 2 kV en usine, doivent être soumis à l'essai sur site suite à leur montage, soit en renouvelant l'essai en courant alternatif de 2 kV ou en réalisant une mesure de la résistance d'isolement en tension continu de 1 kV avec une résistance mesurée minimale de 1 MΩ.

Les circuits des enroulements secondaires d'un transformateur de courant doivent être soumis à un essai sous tension alternative de 2,5 kV par rapport à la terre pendant 1 min. L'essai doit être effectué dans l'usine du constructeur. Si la tension de saturation (*knee-point* en anglais) du transformateur de courant dépasse une tension alternative de 2 kV l'essai doit être effectué à une tension alternative de 4 kV. L'essai est satisfaisant si aucun effondrement de tension ou aucun autre signe de claquage ne se produit.

Les moteurs et autres appareils des équipements auxiliaires doivent satisfaire aux exigences d'isolement indiquées dans la norme IEC les concernant (qui sont généralement des valeurs plus faibles que la valeur spécifiée pour les seuls circuits, ce qui peut contraindre parfois à les débrancher pour soumettre les circuits à l'essai). Tous les dispositifs à semi-conducteurs et à microprocesseur doivent être exclus du circuit d'essai. Tous les relais de surveillance de tension triphasée et dispositifs débouchables doivent être retirés pendant les essais.

NOTE La pratique courante est de vérifier tous les circuits auxiliaires sur site à une tension continue de 1 kV pendant 1 min avant mise sous tension.

10 Essai de tension appliquée (AV)

L'essai doit être effectué sur chaque enroulement distinct du transformateur à tour de rôle.

La pleine tension d'essai doit être appliquée pendant 60 s entre toutes les bornes accessibles de l'enroulement en essai reliées entre elles et toutes les bornes accessibles des autres enroulements, le circuit magnétique, son habillage et la cuve ou l'enveloppe du transformateur, reliés ensemble à la terre.

L'essai doit être effectué avec une tension alternative monophasée approximativement sinusoïdale, et à une fréquence assignée au moins égale à 80 % de la fréquence assignée. La valeur de crête de la tension doit être mesurée. Cette valeur de crête divisée par $\sqrt{2}$ doit être égale à la valeur d'essai.

NOTE Approximativement sinusoïdale peut être considérée comme signifiant que la valeur de crête divisée par $\sqrt{2}$ ne diffère pas de la valeur efficace de la forme d'onde de plus d'environ 5 % (voir IEC 60060-1), des écarts plus importants pouvant toutefois être acceptés.

L'essai doit commencer à une tension inférieure ou égale au tiers de la valeur d'essai spécifiée, et la tension doit être portée à la valeur d'essai aussi rapidement que le permet la mesure. A la fin de l'essai, la tension doit être réduite rapidement à une tension inférieure au tiers de la valeur d'essai avant coupure.

L'essai est satisfaisant s'il ne se produit aucun effondrement de la tension d'essai.

Pour les enroulements à isolation non uniforme, l'essai est effectué avec la tension d'essai spécifiée pour l'extrémité neutre.

Dans les transformateurs où des enroulements dont les valeurs de U_m sont différentes sont reliés ensemble à l'intérieur du transformateur (habituellement des autotransformateurs), les tensions d'essai doivent être déterminées par l'isolement de l'extrémité neutre commune et sa valeur U_m assignée.

11 Essais de tension induite (IVW et IVPD)

11.1 Généralités

L'essai doit être effectué avec toutes les bornes neutres accessibles et toutes les autres bornes éventuelles qui sont normalement au potentiel à la terre en service, reliées à la terre. Pour les transformateurs triphasés, une tension d'essai triphasée symétrique doit être utilisée. Les bornes de ligne non reliées à l'alimentation d'essai doivent être laissées non connectées.

NOTE 1 Lorsque la tension est induite dans un enroulement sans neutre, les tensions par rapport à la terre sur chaque extrémité de cet enroulement, dépendent des capacités par rapport à la terre et par rapport aux autres enroulements. Tout claquage entre l'une des bornes de ligne et la terre au cours de l'essai peut générer des tensions supérieures au niveau d'essai par tension appliquée des autres bornes de l'enroulement. Des mesures de prévention adaptées peuvent être requises afin de tenir compte de cette possibilité.

Pendant l'essai, la tension d'essai correspondant à un enroulement sans réglage de tension doit apparaître aux bornes de cet enroulement, de sorte que les tensions entre les spires et entre phases aient le même rapport qu'entre la tension d'essai et la tension assignée. La tension doit être mesurée sur les bornes de l'enroulement ayant la tension la plus élevée, ou si ceci n'est pas réalisable, elle doit être mesurée aux bornes du transformateur qui sont reliées à l'alimentation.

Pour les transformateurs avec prises, l'essai doit être effectué avec le transformateur connecté sur la prise principale, sauf spécification ou accord contraire de l'acheteur.

Lorsque l'acheteur requiert une tension d'essai spécifique pour les enroulements à plus basse tension, qui soit supérieure à la tension déterminée dans le présent article, ceci doit alors être clairement indiqué dans l'appel d'offres et la commande, et un accord doit être conclu portant sur la méthode d'essai et les tensions d'essai apparaissant sur les enroulements à tension supérieure, et qui sont susceptibles en conséquence d'être supérieures aux tensions d'essai spécifiées.

L'essai doit être effectué dans des conditions d'excitation du transformateur exactement identiques à celles en service. La tension peut être induite de n'importe quel enroulement ou d'un enroulement spécial, voire de prises installées pour les essais.

Une tension alternative doit être appliquée aux bornes d'un enroulement du transformateur. La forme de la tension doit être aussi proche que possible d'une sinusoïde et sa fréquence suffisamment élevée par rapport à la fréquence assignée pour éviter un courant magnétisant excessif pendant l'essai.

La valeur de crête, telle que définie dans l'IEC 60060-1, divisée par $\sqrt{2}$ et la valeur efficace de la tension d'essai induite doivent être mesurées, et la plus faible de la valeur de crête divisée par $\sqrt{2}$ et de la valeur efficace vraie (*r.m.s.*) doivent être prises comme la valeur d'essai.

11.2 Essai de tenue de tension induite (IVW)

La durée de l'essai à la pleine tension d'essai doit être, sauf spécification contraire, de 60 s pour toute fréquence d'essai inférieure ou égale à 2 fois la fréquence assignée. Lorsque la fréquence d'essai est supérieure à 2 fois la fréquence assignée, la durée de l'essai exprimée en secondes doit être de:

$$120 \times \frac{\text{fréquence assignée}}{\text{fréquence d'essai}}, \text{ et non inférieure à 15 s}$$

L'essai doit commencer à une tension inférieure ou égale au tiers de la valeur d'essai spécifiée et la tension doit être portée à la valeur d'essai aussi rapidement que le permet la mesure. A la fin de l'essai, la tension doit être réduite rapidement à une tension inférieure au tiers de la valeur d'essai avant coupure.

L'essai est satisfaisant s'il ne se produit aucun effondrement de la tension d'essai.

11.3 Essai de tension induite avec mesure des décharges partielles (IVPD)

11.3.1 Généralités

Lorsque l'acheteur spécifie un type particulier de traversée supposé avoir un niveau de décharge partielle qui empêche d'effectuer des mesures précises des décharges partielles du transformateur en essai, il est admis d'échanger les traversées pour un type de traversée exempt de toute décharge partielle au cours de l'essai du transformateur.

11.3.2 Durée et fréquence d'essai

Sauf spécification contraire, la durée de l'essai à la tension de pointe doit être de 60 s dans le cas où $U_m \leq 800$ kV et de 300 s dans le cas où $U_m > 800$ kV pour toute fréquence d'essai inférieure ou égale à deux fois la fréquence assignée. Lorsque la fréquence d'essai est supérieure à 2 fois la fréquence assignée, la durée de l'essai exprimée en secondes doit être de:

$$120 \times \frac{\text{fréquence assignée}}{\text{fréquence d'essai}}, \text{ et non inférieure à 15 s pour } U_m \leq 800 \text{ kV}$$

ou

$$600 \times \frac{\text{fréquence assignée}}{\text{fréquence d'essai}}, \text{ et non inférieure à 75 s pour } U_m > 800 \text{ kV}$$

La durée de l'essai, à l'exception de la durée à la tension de pointe, doit être indépendante de la fréquence d'essai.

11.3.3 Séquence d'essai

La séquence d'essai doit être comme suit:

- a) La tension doit être appliquée à une valeur non supérieure à $(0,4 \times U_T) / \sqrt{3}$.

- b) La tension doit être portée à $(0,4 \times U_r)/\sqrt{3}$ et une mesure de bruit de fond des décharges partielles doit être effectuée et enregistrée.
- c) La tension doit être portée à $(1,2 \times U_r)/\sqrt{3}$ et être maintenue à ce niveau pendant une durée minimale de 1 min et seulement suffisamment longue pour effectuer une mesure des décharges partielles stables.
- d) Le niveau des décharges partielles doit être mesuré et enregistré.
- e) La tension doit être portée au niveau de la tension de mesure pendant une heure des décharges partielles et y être maintenue pendant une durée minimale de 5 min et suffisamment longue pour effectuer une mesure des décharges partielles stables.
- f) Le niveau des décharges partielles doit être mesuré et enregistré.
- g) La tension doit être portée à la tension de pointe et maintenue à ce niveau pendant la durée de l'essai spécifiée en 11.3.2.
- h) Immédiatement après la durée d'essai, la tension doit être réduite sans coupure au niveau de la tension de mesure pendant une heure des décharges partielles.
- i) Le niveau des décharges partielles doit être mesuré et enregistré.
- j) La tension doit être maintenue au niveau de la tension de mesure pendant une heure des décharges partielles, et ce; pendant une durée d'une heure au moins après la mesure des décharges partielles.
- k) Le niveau des décharges partielles doit être mesuré et enregistré toutes les 5 min au cours de la période d'une heure.
- l) Après la dernière mesure des décharges partielles au cours de la période d'une heure, la tension doit être réduite à $(1,2 \times U_r)/\sqrt{3}$ et être maintenue à ce niveau pendant une durée minimale de 1 min et suffisamment longue pour effectuer une mesure des décharges partielles stables.
- m) Le niveau des décharges partielles doit être mesuré et enregistré.
- n) La tension doit être réduite $(0,4 \times U_r)/\sqrt{3}$ et le niveau de bruit de fond des décharges partielles doit être mesuré et enregistré.
- o) La tension doit être réduite à une valeur inférieure à $(0,4 \times U_r)/\sqrt{3}$.
- p) La tension doit être alors coupée.

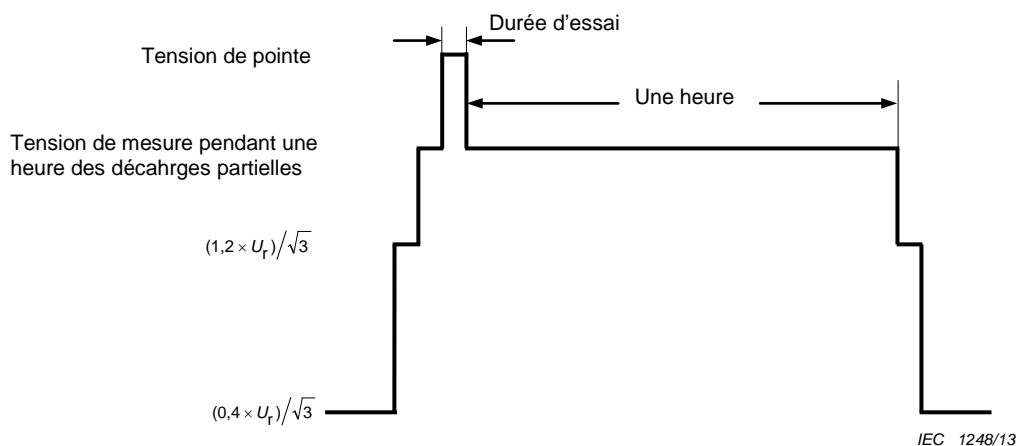
Le niveau des décharges partielles doit être observé de manière continue sur au moins une voie de mesure pendant toute la durée de l'essai.

Pendant la séquence d'essai, il convient de noter les tensions d'apparition et d'extinction de toute activité de décharges partielles significative, afin de faciliter l'évaluation du résultat d'essai si les critères d'essai ne sont pas satisfaits.

NOTE Il peut également être utile d'enregistrer l'image des DP (déphasage, charge apparente et nombre) de toute activité correspondante significative afin de faciliter l'évaluation.

Le niveau de tension de pointe et la tension de mesure pendant une heure des décharges partielles sont indiqués en 7.3.1.3, 7.3.2.1 et 7.3.3.1 en fonction de la valeur de U_m du transformateur.

Les principales caractéristiques de la séquence d'essai sont illustrées à la Figure 1.



NOTE Le niveau de tension de pointe et la tension de mesure pendant une heure des décharges partielles sont indiqués en 7.3.1.3, 7.3.2.1 et 7.3.3.1.

Figure 1 – Séquence d'application de la tension d'essai pour la tension induite avec mesure de décharges partielles (IVPD)

11.3.4 Mesure des décharges partielles (DP)

Les décharges partielles doivent être mesurées en utilisant une méthode conforme à l'IEC 60270.

Chaque voie de mesure des décharges partielles, y compris la traversée ou le condensateur de couplage associé(e), doit être étalonnée en termes de charge apparente (pC) selon la méthode indiquée dans l'IEC 60270.

La mesure des décharges partielles doit être indiquée en termes de charge apparente (pC) et doit faire référence aux impulsions répétitives permanentes les plus élevées indiquées par l'instrument de mesure.

Les pointes élevées de décharges partielles se produisant occasionnellement peuvent être négligées.

Pour chaque étape requise de mesure des décharges partielles dans la séquence d'essai, les mesures des dites décharges doivent être effectuées et enregistrées sur toutes les extrémités de ligne équipées, pendant l'essai, de traversées dont la valeur $U_m \geq 72,5$ kV. Toutefois, lorsqu'il y a plus de six bornes de ce type, il n'est alors nécessaire d'effectuer que six mesures (une mesure sur chacune des bornes aux tensions les plus élevées), sauf spécification contraire.

