

CONSOLIDATED VERSION

VERSION CONSOLIDÉE



**Power losses in voltage sourced converter (VSC) valves for high-voltage direct current (HVDC) systems –
Part 1: General requirements**

**Pertes de puissance dans les valves à convertisseur de source de tension (VSC) des systèmes en courant continu à haute tension (CCHT) –
Partie 1: Exigences générales**



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 losses in voltage sourced converter (VSC) valves for high-voltage direct current (HVDC) systems –
Part 1: General requirements**

**Pertes de puissance dans les valves à convertisseur de source de tension (VSC) des systèmes en courant continu à haute tension (CCHT) –
Partie 1: Exigences générales**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 29.200; 29.240.99

ISBN 978-2-8322-5623-7

**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 losses in voltage sourced converter (VSC) valves for high-voltage direct current (HVDC) systems –
Part 1: General requirements**

**Pertes de puissance dans les valves à convertisseur de source de tension (VSC) des systèmes en courant continu à haute tension (CCHT) –
Partie 1: Exigences générales**

CONTENTS

FOREWORD.....	4
1 Scope.....	6
2 Normative references	6
3 Terms and definitions	6
3.1 Converter types	7
3.2 Semiconductor devices	7
3.3 Converter operating states	8
3.4 Device characteristics	8
3.5 Other definitions	9
4 General conditions.....	10
4.1 General.....	10
4.2 Causes of power losses	11
4.3 Categories of valve losses	11
4.4 Operating conditions	12
4.4.1 General	12
4.4.2 Reference ambient conditions.....	12
4.4.3 Reference a.c. system conditions	12
4.4.4 Converter operating states.....	12
4.4.5 Treatment of redundancy.....	13
4.5 Use of real measured data	13
4.5.1 General	13
4.5.2 Routine testing	13
4.5.3 Characterisation testing.....	13
5 Conduction losses	14
5.1 General.....	14
5.2 IGBT conduction losses	16
5.3 Diode conduction losses	16
5.4 Other conduction losses.....	17
6 D.C. voltage-dependent losses	17
7 Losses in d.c. capacitors	18
8 Switching losses.....	18
8.1 General.....	18
8.2 IGBT switching losses.....	19
8.3 Diode switching losses.....	20
9 Other losses	21
9.1 Snubber circuit losses.....	21
9.2 Valve electronics power consumption.....	21
10 Total valve losses per converter substation	22
Annex A (informative) Determination of power losses in other HVDC substation equipment.....	25
A.1 General.....	25
A.2 Guidance for calculating losses in each equipment	25
A.2.1 Circuit breaker	25
A.2.2 Pre-insertion resistor	25
A.2.3 Line side harmonic filter.....	26

A.2.4	Line side high frequency filter	26
A.2.5	Interface transformer	27
A.2.6	Converter side harmonic filter	27
A.2.7	Converter side high frequency filter	27
A.2.8	Phase reactor	27
A.2.9	VSC unit	27
A.2.10	VSC d.c. capacitor	27
A.2.11	D.C. harmonic filter	27
A.2.12	Dynamic braking system	28
A.2.13	Neutral point grounding branch	28
A.2.14	D.C. reactor	28
A.2.15	Common mode blocking reactor	28
A.2.16	D.C. side high frequency filter	28
A.2.17	D.C. cable or overhead transmission line	29
A.3	Auxiliaries and station service losses	29
Bibliography		30
Figure 1 – On-state voltage of an IGBT or diode		14
Figure 2 – Piecewise-linear representation of IGBT or diode on-state voltage		15
Figure 3 – IGBT switching energy as a function of collector current		19
Figure 4 – Diode recovery energy as a function of current		20
Figure A.1 – Major components that may be found in a VSC substation		26
Table 1 – Matrix indicating the relationship of data needed for calculation of losses and the type of valve losses (1 of 2)		23

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**POWER LOSSES IN VOLTAGE SOURCED CONVERTER (VSC)
VALVES FOR HIGH-VOLTAGE DIRECT CURRENT (HVDC) SYSTEMS –****Part 1: General requirements**

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 62751-1 bears the edition number 1.1. It consists of the first edition (2014-08) [documents 22F/302/CDV and 22F/321A/RVC] and its amendment 1 (2018-04) [documents 22F/439A/CDV and 22F/458A/RVC]. 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 62751-1 has been prepared by subcommittee 22F: Power electronics for electrical transmission and distribution systems, of IEC technical committee 22: Power electronic systems and equipment.