NOTE Les traversées avec une valeur $U_m \geq 72,5$ kV sont équipées de prises d'essai conformes à l'IEC 60137, qui peuvent être utilisées pour les mesures, si cet essai est spécifié comme un essai spécial destiné aux transformateurs avec une valeur $U_m < 72,5$ kV, la méthode de mesure doit alors faire l'objet d'un accord entre le constructeur et l'acheteur.

11.3.5 Critères d'acceptation de l'essai

L'essai peut être considéré comme valide uniquement lorsque le niveau de bruit de fond des décharges partielles ne dépasse pas 50 pC au début et à la fin de l'essai. Pour les essais appliqués aux bobines d'inductance shunt, un niveau de bruit de fond pouvant atteindre 100pC peut être accepté.

NOTE Le niveau de bruit de fond supérieur admis pour les essais des bobines d'inductance shunt est dû au fait que le filtrage de l'alimentation d'essai peut ne pas être possible dans le cas où un fort courant et une tension élevée sont nécessaires.

L'essai est satisfaisant si tous les critères suivants sont remplis:

- a) aucun effondrement de la tension d'essai ne se produit;
- b) aucun des niveaux de décharges partielles enregistrés au cours de la période d'une heure ne dépasse 250 pC;
- c) les niveaux de décharges partielles mesurés au cours de la période d'une heure ne présentent aucune tendance croissante, et aucune augmentation subite maintenue des niveaux au cours des dernières 20 min de l'essai ne se produit;
- d) les niveaux de décharges partielles mesurés au cours de la période d'une heure n'augmentent pas de plus de 50 pC;
- e) le niveau de décharges partielles mesuré à un niveau de tension de $(1,2 \times U_r) / \sqrt{3}$ au terme de la période d'une heure ne dépasse pas 100 pC.

Si les critères c) ou d) ne sont pas satisfaits, la période d'une heure peut être prolongée et ces critères sont considérés comme satisfaits s'ils sont remplis pendant une période continue d'une heure.

Tant qu'il ne se produit pas de claquage, ou tant que de très grandes décharges partielles ne sont pas maintenues pendant une longue durée, l'essai est considéré comme non destructif. Le non-respect des critères d'acceptation relatifs au niveau des décharges partielles ne doit donc pas autoriser un rejet immédiat, mais doit conduire à une concertation entre l'acheteur et le constructeur à propos d'examens complémentaires. Des suggestions concernant de telles procédures sont données dans l'Annexe A.

12 Essai de tenue de tension alternative d'une borne de ligne (LTAC)

L'essai doit être effectué de sorte que la tension d'essai apparaisse entre la borne en essai et la terre. Chaque borne de phase de l'enroulement en essai doit être soumise à l'essai à tour de rôle. La durée de l'essai, la fréquence et la tension appliquées doivent être telles que spécifiées pour l'essai de tenue de tension induite, voir 11.2.

Pour les transformateurs munis de prises et ayant un enroulement à plus basse tension à isolation non uniforme, la position des prises pendant l'essai doit être choisie de sorte que, lorsque la tension d'essai requise apparaît sur les bornes de l'enroulement à tension la plus élevée, la tension apparaissant sur les bornes de l'enroulement à plus basse tension soit être la plus proche possible de la valeur d'essai requise pour ce dernier. Pour les transformateurs dont l'enroulement à plus basse tension à isolation uniforme est soumis à un essai de tension appliquée, la prise utilisée peut être choisie par le constructeur.

L'essai est satisfaisant s'il ne se produit aucun effondrement de la tension d'essai.

NOTE Cet essai est conçu uniquement comme un essai de tenue par rapport à la terre de chaque extrémité de ligne d'un transformateur à isolation non uniforme, et il n'est pas destiné à vérifier par l'isolation entre phases ou entre spires. Le schéma d'essai peut ainsi être réalisé selon la manière la plus appropriée, par exemple, avec de la tension au neutre de manière à réduire la tension entre spires, l'essai étant par ailleurs effectué normalement comme trois essais monophasés. Dans des circonstances normales, l'essai au choc de manœuvre couvre intégralement l'objet de cet essai. Des mesures des décharges partielles peuvent être effectuées pendant cet essai si l'acheteur le requiert.

13 Essais au choc de foudre (LI, LIC, LIN, LIMT)

13.1 Exigences concernant tous les essais au choc de foudre

13.1.1 Généralités

Les définitions générales des termes relatifs aux essais au choc et les exigences concernant les circuits d'essai sont données dans l'IEC 60060-1. Les définitions générales des termes relatifs aux essais de performance et aux contrôles réguliers portant sur les dispositifs de

mesure agréés sont données dans l'IEC 60060-2. De plus amples informations sont données dans l'IEC 60076-4.

Pour les transformateurs immergés dans un liquide, la tension d'essai est normalement de polarité négative, parce que cela réduit le risque de claquages extérieurs aléatoires dans le circuit d'essai. L'acheteur peut spécifier que la polarité d'un, de plusieurs ou de l'ensemble des chocs soit positive. Lorsque l'acheteur requiert des chocs de polarité positive, ceci doit être indiqué dans l'appel d'offres et la commande. Si des polarités de choc combinées sont utilisées, des chocs de référence supplémentaires sont alors requis et la séquence d'essai doit faire l'objet d'un accord entre le constructeur et l'acheteur.

Il convient, avant d'appliquer un choc de polarité opposée, de prévoir une durée suffisante pour la dissipation de toute charge résiduelle

13.1.2 Positions des prises

Si la plage de réglage est inférieure ou égale à $\pm 5\%$, et si la puissance assignée du transformateur est $\leq 2\,500$ kVA, les essais au choc de foudre doivent alors être effectués avec le transformateur connecté sur la prise principale.

Si la plage de réglage est supérieure à $\pm 5\%$ ou si la puissance assignée du transformateur est $> 2\,500$ kVA, les deux prises extrêmes et la prise principale doivent alors être utilisées, sauf accord contraire, avec une prise pour chacune des trois phases individuelles d'un transformateur triphasé ou pour chacun des trois transformateurs monophasés conçus pour constituer un banc triphasé.

En variante, lorsque spécifié par l'acheteur et dans des cas particuliers tels qu'un seul transformateur monophasé, des changeurs de prises multiples, ou lorsque la plage de réglage n'est pas symétrique, la position des prises qui fournit les tensions internes les plus élevées (déterminées soit par calcul, soit par des mesures de choc à basses tensions) doit être utilisée. Lorsque des positions de prises distinctes donnent des tensions internes les plus élevées dans des parties de l'isolation différentes, alors après accord, ces diverses positions peuvent être essayées, en utilisant une position particulière sur chaque phase d'un transformateur triphasé.

NOTE Une attention toute particulière est attirée sur la différence entre les positions additive et soustractive de l'inverseur d'un enroulement à prises avec inversion ou d'un enroulement à prises de type grossier-fin, dans la mesure où ces positions donnent des tensions internes différentes.

Dans le cas d'un enroulement à prises de type grossier-fin, si le commutateur du changeur de prises comporte un élément non linéaire ou un éclateur, susceptible d'intervenir lorsque le transformateur est soumis à l'essai sur une position de prise particulière, une autre position de prise peut alors être choisie. Des recommandations sont fournies dans l'IEC 60076-4.

13.1.3 Enregistrements des essais

La tension d'essai appliquée doit être enregistrée au moyen d'un système de mesure conforme à l'IEC 60060-2. Les enregistrements obtenus doivent indiquer clairement la forme de la tension de choc appliquée (temps de front, durée jusqu'à la mi-valeur et amplitude).

La courbe enregistrée et la valeur extrême de la courbe enregistrée (telle que définie dans l'IEC 60060-1) doit figurer dans le rapport d'essais.

La valeur de la tension d'essai (après l'application de tout filtrage ou correction pour le dépassement (*overshoot*, en anglais), U_t voir IEC 60060-1) doit être consignée dans le rapport d'essai.

L'enregistrement doit comporter au moins une voie supplémentaire de mesure. Dans la plupart des cas, un oscillogramme du courant circulant de l'enroulement soumis à l'essai vers la terre (courant de neutre) ou le courant de fuite capacitif, c'est-à-dire le courant transféré à l'enroulement non soumis à l'essai et court-circuité, représente la meilleure sensibilité pour la

détection des défauts. Le courant circulant de la cuve vers la terre, ou la tension transférée à un enroulement non soumis à l'essai, sont des exemples d'autres grandeurs de mesure appropriées. La méthode de détection adoptée doit faire l'objet d'un accord entre le constructeur et l'acheteur.

D'autres recommandations concernant la détection des défauts, les durées d'échantillonnage temporel adaptées, etc. sont fournies dans l'IEC 60076-4.

13.1.4 Connexions d'essai

13.1.4.1 Connexions d'essai pendant les essais sur les bornes de ligne

La séquence d'essai au choc est appliquée successivement à chacune des extrémités de ligne de l'enroulement soumis à l'essai. Les autres bornes de ligne du transformateur doivent être mises à la terre directement ou, si nécessaire pour obtenir la forme d'onde requise, par l'intermédiaire d'une impédance. L'impédance ne doit pas dépasser la plus faible de l'impédance au choc du réseau relié (si une valeur est fournie par l'acheteur) ou de 400 Ω . Dans tous les cas, la tension apparaissant, au cours de l'essai au choc, sur les autres extrémités de ligne, ne doit pas être supérieure à 75 % de leur niveau de tension assignée de tenue au choc de foudre pour les enroulements à couplage en étoile, ou 50 % pour les enroulements à couplage en triangle. La valeur la plus faible de l'impédance à chaque borne nécessaire pour obtenir la forme d'onde requise doit être utilisée.

Si l'enroulement dispose d'une borne neutre, cette dernière doit être mise à la terre directement ou à travers une faible impédance telle qu'un shunt de mesure du courant. La cuve doit être mise à la terre. Si la forme d'onde requise ne peut pas être obtenue sans recourir à une résistance entre la borne neutre et la terre, une séquence d'essai au choc complète supplémentaire doit alors être appliquée. Dans ce cas, la première séquence d'essai au choc soumet à l'essai l'enroulement à pleine tension sans la résistance, mais la forme d'onde requise peut ne pas être obtenue, la seconde séquence avec la résistance permettant d'obtenir la dite forme. Les ondes coupées, si nécessaire, ne sont pas répétées dans la seconde séquence.

Lorsqu'un transformateur comporte des éléments non linéaires internes tels que des parafoudres qui limitent la tension appliquée sur les parties internes pendant l'essai au choc, les dispositions de 13.2.3 s'appliquent. Les éléments non linéaires internes présents en service doivent également l'être pendant les essais. Les éléments non linéaires externes et d'autres éléments externes de contrôle de la tension tels que des condensateurs, doivent être déconnectés pour l'essai.

Le circuit de choc et les connexions de mesure doivent rester inchangés pendant les essais à tension de référence et à pleine tension.

Des exceptions à cette procédure générale sont indiquées en 13.3.2 et en 13.3.3.

NOTE Si l'acheteur requiert un essai au choc effectué sur un enroulement BT avec $U_m \leq 1,1$ kV, ceci est alors normalement appliqué à toutes les bornes BT (y compris les bornes neutres BT) reliées entre elles, les bornes de tension supérieure étant pour leur part mises à la terre.

13.1.4.2 Connexions d'essai pour les chocs de foudre appliqués sur les bornes neutres

Les chocs de foudre sont appliqués directement sur les extrémités neutres, toutes les autres bornes étant mises à la terre.

Lorsqu'un transformateur comporte des éléments non linéaires internes tels que des parafoudres qui limitent la tension appliquée sur les parties internes pendant l'essai au choc, les dispositions de 13.2.3 s'appliquent. Les éléments non linéaires internes présents en service doivent également l'être pendant les essais. Les éléments non linéaires externes doivent être déconnectés pour l'essai.

Pour les transformateurs ayant un enroulement à prises disposé physiquement près de l'extrémité neutre de l'enroulement, la connexion de prises correspondant au rapport maximal du nombre de spires doit être choisie pour l'essai au choc en l'absence d'une convention contraire entre l'acheteur et le constructeur.

Le circuit de choc et les connexions de mesure doivent rester inchangés pendant les essais à tension de référence et à pleine tension.

13.1.4.3 Connexions d'essai pour les chocs de foudre appliqués simultanément sur plusieurs bornes de ligne (LIMT)

L'acheteur doit spécifier les bornes à relier entre elles pour cet essai.

Les chocs de foudre doivent être appliqués simultanément aux bornes de ligne spécifiées reliées entre elles, avec les autres bornes mises à la terre. Les niveaux d'essai et les détails du dispositif d'essai doivent faire l'objet d'un accord. L'essai doit être effectué sur chaque phase à tour de rôle.

NOTE Les tensions qui apparaissent sur l'enroulement pendant cet essai peuvent dépasser de façon significative les tensions aux appliquées aux bornes.

13.2 Essai au choc de foudre en onde pleine (LI)

13.2.1 Forme d'onde, détermination de la valeur de la tension d'essai et des tolérances

Le choc appliqué lors de l'essai doit être un choc de foudre plein normalisé: $1,2 \mu\text{s} \pm 30 \% / 50 \mu\text{s} \pm 20 \%$

La valeur de la tension d'essai doit être la valeur de la tension d'essai telle que définie dans l'IEC 60060-1 (après application de la fonction de tension d'essai). Si l'amplitude relative maximale du dépassement est inférieure ou égale à 5 % ou, la valeur de la tension d'essai peut être considérée comme la valeur extrême définie dans l'IEC 60060-1.

La tolérance sur la valeur de la tension d'essai est $\pm 3 \%$.

Il est important que le constructeur évalue l'adéquation de son matériel d'essai à délivrer une forme d'onde comprise dans les tolérances applicables, en tenant compte de l'association particulière du transformateur et du matériel d'essai dès l'appel d'offres, et qu'il puisse raisonnablement penser satisfaire aux exigences. Dans les cas où le constructeur pense qu'il n'est pas raisonnablement possible d'obtenir la forme d'onde souhaitée du fait des caractéristiques du transformateur et qu'il est nécessaire d'appliquer les écarts de la forme d'onde admis dans les alinéas suivants, ceci doit alors être indiqué clairement dans l'appel d'offres. La valeur effective de l'énergie du générateur de choc doit être mise à disposition de l'acheteur sur demande.