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

A list of all parts in the IEC 62751series, published under the general title *Power losses in voltage sourced converter (VSC) valves for high-voltage direct current (HVDC) systems*, 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.

POWER LOSSES IN VOLTAGE SOURCED CONVERTER (VSC) VALVES FOR HIGH-VOLTAGE DIRECT CURRENT (HVDC) SYSTEMS –

Part 1: General requirements

1 Scope

This part of IEC 62751 sets out the general principles for calculating the power losses in the converter valves of a voltage sourced converter (VSC) for high-voltage direct current (HVDC) applications, independent of the converter topology. Clauses 6 and 8 and subclauses 9.1, 9.2 and A.2.12 of the standard can also be used for calculating the power losses in the dynamic braking valves (where used) and as guidance for calculating the power losses of the valves for a STATCOM installation.

Power losses in other items of equipment in the HVDC substation, apart from the converter valves, are excluded from the scope of this standard. Power losses in most equipment in a VSC substation can be calculated using similar procedures to those prescribed for HVDC systems with line-commutated converters (LCC) in IEC 61803. Annex A presents the main differences between LCC and VSC HVDC substations in so far as they influence the method for determining power losses of other equipment.

This standard does not apply to converter valves for line-commutated converter HVDC systems.

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 60633, *Terminology for high-voltage direct current (HVDC) transmission*

IEC 60747-2, *Semiconductor devices – Discrete devices and integrated circuits – Part 2: Rectifier diodes*

IEC 60747-9:2007, *Semiconductor devices – Discrete devices – Part 9: Insulated-gate bipolar transistors (IGBTs)*

IEC 62747:2014, *Terminology for voltage-sourced converters (VSC) for high-voltage direct current (HVDC) systems*

ISO/IEC Guide 98-3, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC 60633, IEC 62747, IEC 60747-2, IEC 60747-9 as well as the following apply.

NOTE 1 Related terms and definitions can also be found in IEC TR 62543, IEC 62751-2 and in the other relevant parts of the IEC 60747 series.

NOTE 2 Throughout this standard, the term “insulated gate bipolar transistor (IGBT)” is used to indicate a turn-off semiconductor device; however, the standard is equally applicable to other types of turn-off semiconductor devices such as the GTO, IGCT, ETO, IEGT, etc.

3.1 Converter types

3.1.1

2-level converter

converter in which the voltage between the a.c. terminals of the VSC unit and VSC unit midpoint is switched between two discrete d.c. voltage levels

Note 1 to entry: VSC unit midpoint is defined in 3.5.9.

3.1.2

multi-level converter

converter in which the voltage between the a.c. terminals of the VSC unit and VSC unit midpoint is switched between more than three discrete d.c. voltage levels

Note 1 to entry: VSC unit midpoint is defined in 3.5.9.

3.1.3

modular multi-level converter

MMC

multi-level converter in which each VSC valve consists of a number of MMC building blocks connected in series

Note 1 to entry: MMC building block is defined in 3.5.4.

Note 2 to entry: This note applies to the French language only.

3.1.4

cascaded two-level converter

CTL

modular multi-level converter in which each switch position consists of more than one IGBT-diode pair connected in series

Note 1 to entry: IGBT-diode pair is defined in 3.2.4.

Note 2 to entry: This note applies to the French language only.

3.2 Semiconductor devices

3.2.1

turn-off semiconductor device

controllable semiconductor device which may be turned on and off by a control signal, for example an IGBT

3.2.2

insulated gate bipolar transistor

IGBT

turn-off semiconductor device with three terminals: a gate terminal (G) and two load terminals emitter (E) and collector (C)

Note 1 to entry: By applying appropriate gate to emitter voltages, current in one direction can be controlled, i.e. turned on and turned off.

Note 2 to entry: This note applies to the French language only.

3.2.3

free-wheeling diode

FWD

power semiconductor device with diode characteristic

Note 1 to entry: A FWD has two terminals: an anode (A) and a cathode (K). The current through FWDs is in opposite direction to the IGBT current. FWDs are characterized by the capability to cope with high rates of decrease of current caused by the switching behaviour of the IGBT.

Note 2 to entry: This note applies to the French language only.

3.2.4

IGBT-diode pair

arrangement of IGBT and FWD connected in inverse parallel

Note 1 to entry: An IGBT-diode pair is usually in one common package; however, it can include individual IGBTs and/or diodes packages connected in parallel.

3.3 Converter operating states

3.3.1

no-load operating state

condition in which the VSC substation is energized but the IGBTs are blocked and all substation service loads and auxiliary equipment are connected

3.3.2

idling operating state

condition in which the VSC substation is energized and the IGBTs are de-blocked but with no active or reactive power output at the point of common connection to the a.c. network

Note 1 to entry: The “idling operating” and “no-load” conditions are similar but from the no-load state several seconds may be needed before power can be transmitted, while from the idling operating state, power transmission may be commenced almost immediately (less than 3 power frequency cycles).

Note 2 to entry: In the idling operating state, the converter is capable of actively controlling the d.c. voltage, in contrast to the no-load state where the behaviour of the converter is essentially “passive”.

Note 3 to entry: Losses will generally be slightly lower in the no-load state than in the idling operating state, therefore this operating mode is preferred where the arrangement of the VSC system permits it.

3.3.3

operating state

condition in which the VSC substation is energized and the converters are de-blocked

Note 1 to entry: Unlike line-commutated converter, VSC can operate with zero active/reactive power output.

3.3.4

no-load power losses

power losses in the VSC valve in the no-load state

Note 1 to entry: In some converter designs, it may be necessary to make occasional switching operations for the purposes of balancing voltages between different parts of the converter. In such converters, the calculation of no-load losses shall take into account the switching frequency of such an operating mode.

3.3.5

idling operating losses

losses in the VSC valve in the idling operating state

3.3.6

operating losses

losses in the VSC valve in the operating state

3.4 Device characteristics

3.4.1

IGBT collector-emitter saturation voltage

$V_{CE(sat)}$

collector-emitter voltage under conditions of gate-emitter voltage at which the collector current is essentially independent of the gate-emitter voltage

3.4.2

IGBT turn-on energy

E_{on}

energy dissipated inside the IGBT during the turn-on of a single collector current pulse

3.4.3

IGBT turn-off energy

E_{off}

energy dissipated inside the IGBT during the turn-off procedure of a single collector current pulse

3.4.4

diode forward voltage

V_F

voltage across the terminals of a diode which results from the flow of current in the forward direction

3.4.5

diode reverse recovery energy

E_{rec}

energy dissipated inside the diode during the turn-off procedure

3.5 Other definitions

3.5.1

VSC valve level

smallest indivisible functional unit of VSC valve

Note 1 to entry: For any VSC valve in which IGBTs are connected in series and operated simultaneously, one VSC valve level is one IGBT-diode pair including its auxiliaries. For MMC type valve, one valve level is one submodule together with its auxiliaries.

3.5.2

redundant levels

maximum number of series connected VSC valve levels or diode valve levels in a valve that may be short-circuited externally or internally during service without affecting the safe operation of the valve as demonstrated by type tests, and which if and when exceeded, would require shutdown of the valve to replace the failed levels or acceptance of increased risk of failures

Note 1 to entry: In valve designs such as the cascaded two level converter, which contain two or more conduction paths within each cell and have series-connected VSC valve levels in each path, redundant levels shall be counted only in one conduction path in each cell

3.5.3

valve electronics

electronic circuits at valve potential(s) which perform control and protection functions for one or more valve levels

3.5.4

MMC building block

self-contained, two-terminal controllable voltage source together with d.c. capacitor(s) and immediate auxiliaries, forming part of a MMC

3.5.5

switch position

semiconductor function which behaves as a single, indivisible switch

Note 1 to entry: A switch position may consist of a single IGBT-diode pair or, in the case of the cascaded two level converter, a series connection of multiple IGBT-diode pairs.