NOTE 1 L'énergie minimale du générateur de choc requise pour satisfaire le temps de queue (50 μs) au cours d'un essai de choc effectué sur un transformateur peut être estimée à l'aide de l'équation suivante (cette équation constitue un simple guide et peut fort bien sous-estimer l'énergie requise. Les informations issues de l'expérience acquises lors d'essai de transformateurs similaires peuvent être utilisées lorsqu'elles sont disponibles):

$$E_{\min} = \frac{100 \times 2\pi \times f \times (t_2)^2}{z \times U^2} \times \left(\frac{U_{LI}}{\eta} \right)^2 \times S_r$$

où

- E_{\min} est l'énergie minimale requise du générateur de choc, en joules;
- f est la fréquence assignée du transformateur en hertz;
- t_2 est le temps de queue, en secondes; t_2 égal 50×10^{-6} s;
- z est l'impédance de court-circuit en % vue de la borne soumise à un choc, voir l'IEC 60076-1;
- U est la tension assignée entre phases de l'enroulement, en volts;
- U_{LI} est la tension d'essai au choc de foudre en onde pleine de l'enroulement soumis à l'essai, en volts;

η est l'efficacité du générateur de choc en p.u; $\eta = 1,0$;

S_r est la puissance assignée triphasée en volts-ampères pour laquelle l'impédance 'z' est définie.

Lorsque la forme de l'onde de choc normalisée ne peut raisonnablement être obtenue en raison d'une faible inductance des enroulements ou d'une capacité élevée par rapport à la terre, et lorsque la forme de l'onde de choc résultante est oscillante de sorte que l'amplitude de dépassement relative dépasse 5 %, il est alors possible d'accroître le temps de front qui s'applique aux enroulements soumis à un essai au choc de foudre en onde coupée, et ce, afin de réduire le dépassement. Dans tous les cas, avec $U_m \leq 800$ kV, le temps de front ne doit pas dépasser $2,5 \mu\text{s}$. Lorsque l'amplitude de dépassement relative dépasse 5 % au niveau de tension de choc en onde pleine, une fonction de tension d'essai doit alors être appliquée conformément à l'IEC 60060-1, afin de déterminer la valeur de tension d'essai. Il est admissible d'appliquer les exigences définies dans l'Annexe B de l'IEC 60060-1 à l'évaluation des paramètres du choc de foudre sans tenir compte de la valeur de dépassement.

NOTE 2 Cet article définit deux méthodes de traitement d'un dépassement de plus de 5 %. Le temps de front peut être augmenté, mais en cas de dépassement de $1,2 \mu\text{s} + 30 \%$, des ondes coupées sont alors nécessaires pour effectuer un essai à haute fréquence. En variante ou en plus, la tension de crête du choc (valeur maximale de la courbe enregistrée) est augmentée si le dépassement est supérieur à 5 % et si la fréquence d'oscillation est supérieure à environ 100 kHz, par l'application de la fonction de tension d'essai conformément à l'IEC 60060-1.

Pour les transformateurs avec une valeur $U_m > 800$ kV, il peut exister des cas où il n'est pas raisonnablement possible d'obtenir un temps de front inférieur à $2,5 \mu\text{s}$ du fait de la capacité très élevée par rapport à la terre. Dans ces cas, un temps de front de plus longue durée peut être accepté par un accord entre l'acheteur et le constructeur.

Si le temps de queue minimum n'est pas atteint, alors un temps de queue plus court peut être accepté par un accord entre le constructeur et l'acheteur, mais la tension d'essai doit être augmentée de 1 % pour chaque tranche de $2 \mu\text{s}$ par laquelle le temps de queue est inférieur à $40 \mu\text{s}$. Le temps de queue minimal admissible est de $20 \mu\text{s}$. Dans le cas de l'enroulement basse tension des transformateurs élévateurs de centrale de production, avec lesquels la connexion est établie de manière à empêcher tout choc de foudre direct en service, cette exigence peut alors être modifiée par un accord.

Des indications supplémentaires sont fournies dans l'IEC 60076-4.

13.2.2 Essais sur les transformateurs sans éléments non linéaires

13.2.2.1 Séquence d'essai

La séquence d'essai doit comprendre:

- a) un choc de référence d'une tension comprise entre 50 % et 70 % de la pleine tension d'essai;
- b) trois chocs ultérieurs à pleine tension.

Si, au cours d'une de ces applications, un claquage extérieur se produit dans le circuit ou le long d'un éclateur de traversée, ou si l'enregistrement échoue sur l'une des voies de mesure spécifiées, il ne doit pas être tenu compte de cette application et il doit être procédé à une nouvelle application.

NOTE Des chocs supplémentaires à des amplitudes ne dépassant pas le niveau de tension de choc de référence peuvent être appliqués, mais il n'est pas nécessaire de les faire figurer dans le rapport d'essai.

13.2.2.2 Critères d'acceptation de l'essai

L'essai est satisfaisant s'il n'y a pas de différences importantes entre les courbes de tension et de courant enregistrés sur la base du choc de référence et les courbes de même nature enregistrés à la pleine tension d'essai.

NOTE L'interprétation détaillée des enregistrements d'essai et la distinction entre les différences marginales et les différences indicatrices d'un défaut requièrent un niveau de compétence et d'expérience important. De plus amples informations sont données dans l'IEC 60076-4.

En cas d'effondrement ou d'écart de tension, et si le constructeur et l'acheteur conviennent que l'essai n'est pas immédiatement un échec, la séquence d'essai doit être achevée, et la séquence d'essai complète doit alors être répétée en appliquant le choc de référence d'origine. L'essai échoue lorsque tout effondrement ou écart de tension supplémentaire est observé.

Les observations supplémentaires au cours de l'essai (sons anormaux, etc.) peuvent permettre de confirmer l'interprétation des enregistrements, mais ne constituent pas une preuve en soi.

13.2.3 Essais sur les transformateurs avec éléments non linéaires

13.2.3.1 Séquence d'essai

Lorsque des éléments non linéaires ou des parafoudres sont intégrés au transformateur afin de limiter les transitoires de surtension transmis, ils peuvent intervenir au cours de la séquence d'essai, et ceci peut générer des différences entre les enregistrements de choc effectués aux différentes tensions. Il existe une tension de seuil à laquelle les différences générées par les éléments non linéaires commencent à apparaître, et la séquence d'essai doit comporter au moins un enregistrement en dessous de ce seuil.

La séquence d'essai doit comprendre:

- a) un choc de référence à une tension comprise entre 50 % et 60 % de la pleine tension d'essai;
- b) un choc de référence à une tension comprise entre 60 % et 75 % de la pleine tension d'essai;
- c) un choc de référence à une tension comprise entre 75 % et 90 % de la pleine tension d'essai;
- d) trois chocs consécutifs en onde pleine à 100 %;
- e) un choc de comparaison à une tension la plus proche possible de la tension spécifiée en c) ci-dessus;
- f) un choc de comparaison à une tension la plus proche possible de la tension spécifiée en b) ci-dessus;
- g) un choc de comparaison à une tension la plus proche possible de la tension spécifiée en a) ci-dessus.

Les tensions de choc de référence doivent être différentes l'une de l'autre d'au moins 10 % (du niveau de 100 %).

Si aucun des enregistrements en onde pleine à 100 % ne diffère de l'enregistrement de la tension la plus basse des enregistrements de chocs de référence, les chocs e), f) et g) ci-dessus peuvent alors être omis.

NOTE Des chocs supplémentaires à des amplitudes ne dépassant pas le niveau de tension de choc de référence peuvent être appliqués, mais il n'est pas nécessaire de les faire figurer dans le rapport d'essai.

Si, au cours d'une de ces applications, un claquage extérieur se produit dans le circuit ou le long d'un éclateur de traversée, ou si l'enregistrement échoue sur l'une des voies de mesure spécifiées, il ne doit pas être tenu compte de cette application et il doit être procédé à une nouvelle application.

13.2.3.2 Critères d'essai

L'essai est satisfaisant s'il n'y a pas de différences importantes entre les courbes de tension et de courant enregistrés sur la base du choc de référence à la tension la plus basse et les courbes de même nature enregistrés à la pleine tension d'essai.

Si tel n'est pas le cas, les enregistrements du courant et de la tension issus des chocs suivants doivent alors être comparés:

- a) et g)
- b) et f)
- c) et e)
- tous les enregistrements de chocs à un niveau de 100 %.

L'essai est satisfaisant en l'absence de différence significative entre les enregistrements comparés (au-delà de la différence qui peut raisonnablement s'expliquer par les faibles différences de la tension d'essai), et les modifications éventuelles entre les enregistrements successifs sont progressives et peu importantes, en conformité avec le bon fonctionnement de l'élément non linéaire.

NOTE De plus amples informations sont données dans l'IEC 60076-4.

En cas d'effondrement ou d'écart de tension, et si le constructeur et l'acheteur conviennent du non échec immédiat de l'essai, la séquence d'essai doit être achevée, et la séquence d'essai complète doit alors être répétée en appliquant le choc de référence d'origine. L'essai échoue lorsque tout effondrement ou écart de tension supplémentaire est observé.

Les observations supplémentaires au cours de l'essai (sans anormaux, etc.) peuvent permettre de confirmer l'interprétation des enregistrements, mais ne constituent pas une preuve en soi.

13.3 Essai au choc de foudre en onde coupée (LIC)

13.3.1 Forme d'onde

La forme d'onde des chocs en onde pleine doit être telle qu'indiquée en 13.2.1. Le choc de foudre en onde coupée doit avoir une durée jusqu'à la coupure comprise entre 3 μ s et 6 μ s. La durée par rapport à la première tension nulle après la coupure effective doit être la plus courte possible. L'essai doit être effectué sans impédance complémentaire et intentionnelle dans le circuit de coupure, mais si l'oscillation observée au cours de l'application de tension réduite est supérieure à 30 %, l'impédance minimale requise pour porter cette oscillation en dessous de 30 % peut alors être ajoutée au circuit de coupure.

Un accord peut accepter une durée jusqu'à la coupure comprise entre 2 μ s et 3 μ s, sous réserve de l'obtention de la valeur de crête de l'onde de choc de foudre avant la coupure.

NOTE Les transformateurs sont normalement conçus pour résister à une oscillation par rapport à la polarité opposée de 30 % de l'amplitude du choc de foudre en onde coupée. Lorsque le transformateur doit être soumis à l'essai par un tiers l'oscillation sera limitée à cette valeur.

Habituellement, les mêmes réglages du générateur de choc et le même dispositif de mesure sont utilisés en ajoutant seulement le dispositif éclateur.

Des échelles de temps différentes peuvent être mises en œuvre pour enregistrer les chocs de foudre en onde coupée.

Il est recommandé d'utiliser un éclateur piloté à amorçage réglable, mais il est également permis d'utiliser un simple éclateur tige-tige.

La valeur de crête du choc de foudre en onde coupée doit être telle qu'indiquée dans le Tableau 2.

13.3.2 Essais sur les transformateurs sans éléments non linéaires

13.3.2.1 Séquence d'essai

L'essai est combiné avec l'essai au choc en onde pleine en une séquence unique. Sauf spécification contraire, l'ordre des différentes applications de choc doit être le suivant:

- a) un choc de référence en onde pleine à une tension comprise entre 50 % et 70 % de la tension d'essai au choc de foudre en onde pleine;
- b) un choc en onde pleine à la tension d'essai au choc de foudre en onde pleine;
- c) deux chocs en onde coupée à la tension d'essai au choc de foudre en onde coupée;
- d) deux chocs en onde pleine à la tension d'essai au choc de foudre en onde pleine.

Les voies de mesure et les enregistrements oscillographiques sont du même type que ceux spécifiés pour l'essai au choc en onde pleine.

NOTE Des chocs supplémentaires (en onde pleine ou coupée) à des amplitudes ne dépassant pas le niveau de la tension de choc de référence peuvent être appliqués, mais il n'est pas nécessaire de les faire figurer dans le rapport d'essai.

Si, au cours d'une de ces applications, un claquage extérieur se produit dans le circuit ou le long d'un éclateur de traversée, ou si l'enregistrement échoue sur l'une des voies de mesure spécifiées, il ne doit pas être tenu compte de cette application et il doit être procédé à une nouvelle application.

La même durée jusqu'à la coupure doit, dans toute la mesure du possible, être utilisée pour tous les chocs de foudre en onde coupée dans la séquence.

13.3.2.2 Critères d'essai

L'essai est satisfaisant s'il n'y a pas de différences importantes entre les transitoires de tension et de courant enregistrés sur la base du choc maximal à niveau réduit de référence et les transitoires de même nature enregistrés à la pleine tension d'essai, y compris les chocs en onde coupée jusqu'à la durée de coupure effective. Dans le cas des chocs en onde coupée, les différences ultérieures à la durée de coupure peuvent avoir pour origine les variations peu importantes des performances et de la synchronisation de l'éclateur.

NOTE L'interprétation détaillée des enregistrements d'essai et la distinction entre les différences marginales et les différences indicatrices d'un défaut requièrent un niveau de compétence et d'expérience important. De plus amples informations sont données dans l'IEC 60076-4.

En cas d'effondrement ou d'écart de tension, et si le constructeur et l'acheteur conviennent du non échec immédiat de l'essai, la séquence d'essai doit être achevée, et la séquence d'essai complète doit alors être répétée en appliquant le choc de référence d'origine. L'essai échoue lorsque tout effondrement ou écart de tension supplémentaire est observé.

Les observations supplémentaires au cours de l'essai (sans anormaux, etc.) peuvent permettre de confirmer l'interprétation des enregistrements, mais ne constituent pas une preuve en soi.

13.3.3 Essais sur les transformateurs avec éléments non linéaires

13.3.3.1 Séquence d'essai

L'essai est combiné avec l'essai au choc en onde pleine en une séquence unique.

Lorsque des éléments non linéaires ou des parafoudres sont intégrés au transformateur afin de limiter les transitoires de surtension transmis, ils peuvent intervenir au cours de la méthode d'essai, et ceci peut générer des différences entre les enregistrements de choc effectués aux différentes tensions. Il existe une tension de seuil à laquelle les différences générées par les

éléments non linéaires commencent à apparaître, et la séquence d'essai doit comporter au moins un enregistrement en dessous de ce seuil.

La séquence d'essai doit comprendre:

- a) un choc de référence en onde pleine à une tension comprise entre 50 % et 60 % de la tension d'essai au choc de foudre en onde pleine;
- b) un choc de référence en onde pleine à une tension comprise entre 60 % et 75 % de la tension d'essai au choc de foudre en onde pleine;
- c) un choc de référence en onde pleine à une tension comprise entre 75 % et 90 % de la tension d'essai au choc de foudre en onde pleine;
- d) un choc en onde pleine à la tension d'essai au choc de foudre en onde pleine;
- e) deux chocs en onde coupée à la tension d'essai au choc de foudre en onde coupée;
- f) deux chocs en onde pleine à la tension d'essai au choc de foudre en onde pleine;
- g) un choc de comparaison à une tension la plus proche possible de la tension spécifiée en c) ci-dessus;
- h) un choc de comparaison à une tension la plus proche possible de la tension spécifiée en b) ci-dessus;
- i) un choc de comparaison à une tension la plus proche possible de la tension spécifiée en a) ci-dessus.

Les tensions de choc de référence doivent être différentes l'une de l'autre d'au moins 10 % (du niveau de 100 %).

Si aucun des enregistrements en onde pleine à 100 % ne diffère de la tension la plus basse de l'enregistrement de choc de référence, les chocs g), h) et i) ci-dessus peuvent alors être omis.

L'intervalle de temps entre l'application de la dernière onde coupée et la première onde pleine après les ondes coupées doit être le plus court possible.

NOTE Des chocs supplémentaires (en onde pleine ou coupée) à des amplitudes ne dépassant pas 75 % du niveau maximum peuvent être appliqués, mais il n'est pas nécessaire de les faire figurer dans le rapport d'essai.

Si, au cours d'une de ces applications, un claquage extérieur se produit dans le circuit ou le long d'un éclateur de traversée, ou si l'enregistrement échoue sur l'une des voies de mesure spécifiées, il ne doit pas être tenu compte de cette application et il doit être procédé à une nouvelle application.

Les voies de mesure et les enregistrements oscillographiques sont du même type que ceux spécifiés pour l'essai au choc en onde pleine.

La même durée jusqu'à la coupure doit, dans toute la mesure du possible, être utilisée pour tous les chocs de foudre en onde coupée dans la séquence.

13.3.3.2 Critères d'essai

L'essai est satisfaisant s'il n'y a pas de différences importantes entre les courbes de tension et de courant enregistrés sur la base du choc de référence à la tension la plus basse et les courbes de même nature enregistrés à la pleine tension d'essai, y compris les chocs en onde coupée jusqu'à la durée de coupure effective. Dans le cas des chocs en onde coupée, les différences ultérieures à la durée de coupure peuvent avoir pour origine les variations peu importantes des performances et de la synchronisation de l'éclateur.

Si tel n'est pas le cas, les enregistrements du courant et de la tension issus des chocs suivants doivent alors être comparés:

- a) et i);

- b) et h);
- c) et g);
- tous les enregistrements de chocs à un niveau de 100 %;
- les deux enregistrements en onde coupée jusqu'à la durée de coupure effective.

L'essai est satisfaisant en l'absence de différence significative entre les enregistrements comparés (au-delà de la différence qui peut raisonnablement s'expliquer par les faibles différences de la tension d'essai), et il convient que les modifications éventuelles entre les enregistrements successifs soient progressives et peu importantes, en conformité avec le bon fonctionnement de l'élément non linéaire.

NOTE 1 De plus amples informations sont données dans l'IEC 60076-4.

En cas d'effondrement ou d'écart de tension, et si le constructeur et l'acheteur conviennent du non échec immédiat de l'essai, la séquence d'essai doit être achevée, et la séquence d'essai complète doit alors être répétée en appliquant le choc de référence d'origine. L'essai échoue lorsque tout effondrement ou écart de tension supplémentaire est observé.

Les observations supplémentaires au cours de l'essai (sons anormaux, etc.) peuvent permettre de confirmer l'interprétation des enregistrements, mais ne constituent pas une preuve en soi.

NOTE 2 Les informations fournies dans l'IEC 60076-4 avec référence à l'évaluation de la forme d'onde sont basées sur l'observation visuelle des enregistrements oscillographiques. Dans certains cas, il peut être approprié d'évaluer les paramètres des formes d'onde non normalisées et d'interpréter les écarts manuellement plutôt que de se fier entièrement aux outils informatiques.

13.4 Essai au choc de foudre sur une borne neutre (LIN)

13.4.1 Généralités

Les chocs de foudre en onde pleine au niveau de tension de choc spécifié pour l'extrémité neutre sont appliqués directement sur cette dernière avec toutes les autres bornes mises à la terre.

13.4.2 Forme d'onde

La forme d'onde des chocs en onde pleine doit être telle qu'indiquée en 13.2.1, à l'exception de la durée du front qui peut atteindre 13 μ s au maximum.

13.4.3 Séquence d'essai

Elle doit être telle qu'indiquée en 13.2.2.1 pour les transformateurs sans élément non linéaire et en 13.2.3.1 pour les transformateurs avec élément non linéaire.

13.4.4 Critères d'essai

Ils doivent être tels qu'indiqués en 13.2.2.2 pour les transformateurs sans élément non linéaire et en 13.2.3.2 pour les transformateurs avec élément non linéaire.

14 Essai au choc de manœuvre (SI)

14.1 Généralités

Pendant les essais au choc de manœuvre, les tensions développées le long des différents enroulements sont approximativement proportionnelles au rapport des nombres de spires.

La tension d'essai au choc de manœuvre doit être celle spécifiée pour l'enroulement avec la valeur U_m la plus élevée. Si le rapport entre les enroulements est modifiable à l'aide de prises, ces dernières doivent être utilisées pour porter la tension d'essai de l'enroulement ayant une

valeur de U_m inférieure, à une valeur aussi proche que possible de la valeur d'essai correspondante donnée dans le Tableau 2. Les enroulements avec des valeurs U_m inférieures peuvent ne pas être soumis à leur pleine tension d'essai; ceci doit être admis. Lorsque les enroulements à plus basse tension n'ont pas un niveau de choc de manœuvre indiqué dans le Tableau 2, le constructeur peut alors choisir la position des prises pour essai sauf spécification contraire de l'acheteur.

Dans un transformateur triphasé, la tension développée pendant l'essai entre les bornes de ligne doit être égale à environ 1,5 fois la tension entre l'extrémité de ligne et l'extrémité de neutre.

14.2 Connexions d'essai

Les chocs sont appliqués soit directement à partir de la source de tension de choc à une borne de ligne de l'enroulement à tension la plus élevée, soit à un enroulement à plus basse tension, pour que la tension d'essai soit transmise inductivement à l'enroulement à tension la plus élevée. La tension d'essai spécifiée doit apparaître entre la borne de ligne de l'enroulement à tension la plus élevée et la terre. La tension doit être mesurée à la borne de ligne de l'enroulement à tension la plus élevée.

Un transformateur triphasé doit être soumis à l'essai phase par phase.

Les enroulements à couplage en étoile à neutre sorti doivent être mis à la terre à leur extrémité neutre, soit directement soit à travers une faible impédance telle qu'un shunt de mesure de courant. Une tension de polarité opposée et avec une amplitude réduite de moitié environ apparaît sur les deux bornes de ligne restantes qui peuvent être reliées ensemble, mais non reliées à la terre. Pour limiter la tension de polarité opposée à environ 50 % du niveau appliqué, il est admissible de relier des résistances d'amortissement de valeur élevée (5 k Ω à 20 k Ω) à la terre au niveau des bornes de phase non soumises à l'essai.

Pour les enroulements à couplage en triangle, la borne correspondant à l'autre extrémité de la phase en essai doit être mise à la terre directement ou par l'intermédiaire d'une faible impédance de mesure, et les autres bornes doivent être laissées non connectées. Les essais effectués sur un transformateur triphasé doivent être réalisés de manière à assurer la mise à la terre d'une borne différente de l'enroulement couplé en triangle pour chaque essai de phase. Les enroulements couplés en triangle, dont plus de trois bornes sont sorties, doivent avoir le triangle fermé pour l'essai.

Dans le cas d'un transformateur monophasé dont les deux extrémités d'un ou plusieurs enroulements sont connectées à une ligne en service, et pour lequel un essai au choc de manœuvre est spécifié, ce même essai doit être alors appliqué aux deux extrémités de l'enroulement.

Dans le cas d'un enroulement à couplage en étoile comportant une connexion neutre non sortie et non reliée à la terre de manière interne, il n'est pas toujours possible d'obtenir les tensions d'essai appropriées par une mise à la terre d'une ou de plusieurs bornes de ligne. Dans ce cas, la connexion d'essai doit faire l'objet d'un accord entre le constructeur et l'acheteur.

Les éclateurs de traversée peuvent être enlevés ou leur écartement augmenté pour éviter un amorçage pendant l'essai.

14.3 Forme d'onde

La tension d'essai est normalement de polarité négative pour réduire le risque d'un claquage extérieur aléatoire dans le circuit d'essai.

La surtension doit avoir un temps nécessaire pour atteindre la valeur de crête (T_p tel que défini dans l'IEC 60060-1) d'au moins 100 μ s, un temps supérieur à 90 % (T_d tel que défini dans

l'IEC 60060-1) de l'amplitude spécifiée d'au moins 200 μs , et un temps pour atteindre la valeur nulle (T_z tel que défini dans l'IEC 60060-1) de 1 000 μs au minimum.

NOTE 1 La forme de l'onde de surtension diffère intentionnellement de la forme d'onde normalisée de 250 / 2 500 μs recommandée dans l'IEC 60060-1, étant donné que cette norme est destinée aux équipements ne comportant pas de circuit magnétique saturable. Le temps nécessaire pour atteindre la valeur de crête est choisi comme suffisamment long pour obtenir une répartition de la tension essentiellement linéaire le long de l'enroulement.

Le temps pour atteindre la valeur nulle peut être augmenté en induisant un flux rémanent dans le circuit magnétique de sens opposé à celui induit pendant l'essai avant chaque essai à pleine tension. Ceci est normalement réalisé par l'application de surtension de forme similaire, mais de polarité opposée, à une tension ne dépassant pas 70 % du niveau d'essai maximal, mais d'autres méthodes peuvent toutefois être utilisées. Un temps pour atteindre la valeur nulle inférieur à 1 000 μs est admissible si, dans la mesure où la pratique le permet, une saturation maximale inverse du circuit magnétique est atteinte.

NOTE 2 Pendant l'essai, un flux important est développé dans le circuit magnétique. La surtension peut être maintenue jusqu'à ce que le circuit magnétique atteigne la saturation et que l'impédance magnétisante du transformateur soit considérablement réduite.

Pour les objets en essai sans circuit magnétique ou avec un type de circuit à entrefer, un temps pour atteindre la valeur nulle inférieure à 1 000 μs est admissible. Voir l'IEC 60076-4.

14.4 Séquence d'essai

La séquence d'essai doit comporter une surtension de référence à une tension comprise entre 50 % et 70 % de la pleine tension d'essai, et trois surtensions à la pleine tension. Un nombre suffisant d'applications à polarité inverse doit être effectué avant chaque surtension à pleine tension, afin de s'assurer que la magnétisation du circuit est similaire préalablement à chaque surtension en onde pleine, de sorte que le temps pour atteindre la première valeur nulle soit le plus uniforme possible.

NOTE Si le circuit magnétique ne sature pas lors des applications en pleine tension, les applications à polarité inverse peuvent alors ne pas être requises.

Des enregistrements oscillographiques de la forme d'onde de la surtension à la borne de ligne en essai et du courant entre l'enroulement en essai et la terre doivent être effectués. Si, au cours d'une de ces applications, un claquage extérieur se produit dans le circuit ou le long d'un éclateur de traversée, ou si l'enregistrement échoue sur l'une des voies de mesure spécifiées, il ne doit pas être tenu compte de cette application et il doit être procédé à une nouvelle application.

14.5 Critères d'essai

L'essai est satisfaisant s'il ne se produit pas d'effondrement brusque de la tension ou de discontinuité de la tension ou du courant indiquée sur les enregistrements oscillographiques.

Les observations supplémentaires au cours de l'essai (sons anormaux, etc.) peuvent permettre de confirmer les enregistrements oscillographiques, mais ne constituent pas une preuve en soi.

NOTE Des oscillogrammes successifs peuvent être différents du fait de l'influence de la saturation magnétique sur la durée des chocs.

15 Mesure prise suite à un défaut en essais

Lorsque le transformateur ne satisfait pas à l'un des essais diélectriques, la séquence d'essais diélectriques complète doit alors être répétée au niveau maximal après réparation. Toutefois dans les cas où il apparaît clairement que certaines pièces du transformateur ayant été soumises à l'ensemble des essais ne sont pas concernées par la défaillance ou la réparation, il peut alors ne pas être nécessaire de soumettre celles-ci à un nouvel essai, au choix de l'acheteur. Il est nécessaire de tenir tout particulièrement compte de la possibilité d'une

contamination ou d'un endommagement des autres pièces du transformateur par les transitoires internes.

Lorsqu'un transformateur ne satisfait pas à ses exigences d'essai et si l'anomalie relève de la traversée, et sous réserve que l'acheteur puisse constater que le transformateur n'est en aucune manière altéré par cette défaillance, il est admis de remplacer cette traversée et de poursuivre sans plus attendre l'essai sur le transformateur jusqu'à son achèvement.

Lorsqu'un essai n'est pas satisfait du fait d'un claquage externe au transformateur, l'essai concerné peut alors être répété et, s'il est satisfait, la séquence d'essai peut être achevée, et il n'est pas nécessaire de répéter les essais précédemment satisfaits.

16 Distances d'isolement dans l'air

16.1 Généralités

La présente partie de la norme s'applique lorsque l'acheteur ne spécifie pas les distances d'isolement dans l'air. Lorsque ces distances sont spécifiées, le constructeur peut utiliser des valeurs plus élevées si les essais le requièrent.