3.5.6

submodule

MMC building block where each switch position consists of only one IGBT-diode pair cell

3.5.7

cell

MMC building block where each switch position consists of more than one IGBT-diode pair connected in series

3.5.8

VSC unit

three VSC phase units, together with VSC unit control equipment, essential protective and switching devices, d.c. storage capacitors, phase reactors and auxiliaries, if any, used for conversion

3.5.9

VSC unit midpoint

point in a VSC unit whose electrical potential is equal to the average of the potentials of the positive and negative d.c. terminals of the VSC unit

Note 1 to entry: In some applications the VSC unit midpoint may exist only as a virtual point, not corresponding to a physical node in the circuit.

4 General conditions

4.1 General

Suppliers need to know in detail how and where losses are generated, since this affects component and equipment ratings. Purchasers are interested in a verifiable loss figure which allows equitable bid comparison and in a procedure after delivery which can objectively verify the guaranteed performance requirements of the supplier.

The overall uncertainty of the value of losses is an important parameter for a converter and for a converter station since the value of losses is used to compare investment cost to capitalized cost over the life-time of the converter station. To ensure that estimates are undisputed, adherence to the provisions of this standard and the provisions of ISO/IEC Guide 98-3 is indispensable. All measurements shall furthermore be traceable to national and/or international standards of measurement.

As a general principle, it would be desirable to determine the efficiency of an HVDC converter station by a direct measurement of its energy losses. However, attempts to determine the station losses by subtracting the measured output power from the measured input power should recognize that such measurements have an inherent inaccuracy, especially if performed at high voltage. The losses of an HVDC converter station at full load are generally of the order 1 % of the transmitted power. Therefore, the loss measured as a small difference between two large quantities is not likely to be a sufficiently accurate indication of the actual losses.

In some special circumstances it may be possible, for example, to arrange a temporary test connection in which two converters are operated from the same a.c. source and also connected together via their d.c. terminals. In this connection, the power drawn from the a.c. source equals the losses in the circuit. However, the a.c. source also provides var support and commutating voltage to the two converters. Once again, there are practical measurement difficulties. In order to avoid the problems described above, this standard standardizes a method of calculating the HVDC converter station losses by summing the losses calculated for each item of equipment. The standardized calculation method will help the purchaser to meaningfully compare the competing bids. It will also allow an easy generation of performance curves for the wide range of operating conditions in which the performance has to be known. In the absence of an inexpensive experimental method which could be employed

for an objective verification of losses during type tests, the calculation method is the next best alternative as it uses, wherever possible, experimental data obtained from measurements on individual equipment and components under conditions equivalent to those encountered in real operation.

Thus, for most cases, the losses are estimated from component characteristics, using suitable mathematical models of the converters. It is however important that all such estimates have a base in actual measurements having sufficiently low uncertainty. Care should also be taken to show the propagation of uncertainties from measurements and how they interact with the model. Estimates of the uncertainty contributions from imperfections in the models themselves should also be considered.

It is important to note that the power loss in each item of equipment will depend on the ambient conditions under which it operates, as well as on the operating conditions or duty cycles to which it is subjected. Therefore, the ambient and operating conditions shall be defined for each item of equipment, based on the ambient and operating conditions of the entire HVDC converter station.

4.2 Causes of power losses

Dependent on the converter topology, a VSC valve can either have the function to act like a controllable switch or to act like a controllable voltage source.

For the controllable voltage source type converter, the VSC valve is a complete controllable voltage source assembly, which is generally connected between one a.c. terminal and one d.c. terminal.

For the switch type converter, the VSC valve is an arrangement of IGBT-diode pairs connected in series and arranged to be switched simultaneously as a single functional unit.

Most of the power losses in VSC valves appear in IGBTs and diodes. In each case, two mechanisms are involved:

- conduction losses;
- switching losses.

There may, in addition, be small losses in d.c. submodule or cell capacitors, voltage divider and snubber circuits, valve electronics etc.

Since the technology of VSC transmission is developing rapidly with several quite different VSC topologies being used, a detailed procedure for calculating the power losses is not yet available for all possible converter topologies. As a result, the manufacturer of the VSC equipment shall present a detailed report of the VSC valve loss calculation, explaining the method used and justifying any assumptions made. This standard gives the general principles to be followed in calculating valve losses and provides guidance for the preparation and interpretation of such a report.