La distance d'isolement dans l'air est définie comme la distance la plus courte entre une partie métallique de l'extrémité de la traversée et une partie du transformateur, en considérant une droite qui ne traverse pas l'isolateur de la traversée.

La présente norme ne s'applique pas à la distance d'isolement entre les parties de la traversée elle-même et il est possible que la longueur de la traversée doive être supérieure aux distances d'isolement indiquées afin de satisfaire aux essais à effectuer sur la traversée.

La présente norme ne prend pas en compte le risque de pénétration d'oiseaux et d'autres animaux.

Les chiffres des distances d'isolement entre les bornes de ligne et la terre indiqués dans la présente norme sont basés sur ceux indiqués dans l'IEC 60071-1 pour une configuration d'électrodes pointe-structure pour un niveau de choc de foudre < 850 kV et la distance d'isolement conducteur-structure pour des niveaux de choc de foudre plus élevés. La distance d'isolement la plus élevée déterminée par un choc de manœuvre ou de foudre est appliquée. Les distances d'isolement entre phases sont basées sur celles indiquées dans l'IEC 60071-1 pour une structure d'électrodes conducteur-conducteur, basée sur le niveau de choc de manœuvre en considérant une valeur entre phases divisée par 1,5 entre phase et terre. Il est par conséquent supposé qu'à un niveau de choc de foudre ≥ 850 kV, les extrémités des traversées et les connexions éventuelles ont normalement une forme d'électrode arrondie.

On suppose que les pièces de fixation des conducteurs et les écrans de répartition de tension qui y sont associés ont une forme telle qu'ils ne réduisent pas la tension d'amorçage. On suppose également que la disposition des arrivées des conducteurs ne réduit pas les distances d'isolement effectives générées par le transformateur lui-même. La conception doit prévoir la connexion de conducteurs adaptés aux bornes de traversée qui s'éloignent du transformateur sans obérer les distances d'isolement indiquées dans le présent document.

Lorsque l'acheteur envisage de réaliser le raccordement de telle sorte que les distances d'isollements effectives risquent d'être réduites, ceci doit être indiqué dans l'appel d'offres.

En général, la disposition de distances d'isolement dans l'air adéquates devient techniquement difficile principalement pour les réseaux à haute tension, en particulier pour les unités relativement petites, ou lorsque l'espace d'installation est restreint. Le principe suivi dans la présente norme consiste à proposer des distances d'isolement minimales non critiques qui sont suffisantes, sans autre discussion ni justification, dans des conditions différentes de

réseau et de climat. D'autres distances d'isolement basées sur une pratique passée ou présente doivent faire l'objet d'un accord entre l'acheteur et le constructeur.

Les distances d'isolement recommandées se réfèrent aux tensions de tenue assignées de l'isolation interne du transformateur, sauf spécification contraire dans l'appel d'offre et lors de la commande. Lorsque les distances d'isolement du transformateur sont égales ou supérieures aux valeurs spécifiées dans la présente norme et que les grandeurs assignées associées aux traversées ont été correctement choisies selon l'IEC 60137, l'isolation externe du transformateur doit alors être considérée comme satisfaisante sans essai complémentaire.

NOTE 1 La tenue aux ondes de choc de l'isolation externe dépend de la polarité, contrairement à ce qui est admis pour l'isolation interne. Les essais spécifiés pour l'isolation interne du transformateur ne permettent pas de vérifier automatiquement que l'isolation externe est satisfaisante. Les distances d'isolement recommandées sont dimensionnées pour la polarité la plus contraignante (positive).

NOTE 2 Il est admis que dans certains pays, les distances d'isolement peuvent être différentes si elles sont fondées sur les valeurs de tension de tenue en LI et en AC uniquement.

NOTE 3 Si une distance d'isolement inférieure à celle conforme à l'alinéa ci-dessus doit être appliquée, un essai de type faisant appel aux méthodes générales indiquées aux Articles 10 à 14 de la présente norme, qui utilisent les tensions d'essai applicables au transformateur, ou recourant aux essais spécifiés dans une autre norme (par exemple IEC 62271-1) qui sont applicables au matériel de poste connecté, peut devoir être effectué sur un dispositif de simulation de la distance d'isolement réelle.

Si le transformateur est spécifié pour être mis en service à une altitude supérieure à 1 000 m, les exigences des distances d'isolement doivent être augmentées de 1 % tous les 100 m au-delà de 1 000 m.

Les exigences s'appliquent pour les distances d'isolement suivantes:

- distance d'isolement phase-terre et phase-neutre;
- distance d'isolement entre phases d'un même enroulement;
- distance d'isolement entre une borne de ligne de l'enroulement haute tension et une borne de ligne d'un enroulement à tension inférieure (voir 16.2).

De ce qui précède, il s'ensuit que les valeurs recommandées sont en fait des valeurs minimales. Les distances d'isolement définies lors de la conception doivent être précisées sur le plan d'encombrement. Ce sont des valeurs nominales auxquelles s'appliquent les tolérances normales de fabrication et elles doivent être choisies pour que les distances d'isolement réelles soient au moins égales à celles spécifiées.

Ces spécifications doivent permettre de démontrer que le transformateur est conforme aux recommandations de la présente norme, ou aux valeurs modifiées qui peuvent avoir fait l'objet d'un accord pour un contrat particulier.

16.2 Exigences concernant les distances d'isolement

Ces exigences sont données dans le Tableau 4 pour chaque valeur des tensions de choc de foudre et de manœuvre, et ce, pour chaque valeur de U_m .

La distance d'isolement entre phases s'applique uniquement entre les bornes de ligne du même enroulement, et la distance d'isolement phase-terre s'applique à toutes les autres distances, y compris par rapport aux bornes de ligne des autres enroulements et aux bornes neutres.

Tableau 4 – Distances minimales d'isolement dans l'air (1 de 2)

Tension la plus élevée pour le matériel U_m kV	Choc de foudre en onde pleine (LI) kV	Choc de manœuvre (SI) kV	Distance minimale d'isolement dans l'air	
			Phase – terre mm	Entre phases mm
<1,1	-	-		
3,6	20	-	60	60
	40	-	60	60
7,2	60	-	90	90
	75 ^a	-	120	120
12	75	-	120	120
	95	-	160	160
	110 ^a	-	200 ^a	200 ^a
17,5	95	-	160	160
	125 ^a	-	220	220
24	125	-	220	220
	145	-	270	270
	150 ^a	-	280 ^a	280 ^a
36	170	-	320	320
	200 ^a	-	380	380
52	250	-	480	480
72,5	325	-	630	630
	350 ^a	-	630	630
100	450	375 ^a	900	900
123	550	460 ^a	1 100	1 100
145	550	460 ^a	1 100	1 100
	650	540 ^a	1 300	1 500 ^a
170	650	540 ^a	1 300	1 500 ^a
	750	620 ^a	1 500	1 700 ^a
245	850	700 ^a	1 600	2 100 ^a
	950	750 ^a	1 700	2 300
	1 050	850 ^a	1 900	2 600
300	950	750	1 700	2 300
	1 050	850	1 900	2 600
362	1 050	850	1 900	2 600
	1 175	950	2 200	3 100
420	1 175	950	2 200	3 100
	1 300	1 050	2 600	3 600
	1 425	1 175 ^a	3 100	4 200

Tableau 4 (2 de 2)

Tension la plus élevée pour le matériel U_m kV	Choc de foudre en onde pleine (LI) kV	Choc de manœuvre (SI) kV	Distance minimale d'isolement dans l'air	
			Phase – terre mm	Entre phases mm
550	1 300	1 050	2 600	3 600
	1 425	1 175	3 100	4 200
	1 550	1 300 ^a	3 600	5 000 ^a
	1 675 ^a	1 390 ^a	4 000 ^a	5 600 ^a
800	1 800	1 425	4 200	5 800 ^a
	1 950	1 550	4 900	6 700 ^a
	2 050 ^a	1 700 ^a	5 800 ^a	7 900 ^a
	2 100	1 675 ^a	5 600	7 700 ^a
1 100	1 950	1 425	^b	^b
	2 250	1 800	6 300	^c
1 200	2 250	1 800	6 300	^c

^a Ces valeurs ne figurent pas dans l'IEC 60071-1:2011 pour la valeur de U_m considérée, mais sont toutefois incluses dans la mesure où elles représentent soit la pratique courante dans certaines régions du monde, soit pour certains niveaux de choc de manœuvre et certaines distances d'isolement, une valeur coordonnée à la valeur particulière du niveau de choc de foudre.

^b Aucune valeur de distance d'isolement n'est spécifiée pour cette valeur du niveau d'isolement assigné, dans la mesure où elle ne s'applique pas à l'isolement dans l'air selon l'IEC 60071-1.

^c Aucune valeur de distance d'isolement entre phases n'est spécifiée, étant donné que les transformateurs auxquels est associée cette valeur de niveau d'isolement assigné sont habituellement monophasés.

Annexe A (informative)

Guide d'application pour les mesures de décharges partielles sur les transformateurs

A.1 Généralités

La présente annexe s'applique tout particulièrement à la mesure des décharges partielles réalisée lors d'un essai de tension induite avec mesure de décharges partielles (IVPD) selon 11.3, mais elle peut être appliquée aux autres mesures de décharges partielles réalisées.

Une décharge partielle (DP) est une décharge électrique qui ne court-circuite que partiellement l'isolation sous contrainte électrique. Dans un transformateur, une telle décharge partielle provoque une variation brusque de la tension par rapport à la terre à chaque borne d'enroulement accessible de l'extérieur.

Les impédances de mesure sont connectées effectivement entre la cuve mise à la terre et les bornes, habituellement à travers la capacité d'une prise de traversée ou à travers un condensateur de liaison distinct, comme détaillé en A.2.

La charge réellement mise en jeu à l'endroit d'une décharge partielle ne peut être mesurée directement, en revanche, la charge apparente q telle que définie dans l'IEC 60270 est mesurée à la borne, comme déterminé par un étalonnage adapté, voir A.2.

Une décharge partielle particulière génère différentes valeurs de la charge apparente à différentes bornes du transformateur. La comparaison des indications recueillies simultanément à différentes bornes peut donner des informations sur la localisation de la source de décharge partielle à l'intérieur du transformateur, voir A.5.

Le mode opératoire de l'essai de réception spécifié en 11.3 impose la mesure de la charge apparente aux bornes de ligne de l'enroulement.

A.2 Connexion des circuits de mesure et d'étalonnage – Méthode d'étalonnage

La technique et le matériel de mesure sont décrits dans l'IEC 60270.

Le principe de mesure consiste à déterminer la variation de tension à la borne provoquée par l'injection d'un volume de charge étalonné. La variation de tension est mesurée à l'aide d'une capacité de liaison en série (habituellement une traversée à condensateur) et d'une impédance de mesure. L'impédance de mesure du dispositif normal pour les essais de transformateur doit être connectée directement à la prise de traversée d'essai.

Le matériel de mesure peut être relié à l'impédance de mesure par un câble coaxial adapté. L'impédance du câble et l'impédance d'entrée adaptée de l'instrument de mesure peuvent faire partie intégrante de l'impédance de mesure. Certains systèmes utilisent un câble à fibres optiques entre l'impédance de mesure et le matériel d'enregistrement. L'impédance de mesure, le câble et l'instrument de mesure sont normalement fournis ensemble, de manière à optimiser les performances globales du système de mesure.

Pendant la mesure des décharges partielles entre une borne de ligne d'un enroulement et la cuve mise à la terre, la disposition normale consiste à installer l'impédance de mesure Z_m entre la prise capacitive de traversée d'essai et la collerette mise à la terre, voir Figure A.1. En l'absence de prise d'essai, il est également possible d'isoler de la cuve la bride de la traversée et de l'utiliser comme borne de mesure.

Les capacités situées entre le conducteur central et la borne de mesure d'une part, et entre cette dernière et la terre d'autre part, agissent comme un diviseur capacitif de tensions p pour le signal dû aux décharges partielles. L'étalonnage est par conséquent réalisé entre la borne supérieure de la traversée et la terre. Il convient de relier la plus grande partie possible du circuit d'essai hors tension à la borne pendant l'étalonnage, afin de tenir compte de la capacité supplémentaire et des circuits de filtrage éventuels.

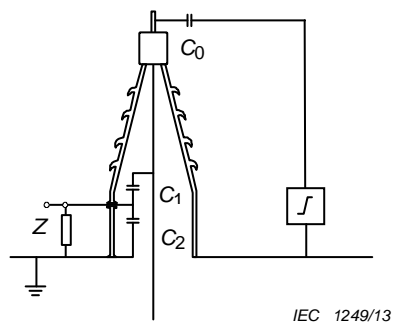


Figure A.1 – Circuit d'étalonnage pour la mesure des décharges partielles utilisant la prise d'essai d'une traversée à condensateur

Lorsqu'il est nécessaire d'effectuer les mesures DP à une borne ne comportant pas de prise d'essai de traversée ou de collerette isolée, un condensateur de liaison haute tension distinct est alors utilisé. Un condensateur exempt de décharges partielles est exigé et il convient que la valeur de sa capacité C soit suffisamment grande comparée à la capacité d'injection C_0 du générateur d'étalonnage (voir IEC 60270 pour des exigences spécifiques). L'impédance de mesure (avec un éclateur de protection) est connectée entre la borne basse tension du condensateur et la terre, voir Figure A.2.

L'étalonnage du système de mesure complet est effectué par injection d'une charge connue dans la borne du transformateur. Selon l'IEC 60270, un générateur d'étalonnage est constitué d'un générateur d'échelon de tension à faible temps de montée et d'un petit condensateur série de capacité connue C_0 . Il convient que la capacité C_0 soit faible comparée à C_1 (voir IEC 60270 pour les exigences spécifiques concernant le temps de montée et le choix de C_0). Lorsque ce générateur est relié entre la borne du transformateur et la terre, la charge injectée par le générateur d'impulsions sera:

$$q_0 = U_0 \times C_0$$

où

q_0 est la charge apparente d'étalonnage

U_0 est l'échelon de tension choisi pour produire la valeur requise q_0

C_0 est la valeur de la capacité en série

Il convient que le niveau d'étalonnage q_0 soit représentatif de la limite du niveau de décharge spécifiée (habituellement entre 50 % et 200 %). Des mesures supplémentaires qui utilisent le générateur étalon à des valeurs différentes de q_0 peuvent être utilisées pour vérifier le fonctionnement de l'instrument de mesure.

Il est préférable que la fréquence de répétition du générateur d'étalonnage soit synchronisée sur la fréquence industrielle, de manière à pouvoir observer l'impulsion résultante sur un instrument également synchronisé sur la fréquence industrielle.

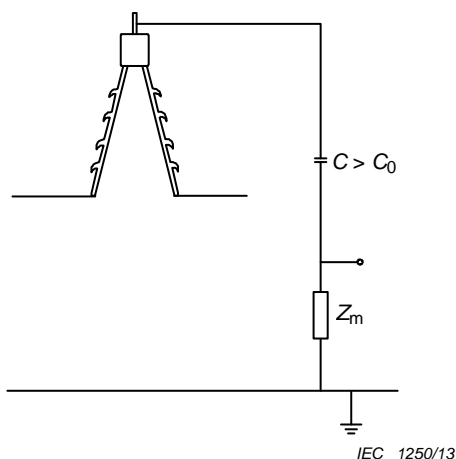


Figure A.2 – Circuit pour mesure des décharges partielles utilisant un condensateur de liaison haute tension

Pour éviter les erreurs, il convient que les câbles entre la borne et le générateur étalon, et entre ce dernier et la terre (au niveau de la collerette de traversée) soient aussi courts que possible. Il convient de préférence que le générateur d'impulsions d'étalonnage fonctionne sur batterie et que ses dimensions physiques soient réduites pour pouvoir l'utiliser facilement aux bornes du transformateur.

Cette méthode d'étalonnage prévoit la mesure de la charge apparente à la borne, ce qui constitue la base de la présente norme, mais elle ne fournit pas la valeur réelle d'une décharge partielle se produisant à distance de la borne, dans la mesure où l'étalonnage n'inclut pas la voie de transmission entre la décharge et la borne.

A.3 Instruments, gamme de fréquences

Il convient que les caractéristiques des instruments de mesure soient telles que spécifiées dans l'IEC 60270.

Un affichage graphique de toute décharge partielle détectée est généralement utile, en particulier parce qu'il permet de faire la distinction entre les décharges partielles réelles dans le transformateur et certaines formes de perturbations extérieures. Ceci dépend de la fréquence de répétition, de la position sur l'onde de tension, des différences de polarité, etc.

Il convient d'observer le niveau de décharges partielles de façon continue ou à des intervalles réguliers pendant toute la durée de l'essai. Un enregistrement continu du signal n'est pas obligatoire.

Les systèmes de mesure des décharges partielles sont classés en systèmes à bande étroite ou à large bande. Un système à bande étroite fonctionne à une largeur de bande d'environ 10 kHz ou moins, avec une certaine fréquence ajustable (par exemple, les mesureurs de perturbations radiophoniques). Un système à large bande utilise un assez grand rapport entre les limites supérieure et inférieure de la bande de fréquences, par exemple, 50 kHz à 800 kHz.

Avec un système à bande étroite, il est possible d'éviter, par un réglage adapté de la fréquence centrale, les signaux parasites provenant d'émetteurs radio locaux, mais il est nécessaire de vérifier que les résonances d'enroulement voisines de la fréquence de mesure ne modifient pas trop sensiblement la mesure. Il convient que l'instrument à bande étroite utilise une fréquence maximale de 500 kHz, et de préférence inférieure à 300 kHz. Il y a deux raisons à cela.

La première est que la transmission des impulsions dues aux décharges se fait avec une atténuation importante des composants à fréquences les plus élevées; la deuxième est que, lorsqu'on applique une impulsion d'étalonnage à la borne de ligne, cette impulsion est susceptible de provoquer des oscillations locales à cette borne et à son voisinage, ce qui complique l'étalonnage pour des fréquences centrales supérieures à 500 kHz.

Un système de mesure à large bande est moins critique en ce qui concerne l'atténuation et la réponse aux différentes formes d'impulsions mais il est plus sensible aux perturbations sur des sites d'essai dépourvus d'écran électromagnétique. Des filtres coupe-bande ou d'autres types de filtres peuvent être utilisés pour réduire les perturbations de sources d'influence externes telles que des émetteurs radio.

Le choix de la largeur de bande de mesure n'affecte pas la signature des décharges partielles et le comportement statistique de la décharge pouvant être utilisé pour identifier la source de décharge.

Pour résumer, un système de mesure à large bande constitue le premier choix préférentiel dans la mesure où sa capacité de détection d'une décharge partielle est plus grande, et il convient par ailleurs que la largeur de bande ne soit pas inférieure à 100 kHz. Un système à bande étroite peut être requis dans certains cas pour éliminer les perturbations. Il convient d'accorder une attention toute particulière au choix de la fréquence centrale de mesure afin d'assurer une sensibilité raisonnable aux décharges partielles dans le transformateur.

A.4 Procédure après un essai non satisfaisant

Les critères d'acceptation du niveau de décharges partielles sont spécifiés en 11.3.5. En l'absence d'effondrement de tension, mais en cas de non satisfaction effective de l'essai en raison d'un niveau de décharges partielles au-dessus des critères d'acceptation, l'essai doit alors être considéré au départ comme un essai non destructif. Il convient également de ne pas rejeter immédiatement l'objet en essai suite à ce résultat, mais d'effectuer en revanche des recherches supplémentaires afin d'identifier et localiser la source des décharges partielles.

Un autre point important à prendre en considération consiste à déterminer si les décharges partielles corrélées aux phases sont maintenues en dessous du niveau de la tension de service, lorsqu'elles sont déclenchées au niveau d'essai, étant donné qu'il est très vraisemblable que ces décharges partielles portent atteinte au transformateur en service.

Il convient de commencer par des recherches relatives à l'environnement d'essai pour découvrir des preuves de l'existence éventuelle de sources de décharges partielles parasites. Il convient ensuite qu'il y ait un échange de vues entre le constructeur et l'acheteur pour rechercher un accord sur des essais complémentaires ou sur toute autre procédure permettant de démontrer soit la présence d'une décharge partielle importante, soit que le transformateur est capable d'assurer un service satisfaisant.

On trouvera ci-dessous quelques suggestions qui peuvent être utiles lors des différentes phases des opérations décrites ci-dessus.

- Rechercher s'il existe de véritables corrélations entre les mesures et la séquence d'essai ou si ces mesures représentent simplement des sources coïncidentes non pertinentes. Ceci est souvent facilité par une surveillance ou un enregistrement oscillographique de la configuration des décharges partielles; des perturbations externes peuvent, par exemple, être détectées si elles ne sont pas synchrones de la tension d'essai.
- Rechercher si la décharge partielle peut provenir de la source d'alimentation. Dans ce cas, il peut être utile de placer des filtres passe-bas sur les connexions d'alimentation du transformateur en essai.
- Rechercher si la source de décharge partielle se situe à l'intérieur du transformateur ou à l'extérieur (crachotement dû à des objets placés à un potentiel flottant dans l'aire d'essai, ou provenant de pièces sous tension dans l'air ou d'arêtes vives sur des parties du

transformateur mises à la terre). Etant donné que l'essai concerne l'isolation interne, il est permis et recommandé d'utiliser des écrans électrostatiques provisoires placés à l'extérieur.

- Rechercher quelle peut être la localisation probable de la ou des sources en se référant au schéma électrique du transformateur, par exemple, des essais monophasé ou par tension appliquée peuvent se révéler utiles. Il existe plusieurs méthodes connues et publiées de localisation des décharges. L'une d'elles est fondée sur une corrélation entre les relevés et les étalonnages à différentes paires de bornes (ces relevés étant effectués en plus de ceux qui sont obligatoires entre les bornes de ligne et la terre). On peut également, si des enregistrements à partir de circuits à large bande sont réalisés, identifier les formes d'impulsions individuelles pendant l'essai avec les formes d'onde d'étalonnage correspondantes. Un cas particulier de localisation est l'identification d'une décharge partielle dans l'isolant des traversées-condensateurs.
- Rechercher la localisation de la ou des sources à l'intérieur de la cuve par une détection acoustique ou ultrasonore.
- Rechercher la localisation et la nature de la source au moyen de capteurs électromagnétiques ultra haute fréquence placés dans la cuve.
- Déterminer la nature physique probable de la source à partir de conclusions telles que la variation du niveau de la tension d'essai, l'hystérésis, la répartition des impulsions sur l'onde de tension d'essai, le développement dans la durée d'une décharge partielle, etc.
- Une décharge partielle dans le système d'isolement peut avoir pour origine un séchage ou une imprégnation de liquide insuffisant(e), et ceci s'observe généralement par la configuration de décharge partielle. On peut donc essayer de retraiter le transformateur ou de le laisser reposer quelque temps, puis de recommencer l'essai.
- Une exposition même limitée à un niveau de décharge partielle assez élevé peut conduire à un craquage local de l'huile ou du liquide, et à la réduction provisoire des tensions d'extinction et de réamorçage, les conditions d'origine peuvent toutefois être spontanément restaurées en quelques heures.
- Une variation relativement limitée du niveau des décharges partielles lorsque la tension augmente, une configuration de décharges partielles typique d'une particule flottante dans le champ électrique, et l'absence d'augmentation de niveau avec le temps peuvent être considérées comme une preuve que le transformateur est apte au service. Dans ce cas, il peut être convenu de répéter l'essai, si possible avec une durée prolongée et avec un niveau de tension accru, ceci pouvant réduire le niveau de décharge dans le temps.
- On ne trouve généralement au décuivage aucune trace visible de décharges partielles à moins que le transformateur n'ait été exposé pendant une durée importante à des niveaux de décharges partielles très élevés par rapport à la limite d'acceptation. Une telle méthode peut constituer le dernier recours lorsque tous les autres moyens d'amélioration du comportement du transformateur ou d'identification de la source ont échoué.

Annexe B **(informative)**

Surtension transmise de l'enroulement haute tension à un enroulement basse tension

B.1 Généralités

Le problème des surtensions transmises est traité du point de vue du réseau dans l'IEC 60071-2. Les informations fournies ci-dessous concernent uniquement les problèmes associés au transformateur lui-même dans certaines conditions de service. Les surtensions transmises à prendre en compte sont soit des surtensions transitoires, soit des surtensions ordinaires.

NOTE Il est de la responsabilité de l'acheteur de définir la charge d'un enroulement basse tension. Si aucune information ne peut être fournie, le constructeur peut proposer des informations concernant les tensions transmises prévues lorsque les bornes basse tension sont en circuit ouvert, et concernant les valeurs des résistances ou des condensateurs qui sont nécessaires pour maintenir les tensions dans des limites acceptables.

B.2 Transmission de la surtension

B.2.1 Généralités

L'étude de l'installation particulière d'un transformateur du point de vue des surtensions transmises n'est en général justifiée que dans le cas des gros transformateurs de groupes qui ont un rapport de transformation élevé, et des transformateurs de grands réseaux à haute tension qui ont un enroulement tertiaire à basse tension.

Étant donné que les autotransformateurs monophasés sont soumis à l'essai séparément, les tensions transmises qui apparaissent sur les bornes tertiaires lorsque les transformateurs sont connectés en tant que banc triphasé, doivent être prises en compte.

Les mesures des surtensions transmises peuvent être effectuées au moyen d'un générateur à impulsions récurrentes basse tension, afin de s'assurer que les tensions transmises ne dépassent pas le niveau spécifié, ou de confirmer que des parafoudres ne sont pas requis. En variante, ces mesures peuvent être effectuées à une tension réduite pendant les essais d'impulsions.

Il est commode de faire la distinction entre deux mécanismes de transmission des surtensions qui sont la transmission capacitive et la transmission inductive.

B.2.2 Transmission capacitive

La transmission capacitive d'une surtension à un enroulement à basse tension peut être décrite, en première approximation, comme une division de tension capacitive. Le circuit équivalent le plus simple tel qu'observé à partir de l'enroulement basse tension consiste en une source à force électromotrice (f.e.m.) reliée en série avec une capacité de transmission C_t , voir Figure B.1.

La f.e.m. équivalente est une fraction s de la surtension incidente sur le côté haute tension. C_t est de l'ordre de 10^{-9} F; s et C_t ne sont pas des grandeurs bien définies mais dépendent de la forme du front de la surtension. Ces grandeurs peuvent être déterminées globalement par des mesures oscillographiques. Leur prédétermination par le calcul est incertaine.

Le chargement des bornes secondaires avec des appareillages, des câbles courts ou des condensateurs additionnels (quelques nF), qui se comportent comme une capacité localisée C_s reliée directement aux bornes (même pendant la première microseconde), permet de réduire la

crête de la surtension transmise. Des câbles plus longs ou des barres omnibus sont représentés par leur impédance caractéristique.

La forme de la surtension au secondaire qui en résulte est normalement du type d'une impulsion brève (de l'ordre de la microseconde), correspondant au front de la surtension incidente.

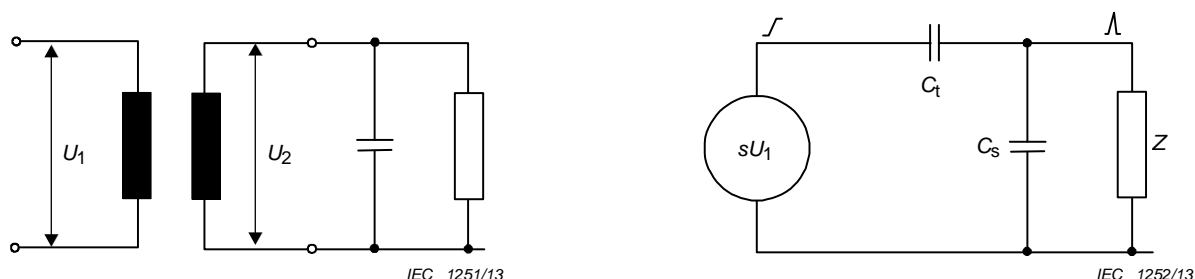


Figure B.1 – Circuit équivalent pour la transmission capacitive de surtension

B.2.3 Transmission inductive

La transmission inductive d'une surtension dépend du passage du courant de choc dans l'enroulement haute tension.