Due to the accuracy of d.c. metering systems (especially due to the poor accuracy of d.c. voltage measurement) the approach of the standard rests on calculations based on routine testing of devices (datasheet) together with some characterisation measurements.

4.3 Categories of valve losses

The various components of valve losses are subdivided into terms referred to as P_{V1} to P_{V9} :

- P_{V1} : IGBT conduction losses
- P_{V2} : diode conduction losses
- P_{V3} : other valve conduction losses

- P_{V4} : d.c. voltage-dependent losses
- P_{V5} : losses in d.c. capacitors of the valve
- P_{V6} : IGBT switching losses
- P_{V7} : diode turn-off losses
- P_{V8} : snubber losses
- P_{V9} : valve electronics power consumption

4.4 Operating conditions

4.4.1 General

Purchasers of HVDC systems may specify their own standard reference conditions for atmospheric pressure, ambient temperature, humidity, coolant temperature, power transmission level etc, at which the power losses are to be determined. Where the purchaser does not specify such reference conditions, losses shall be determined under the following default conditions.

4.4.2 Reference ambient conditions

The following default reference ambient conditions are applied:

- dry-bulb ambient temperature = 20 °C
- wet-bulb ambient temperature = 14 °C
- atmospheric pressure = 101,3 kPa.

4.4.3 Reference a.c. system conditions

The following default reference a.c. system conditions are applied:

- nominal a.c. system frequency,
- nominal a.c. network voltage,
- balanced a.c. conditions (i.e. no negative phase sequence).

4.4.4 Converter operating states

As a minimum, VSC valve losses shall be determined for the following operating states:

- no-load operation;
- idling operation;
- operation with 100 % rated power in each relevant direction of power transmission, with zero net reactive power exchange with the a.c. system, and with the d.c. voltage at the value as applicable to the power being transmitted.

In some VSC systems, the interface transformer includes a tap changer, the purpose of which is to adjust the valve-side a.c. voltage, in steady-state, to a value which allows the power losses to be optimised. The tap position has a large effect on the power losses of both the transformer and the converter and should therefore be correctly represented in all calculations. The tap position of the transformer tap changer (where fitted) is important in the determination of losses. The calculations of losses shall take into account the tap position corresponding to the operating point at which losses are to be determined and the control and protection strategies employed for the VSC system, including, for example, fault ride-through requirements. The manufacturer is responsible for defining and justifying the tap position for the loss calculation.

4.4.5 Treatment of redundancy

For the calculation of valve losses, all redundant VSC levels shall be assumed to be in operation.

NOTE This approach yields the highest total losses in the valve, although it does not give the highest losses per VSC valve level, which occur when redundant levels are shorted.

4.5 Use of real measured data

4.5.1 General

The characteristics of the IGBTs and diodes used in the valve shall be determined by a combination of routine tests performed under standardised conditions on 100 % of production, and more comprehensive characterisation tests performed on smaller samples under conditions that are more representative of the conditions encountered in the real converter valve.

The routine tests shall be used to derive a population average of all IGBTs and diodes supplied for the project, but under standardised operating conditions which may not necessarily be applicable to the project (for example, junction temperature). The characterisation tests shall then be used to derive correction factors applicable for the exact operating conditions of the project.

4.5.2 Routine testing

As a minimum, the following tests shall be performed in accordance with IEC Publications by the device manufacturer on all IGBTs (IEC 60747-9), and diodes (IEC 60747-2) used for the valve:

- IGBT on-state voltage $V_{CE(sat)}$ and diode forward voltage V_F at one typical value of current and temperature;
- IGBT turn-on energy E_{on} and turn-off energy E_{off} at one typical commutating condition;
- diode recovery energy E_{rec} at one typical commutating condition.

This data shall be used to calculate the average device properties for calculation of the losses of the complete converter.

The conditions under which the routine tests are performed may not be fully representative of the conditions encountered in the VSC valve, in respect of temperature, stray inductance, gate drive behaviour, etc.

4.5.3 Characterisation testing

4.5.3.1 Characterisation testing of semiconductor devices

A minimum of 10 devices from at least 2 different production lots shall be subjected to a more comprehensive programme of characterisation tests to permit the routine test data obtained in 4.4.1 above to be adjusted to the correct operating conditions of the VSC valve. The following conditions shall be reproduced adequately.