Si aucune charge extérieure n'est appliquée à l'enroulement secondaire, la tension transitoire présente généralement une oscillation amortie superposée dont la fréquence est déterminée par l'inductance de fuite et les capacités des enroulements.

Il est possible de réduire la composante inductive d'une surtension transmise, soit à l'aide d'une résistance d'amortissement au moyen d'un parafoudre, soit en modifiant l'oscillation grâce à une charge capacitive. Si on utilise des condensateurs, la valeur de leur capacité doit être généralement de l'ordre de quelques dixièmes de microfarads. (Ces condensateurs élimineront alors automatiquement la composante transmise capacitivement, tant que l'inductance du circuit est faible.)

Les paramètres des transformateurs qui entrent en jeu dans la transmission inductive des surtensions sont mieux définis et dépendent moins du temps de montée (ou de la fréquence) que ceux qui entrent en jeu dans la transmission capacitive. Pour de plus amples informations, se reporter à la documentation publiée à ce sujet.

B.3 Surtension transmise à la fréquence industrielle

Si un enroulement basse tension physiquement voisin de l'enroulement haute tension est laissé sans liaison à la terre ou est relié à la terre par une connexion de forte impédance, il existe, lorsque l'enroulement haute tension est alimenté, un risque de surtension à la fréquence industrielle par division capacitive.

Le risque est évident pour un enroulement monophasé, mais il peut également exister pour un enroulement triphasé si la tension de l'enroulement primaire devient dissymétrique, comme cela se produit lors de défauts à la terre. Dans des cas particuliers, des résonances peuvent se produire.

Les enroulements tertiaires et de stabilisation des gros transformateurs sont également soumis au même risque. Il est de la responsabilité de l'acheteur d'empêcher qu'un enroulement tertiaire soit accidentellement relié à la terre par une impédance trop élevée. Il convient normalement de concevoir un enroulement de stabilisation de façon qu'il soit relié à la terre (cuve) de manière permanente, soit extérieurement, soit intérieurement.

La surtension est déterminée par les capacités entre les enroulements et entre les enroulements et la terre. Ces capacités peuvent être mesurées à basse fréquence à partir de la borne du transformateur avec différentes combinaisons, et elles peuvent également être calculées avec une précision suffisante.

Annexe C (informative)

Informations concernant l'isolation du transformateur et les essais diélectriques à fournir avec un appel d'offres et avec une commande

C.1 Généralités

Il convient, pour chaque enroulement du transformateur, de fournir les informations suivantes lors de l'appel d'offres et de la commande selon la valeur U_m de l'enroulement.

NOTE Bien que les valeurs SI et IVW puissent être spécifiées pour un enroulement à tension inférieure sur un transformateur, les valeurs peuvent ne pas être obtenues pendant l'essai selon le rapport du transformateur.

Il convient qu'une discussion ait lieu, au moment de la commande ou lors de la phase de revue de conception, concernant les connexions d'essai et les méthodes d'essai, en particulier en ce qui concerne la connexion à utiliser lors des essais de tension de tenue induite sur les transformateurs complexes avec des enroulements à haute tension à isolation non uniforme, et la méthode à utiliser pour les essais au choc des enroulements de forte puissance à basse tension et des bornes neutres (voir 13.1.4). L'application de dispositifs de protection non linéaire, intégrés dans le transformateur, doit être indiquée par le constructeur lors de l'appel d'offres et de la commande, et il convient d'en faire mention dans le schéma des connexions de la plaque signalétique.

C.2 Pour les transformateurs et les enroulements avec $U_m \leq 72,5$ kV

Dans tous les cas.

- valeur de U_m ;
- valeur de U_r ;
- niveau d'essai de tension appliquée (AV);
- niveau d'essai au choc de foudre en onde pleine (LI).

Dans des cas particuliers:

- déterminer si des mesures de décharges partielles sont requises, si ces mesures doivent être effectuées conjointement à l'essai de tension induite ou séparément, et si ces mesures doivent également être effectuées sur une seule unité (unité d'essai de type) ou toutes les unités. Il convient d'indiquer la durée d'application de la tension de mesure DP si celle-ci est inférieure à une heure;
- déterminer si un essai au choc de foudre est requis sur une ou toutes les unités à fournir dans le cadre de la commande, plutôt que sur simplement la première unité conçue;
- déterminer si des essais au choc de foudre en onde coupée sont requis et si ceux-ci doivent être effectués uniquement sur la première ou sur toutes les unités;
- déterminer si un essai au choc de foudre sur la borne neutre est requis et si celui-ci doit être effectué uniquement sur la première ou sur toutes les unités;
- déterminer si un essai au choc de foudre appliqué simultanément sur plusieurs bornes de ligne est requis et si celui-ci doit être effectué uniquement sur la première ou sur toutes les unités;
- déterminer les distances d'isolement dans l'air si elles sont différentes des distances d'isolement indiquées à l'Article 16.

Il convient de préférence de choisir les valeurs de U_m , LI et AV, dans une seule ligne du Tableau 2 dans la mesure où elles constitueront alors un ensemble coordonné. Il est toutefois

admissible de choisir les valeurs dans différentes lignes du tableau pour la même valeur U_m ou une valeur U_m plus élevée pour correspondre à la coordination existante de l'isolement du réseau. Il convient de choisir la valeur LIC, lorsqu'elle est spécifiée, dans la même ligne du Tableau 2 que la valeur LI. Toute combinaison de valeurs issues de lignes différentes peut aboutir à un surdimensionnement eu égard à certains paramètres.

C.3 Pour les transformateurs et les enroulements avec $72,5 \text{ kV} < U_m \leq 170 \text{ kV}$

Dans tous les cas:

- valeur de U_m ;
- valeur de U_T ;
- niveau d'essai de tension appliquée;
- niveau d'essai au choc de foudre en onde pleine.

De plus, pour les transformateurs à isolation non uniforme:

- le niveau d'essai en AC de la borne de ligne ou le niveau d'essai au choc de manœuvre, lorsque spécifié comme variante;

Dans des cas particuliers:

- déterminer si d'autres niveaux de tension plus élevée doivent être utilisés pour l'essai de tension induite avec mesure de décharges partielles, et si ces niveaux peuvent être combinés à l'essai IVW;
- déterminer si des essais au choc de foudre en onde coupée sont requis et si ceux-ci doivent être effectués uniquement sur la première ou sur toutes les unités;
- déterminer si un essai au choc de foudre sur la borne neutre est requis et si celui-ci doit être effectué uniquement sur la première ou sur toutes les unités;
- déterminer si la tension d'essai requise pour la tension d'essai induite correspond au double de la tension assignée;
- déterminer si un essai au choc de manœuvre est requis et si cet essai doit être effectué uniquement sur la première ou toutes les unités et si l'essai SI se substitue à l'essai LTAC;
- déterminer si un essai au choc de foudre appliqué simultanément sur plusieurs bornes de ligne est requis et si celui-ci doit être effectué uniquement sur la première ou sur toutes les unités;
- déterminer si un essai de tension de tenue en AC de la borne de ligne est requis pour les transformateurs dont les enroulements ont une isolation non uniforme et si tel est le cas, la tension d'essai requise;
- déterminer les distances d'isolement dans l'air si elles sont différentes des distances d'isolement indiquées à l'Article 16.

Il convient de préférence de choisir les valeurs de U_m , LI, AV et LTAC et SI, lorsque spécifiés, dans une seule ligne du Tableau 2 dans la mesure où elles constitueront alors un ensemble coordonné. Il est toutefois admissible de choisir les valeurs dans différentes lignes du tableau pour la même valeur U_m ou une valeur U_m plus élevée pour correspondre à la coordination existante de l'isolement du réseau. Il convient de choisir la valeur LIC, lorsqu'elle est spécifiée, dans la même ligne du Tableau 2 que la valeur LI. Toute combinaison de valeurs issues de lignes différentes peut aboutir à un surdimensionnement eu égard à certains paramètres.

C.4 Pour les transformateurs et les enroulements avec $U_m > 170 \text{ kV}$

Dans tous les cas:

- valeur de U_m ;

- valeur de U_p ;
- niveau d'essai au choc de foudre;
- niveau d'essai au choc de manœuvre;
- niveau d'essai de tension appliquée.

Dans des cas particuliers:

- déterminer si d'autres niveaux de tension plus élevée doivent être utilisés pour la tension induite avec mesure de décharges partielles;
- déterminer si un essai au choc de foudre sur la borne neutre est requis et si celui-ci doit être effectué uniquement sur la première ou sur toutes les unités;
- déterminer si un essai au choc de foudre appliqué simultanément sur plusieurs bornes de ligne est requis et si celui-ci doit être effectué uniquement sur la première ou sur toutes les unités;
- déterminer si un essai de tension de tenue en AC de la borne de ligne est requis pour les transformateurs dont les enroulements ont une isolation non uniforme et si tel est le cas, la tension d'essai requise;
- déterminer les distances d'isolement dans l'air si elles sont différentes des distances d'isolement indiquées à l'Article 16.

Il convient de préférence de choisir les valeurs de U_m , LI, SI, AV et LTAC, lorsque spécifié, dans une seule ligne du Tableau 2 dans la mesure où elles constitueront alors un ensemble coordonné. Il est toutefois admissible de choisir les valeurs dans différentes lignes du tableau pour la même valeur U_m ou une valeur U_m plus élevée pour correspondre à la coordination existante de l'isolement du réseau. Il convient de choisir la valeur LIC dans la même ligne du Tableau 2 que la valeur LI. Toute combinaison de valeurs issues de lignes différentes peut aboutir à un surdimensionnement eu égard à certains paramètres.

Annexe D (informative)

Calcul du niveau de tension avec isolement des bornes neutres

D.1 Généralités

Les recommandations de la présente annexe permettent de déterminer la tension de tenue minimale pour l'extrémité neutre d'un transformateur à isolation non uniforme non directement mise à la terre. Pour contrôler les niveaux de défaut ou pour d'autres raisons, le neutre peut être mis à la terre par l'intermédiaire d'une impédance élevée (par exemple, une bobine d'inductance éliminatrice d'arc, une inductance de mise à la terre ou une résistance).

La présente annexe ne couvre pas la détermination de la tension de tenue des extrémités neutres d'un transformateur conçu pour être utilisé avec un transformateur de réglage par polarisation du neutre.

Lorsque l'extrémité neutre n'est pas directement mise à la terre, un dispositif de protection contre les surtensions doit être installé entre la traversée neutre et la terre pour limiter les tensions transitoires. Il est de la responsabilité de l'acheteur de choisir le dispositif de protection contre les surtensions, de déterminer son niveau de protection au choc, et de spécifier le niveau correspondant de tension de tenue au choc pour l'extrémité neutre du transformateur.

NOTE Pour une isolation non uniforme, le constructeur peut concevoir l'enroulement avec un niveau d'isolement supérieur au niveau spécifié, en raison de l'essai de tenue en tension induite des extrémités de ligne (essai spécial).

La tension de tenue en AC doit être plus élevée que la surtension maximale apparaissant en cas de défaut du réseau. Il convient de prévoir une marge entre le niveau de choc de l'extrémité neutre et la tension de fonctionnement du dispositif de protection, ces deux tensions doivent par ailleurs être supérieures à la tension maximale qui apparaît en cas de défaut du réseau. Les formules ci-dessous fournissent un guide pour le calcul des tensions maximales pouvant apparaître au neutre mis à la terre par l'intermédiaire d'une impédance.

D.2 Calcul du courant de défaut d'une borne neutre

Le courant de défaut maximum du neutre I_{fault} d'un transformateur triphasé à deux enroulements (défaut monophasé à la terre sur un enroulement connecté en étoile) peut être calculé selon la formule suivante:

$$I_{\text{fault}} = \frac{3 \times E}{(Z_{1t} + Z_{1s} + Z_{2t} + Z_{2s} + Z_{0t} + Z_{0s}) + 3 \times Z_N + 3 \times Z_{\text{fault}}}$$

où

- E est la tension phase-terre prise comme valeur $U_m/\sqrt{3}$ en V
- Z_{1s} est l'impédance directe du réseau en Ω
- Z_{2s} est l'impédance inverse du réseau en Ω
- Z_{0s} est l'impédance homopolaire du réseau en Ω
- Z_{1t} est l'impédance directe du transformateur en Ω
- Z_{2t} est l'impédance inverse du transformateur en Ω
- Z_{0t} est l'impédance homopolaire du transformateur en Ω (y compris tout enroulement tertiaire ou de stabilisation)

Z_N est l'impédance située entre le neutre et la terre en Ω

Z_{fault} est l'impédance de défaut en Ω (prise comme étant nulle)

NOTE Les valeurs suivantes peuvent être utilisées comme valeurs indicatives, conformément à la pratique courante de calcul du cas le plus défavorable:

$$\begin{aligned} E &= U_m / \sqrt{3} \\ Z_{1s} &= 0 \\ Z_{2s} &= 0 \\ Z_{0s} &= 0 \\ Z_{\text{fault}} &= 0 \end{aligned}$$

D.3 Niveau d'isolement minimum

D.3.1 Niveau d'isolement minimum de la tension appliquée

Il convient de choisir le niveau AV minimum pour la borne neutre dans le Tableau 2 de la présente norme, ce niveau devant être supérieur à $U_{\text{ACneutral}}$, où:

$$U_{\text{ACneutral}} = I_{\text{fault}} \times Z_N$$

D.3.2 Niveau de choc minimum

Il convient de choisir le niveau de choc de manière à prévoir une marge supérieure au niveau de fonctionnement du dispositif de protection qu'il convient également de choisir de sorte qu'il ne fonctionne pas dans en cas de défaut de court-circuit du réseau. La tension de crête asymétrique la plus élevée dans ces conditions est donnée par

$$U_{\text{neutral max}} = U_{\text{ACneutral}} \times K_v \times \sqrt{2}$$

où

K_v est le facteur d'asymétrie de la tension.

Dans le cas d'une impédance Z_N purement résistive, le facteur d'asymétrie de tension K_v est identique au facteur d'asymétrie du courant k tel que défini dans l'IEC 60076-5, mais pour une impédance inductive Z_N , K_v est inférieur en raison de la composante continue du courant. Le facteur K_v peut être pris comme égal à 2 dans le cas le plus défavorable d'un très grand rapport X/R de transformateur et d'une impédance Z_N faiblement résistive, mais est < 2 dans la pratique. Dans le cas d'une impédance Z_N purement inductive, le facteur K_v peut être pris égal à 1,05, dans la mesure où cela représente le cas le plus défavorable avec un rapport X/R de transformateur d'environ 7. Il est recommandé de calculer la valeur $U_{\text{neutral max}}$ en utilisant un modèle de réseau.

D.4 Exemple

Un transformateur connecté en Ynd11 avec une tension HT assignée de 155 kV (c'est-à-dire que U_m est égale à 170 kV) et une puissance assignée de 100 MVA avec une impédance directe de 12 % sur une base de 100 MVA et avec une impédance homopolaire de 10,8 %, la borne neutre HT étant mise à la terre par l'intermédiaire d'une bobine d'inductance de 39 Ω , est soumis au courant de défaut suivant, dans le neutre HT pour un défaut phase-terre HT compte tenu d'une puissance de court-circuit infinie du réseau:

$$I_{\text{fault}} = \frac{3 \times E}{(Z_{1t} + Z_{1s} + Z_{2t} + Z_{2s} + Z_{0t} + Z_{0s}) + 3 \times Z_N + 3 \times Z_{\text{fault}}}$$

$$I_{\text{fault}} = \frac{3 \times 170\,000 / \sqrt{3}}{(28,83 + 0 + 28,83 + 0 + 25,95 + 0) + 3 \times 39 + 0} \text{ A}$$

$$I_{\text{fault}} = 1\,468 \text{ A}$$

ce qui donne une tension de:

$$U_{\text{ACneutral}} = I_{\text{fault}} \times Z_{\text{N}}$$

$$U_{\text{ACneutral}} = 1\,468 \times 39 \text{ V}$$

$$U_{\text{ACneutral}} = 57\,243 \text{ V}$$

le niveau AV minimum du Tableau 2 est par conséquent égal à 70 kV.

En supposant que $K_v = 1,05$ pour une impédance de neutre inductive, la tension la plus élevée appliquée sur la borne neutre en cas de défaut du réseau est la suivante:

$$U_{\text{neutral max}} = 57\,243 \times 1,05 \times \sqrt{2} \text{ V}$$

$$U_{\text{neutral max}} = 85,0 \text{ kV}$$

Étant donné qu'il convient que le dispositif de protection ne fonctionne pas à un niveau de crête de 85 kV, il convient que son niveau en AC continu le plus élevé ne soit pas inférieur à $85/\sqrt{2} \text{ kV} = 60,1 \text{ kV}$.

Un parafoudre adapté pour cette tension (tension de tenue de 10 secondes) offre un niveau de protection sous 10 kA de 140 kV, et l'adjonction d'une marge sur cette valeur donne un niveau LI de 170 kV pour l'extrémité neutre.

Un niveau de choc de foudre de 170 kV correspond à une valeur U_m de 36 kV, et cette valeur est spécifiée pour le neutre.

Annexe E (informative)

Base applicable aux essais diélectriques, niveaux d'isolement et distances d'isolement

E.1 Généralités

La présente norme spécifie que les isolations phase – terre, neutre – terre, entre phases et entre spires du transformateur doivent être correctement soumises à essai.

Selon le niveau de tension et le type de transformateur, différents essais ont été choisis pour y parvenir, et des niveaux de tension d'essai coordonnés sont donnés dans le Tableau 2.

La présente annexe synthétise les règles qui ont prévalu lors de la révision de la présente norme. En général, la révision avait pour objectif de simplifier les essais requis et de clarifier les exigences sans augmenter ou réduire les niveaux d'essai globaux, dont on considère qu'il a démontré de bonnes performances en service pendant de nombreuses années.

E.2 Essais

E.2.1 Essais pour transformateurs avec $U_m \leq 72,5$ kV

Ces transformateurs comprennent les transformateurs de distribution qui sont souvent produits en grandes quantités pour une conception particulière. Les essais auxquels sont soumis ces transformateurs doivent rester rapides et abordables.

Dans la mesure où tous les transformateurs et enroulements avec une valeur U_m inférieure ou égale à 72,5 kV ont une isolation uniforme, l'isolation entre la ligne et la terre et l'isolation entre le neutre et la terre font toutes deux l'objet d'une vérification au cours de l'essai de tension appliquée (AV).

L'essai de tenue de tension induite (IVW) ne doit, par conséquent, que vérifier l'isolation entre spires, et, tout comme dans l'édition précédente, un essai effectué à une tension équivalant au double de la tension de service normale a été considéré comme offrant une marge suffisante.

La conception de l'isolation entre phases et de l'isolation entre phase et terre est également prouvée par l'essai au choc de foudre (LI), mais afin de limiter le matériel d'essai nécessaire pour cette catégorie de transformateur, l'essai au choc de foudre a été conservé comme un essai de type et non comme un essai individuel.

Généralement, l'essai au choc de foudre en onde coupée (LIC) n'est pas considéré comme nécessaire. Cet essai est défini comme un essai spécial disponible à la demande de l'acheteur, destiné à être utilisé uniquement dans des conditions de service particulièrement difficiles ou exigeantes.

L'essai de tension induite avec mesure des décharges partielles (IVPD) a été également considéré comme trop coûteux et trop long pour une application générale sur ces transformateurs, ses objectifs étant de plus couverts par les essais IVW et AV. Cet essai est défini comme un essai spécial disponible si nécessaire à la demande de l'acheteur, et si possible avec une durée réduite, destiné à être utilisé dans des conditions de service spéciales.

E.2.2 Essais pour transformateurs avec $72,5 \text{ kV} < U_m \leq 170 \text{ kV}$

Les transformateurs relevant de cette gamme intermédiaire sont généralement construits sur commande, mais à causes des puissances transmises plus élevées, des exigences supérieures concernant les contrôles de qualité sont incluses. Les isolations uniformes et non uniformes pouvant toutes deux être spécifiées, la liste des essais a été établie pour couvrir ces deux possibilités.

L'essai de tension appliquée (AV) permet de démontrer l'isolation entre neutre et terre, ainsi que l'isolation entre ligne et terre pour les transformateurs à isolation uniforme. Pour l'isolation non uniforme, étant donné la limitation du niveau d'essai par le niveau d'isolation de l'extrémité neutre, la démonstration de l'isolation entre la borne de ligne et la terre se révèle insuffisante. Ainsi, l'essai de l'extrémité de ligne par tension induite (LTAC) est un essai individuel pour les transformateurs à isolation non uniforme, mais il peut être remplacé, selon accord, par un essai au choc de manœuvre (SI) de manière à pouvoir soumettre cette classe de transformateur à des essais similaires à ceux pratiqués sur de plus grandes unités.

L'essai au choc de foudre (LI) individuel permet également de vérifier l'isolation entre phases et entre la phase et la terre. L'essai au choc de foudre en onde coupée est un essai spécial pour ces niveaux de tension à spécifier par l'acheteur uniquement lorsque des conditions de service particulières le requièrent.

Pour la vérification de l'isolation entre spires et de l'isolation entre phases, un essai de tenue de tension induite (IVW) à une tension équivalant au double de la tension assignée et un essai à tension induite avec mesure des décharges partielles (IVPD) sont spécifiés comme des essais individuels. Afin d'écourter la durée d'essai et de ne pas reproduire deux fois le même type de contrainte diélectrique dans le transformateur; il est possible de combiner ces essais dans la mesure où la tension de pointe de l'essai IVPD génère des contraintes similaires à l'essai IVW, les deux essais étant effectués dans une configuration similaire aux conditions de service.

E.2.3 Essais pour transformateurs avec $U_m > 170 \text{ kV}$

Cette catégorie de transformateur couvre les plus grands transformateurs de transport et de production. Le nombre limité d'appareils, ainsi que les contrôles qualité nécessaires pour ces unités importantes de grandes dimensions, conduisent aux essais suivants:

Afin de vérifier l'isolation à la terre, un essai de tension appliquée est requis comme essai individuel.

L'essai IVPD contrôle la qualité de l'isolation entre spires, entre ligne et terre et entre phases, avec une connexion identiques à celle du service. L'essai au choc de manœuvre (SI) démontre la tenue de l'isolation entre phases et entre ligne et terre. On considère par conséquent qu'un essai de tenue de tension induite distinct n'est pas nécessaire, mais il est possible d'augmenter la tension de pointe de l'essai IVPD lorsque souhaité, par exemple, pour obtenir une tension équivalant à deux fois la tension assignée.

Les essais au choc de foudre, y compris les ondes coupées, sont inclus en tant qu'essai individuel pour ces transformateurs, dans la mesure où l'on considère important de démontrer la capacité du transformateur à résister aux ondes de chocs, y compris celles comportant des composantes à fréquences plus élevées.

L'essai de l'extrémité de ligne par tension induite monophasée (LTAC) peut être spécifié comme essai spécial pour l'acheteur qui souhaite vérifier par un essai supplémentaire l'isolation ligne – terre avec un essai AC. Cet essai est issu de l'essai précédent de tenue de tension induite.

E.3 Tensions d'essai

Les tensions d'essai indiquées dans le Tableau 2 ont été établies sur la base de l'IEC 60071-1. Toutes les valeurs inférieures aux limites acceptables données dans cette norme de coordination de l'isolement ont été exclues du Tableau 2, mais le Tableau 3 introduit des valeurs inférieures qui peuvent être utilisées pour une coordination avec la pratique existante. Le Tableau 2 fournit toujours une gamme de valeurs de tension d'essai potentielles pour chaque valeur de U_m afin de permettre à la spécification d'un transformateur de répondre à une exigence système particulière, tout en prévoyant une norme minimale.

La règle générale, qui a prévalu pour l'établissement des valeurs indiquées dans le Tableau 2, repose sur le comportement d'une isolation constituée d'isolant solide à base de cellulose et d'huile minérale. Les études menées sur ce type d'isolation ont montré que la tension de tenue au choc de manœuvre (SI) se situe généralement entre 0,8 et 0,85 fois la tension de tenue au choc de foudre. La norme IEEE C57.12.00-2010 fournit des valeurs basées sur un rapport de 0,83.

Les valeurs indiquées dans le Tableau 2 ont été arrondies à l'unité supérieure, tant que cela n'a pas introduit d'écart excessif par rapport à la règle générale.

La tension de tenue en tension induite (IVW) de l'isolation entre la ligne et la terre correspond habituellement à environ 50 % de la tension de tenue au choc de manœuvre, c'est-à-dire environ de 40 % à 43 % de la tension de tenue au choc de foudre (LI). Les valeurs indiquées dans le Tableau 2 ont été établies sur la base de ce principe général et des chiffres normalisés relatifs à l'essai IVW de l'IEC 60071-1. Sauf pour les valeurs de U_m inférieures à 36 kV, pour lesquelles les pratiques existantes diffèrent quelque peu, la règle générale s'applique uniquement avec des différences limitées, afin de refléter la pratique existante.

La valeur $(1,58 \times U_r) / \sqrt{3}$ pour le niveau de mesure décharges partielles (DP) est égal à $1,5 \times U_r$ plus 5 % et représente le niveau utilisé dans la IEEE C57.12.00-2010. La valeur $(1,8 \times U_r) / \sqrt{3}$ est égale à $1,7 \times U_r$ plus 5 % afin de tenir compte du changement de la base entre la valeur U_m et U_r , et de l'harmoniser avec la IEEE C57.12.00-2010.

E.4 Distances d'isolement

Les valeurs données dans la colonne "Phase – terre" du Tableau 4 constituent les valeurs les plus élevées des valeurs indiquées dans l'IEC 60071-1:2011, pour le niveau de choc de foudre ou de manœuvre approprié. Les valeurs pointe-structure ont été utilisées pour des niveaux de choc de foudre < 850 kV et les valeurs conducteur-structure pour celles supérieures à 750 kV. Lorsque l'IEC 60071-1 ne spécifie pas de chiffres, les valeurs correspondantes ont été obtenues par interpolation linéaire, et arrondies aux 10 mm ou 100 mm les plus proches.

Les valeurs indiquées dans la colonne "distance d'isolement entre phases" du Tableau 4 ont été obtenues en basant les valeurs entre conducteurs indiquées dans l'IEC 60071-1:2011 sur une valeur phase terre obtenue en divisant la valeur entre phases par 1,5 ce qui constitue une valeur appropriée pour les transformateurs ayant un enroulement en triangle. Lorsque l'IEC 60071-1 ne fournit pas de chiffres exacts, une régression polynomiale du troisième degré permet d'effectuer une interpolation entre les chiffres des valeurs phase-terre rétablis en divisant la valeur entre phases par 1,5. Un exemple de rétablissement de la base serait de prendre la distance d'isolement de 7 200 mm sous 1 425 kV avec un coefficient 1,7 comme équivalente celle sous 1 615 kV avec un coefficient de 1,5.

Bibliographie

IEC 60071-2, *Coordination de l'isolement – Partie 2: Guide d'application*

IEC 60076-4, *Transformateurs de puissance – Partie 4: Guide pour les essais au choc de foudre et au choc de manœuvre des transformateurs de puissance et bobines d'inductance*

IEC 60214-1, *Changeurs de prises – Partie 1: Prescriptions de performances et méthodes d'essai*

IEC 61083-1, *Appareils et logiciels utilisés pour les mesures pendant les essais de choc à haute tension – Partie 1: Prescriptions pour les appareils*

IEC 61083-2, *Appareils et logiciels utilisés pour les mesures pendant les essais de choc à haute tension – Partie 2: Prescriptions pour les logiciels*

IEC 62271-1, *Appareillage à haute tension – Partie 1: Spécifications communes*

IEEE C57.12.00-2010, *Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers*

IEEE C57.142-2010, *IEEE guide to describe the occurrence and mitigation of switching transients induced by transformers, switching device and system interaction*

CIGRÉ-report 12-14 (1984), *Resonance behaviour of high voltage transformers*. Paper presented in the name of Study Committee 12 by Working Group 12.07

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

3, rue de Varembé
PO Box 131
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel: + 41 22 919 02 11
Fax: + 41 22 919 03 00
info@iec.ch
www.iec.ch