Fixed values for a given design of VSC valve are as follows:

- stray inductance of commutating loop;
- other semiconductor devices affected by the commutation process;
- gate drive characteristics;
- snubber circuits (if any).

Operating variables are as follows:

- d.c capacitor or d.c. submodule capacitor voltage, scaled to one VSC level;
- device current (over the range from standby to operation at full power in either rectifier or inverter mode);
- junction temperature (over the range from standby to operation at full power in either rectifier or inverter mode).

The characterization tests shall be performed in accordance with IEC 60747-2 and IEC 60747-9.

4.5.3.2 Characterisation testing of other components

Characterization tests for components are as follows:

- R_{ESR} test;
- snubber turn-on and turn-off tests.

5 Conduction losses

5.1 General

When an IGBT or a diode is in the conducting state, it exhibits a small on-state voltage of a few volts. This on-state voltage, multiplied by the current flowing through the device, gives rise to “conduction losses”. The on-state voltage is referred to as V_F in diodes and $V_{CE(sat)}$ in IGBTs.

The on-state voltage depends on current in a non-linear manner, and ~~to a lesser extent~~ also on the “junction temperature” of the device, as shown on Figure 1.

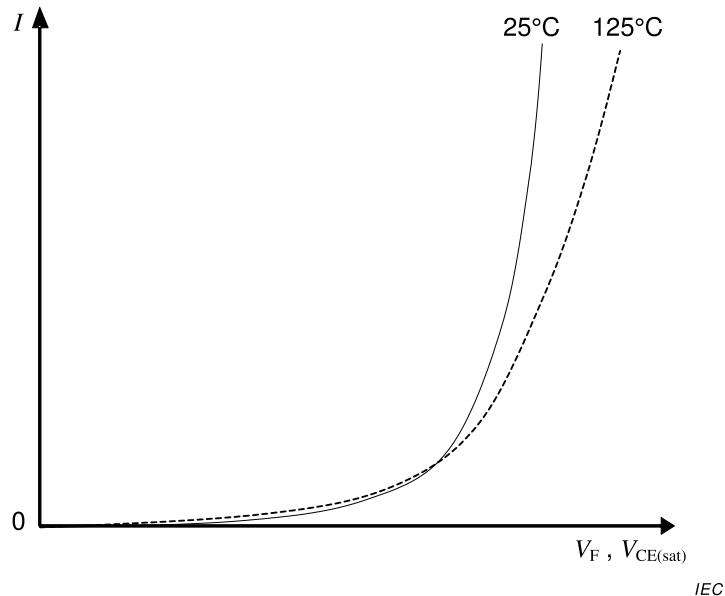


Figure 1 – On-state voltage of an IGBT or diode

NOTE 1 The on-state voltage V_{CE} of an IGBT also depends on the gate-emitter voltage V_{GE} . For low values of V_{GE} , increasing V_{GE} reduces the value of V_{CE} . However, above a certain value of V_{GE} , little or no further reduction of V_{CE} occurs and the IGBT is said to be “saturated”. It is assumed here that V_{GE} is high enough to ensure that the IGBT remains fully saturated. Consequently $V_{CE(sat)}$ (the saturated value of V_{CE}) can be used for loss calculation.

NOTE 2 On some types of semiconductor device, the “crossover” current can be very low, such that for most practical values of current the on-state voltage always increases with temperature.

Calculation of power losses requires that the on-state voltage be represented mathematically, so that the average conduction losses over a complete cycle may be evaluated as follows:

$$P_{\text{cond}_T} = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} I_T(\omega t) \cdot V_{\text{CE(sat)}}(I_T) \cdot d(\omega t) \quad (1)$$

for an IGBT, or

$$P_{\text{cond}_D} = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} I_D(\omega t) \cdot V_F(I_D) \cdot d(\omega t) \quad (2)$$

for a diode.

The conduction losses of semiconductors in a complete valve are then found by summing the conduction losses calculated as above for each IGBT and each diode in the valve.

To simplify this process, the on-state voltage shown in Figure 1 is usually represented as a piecewise-linear approximation with a threshold voltage V_0 and a slope resistance R_0 , as shown on Figure 2.

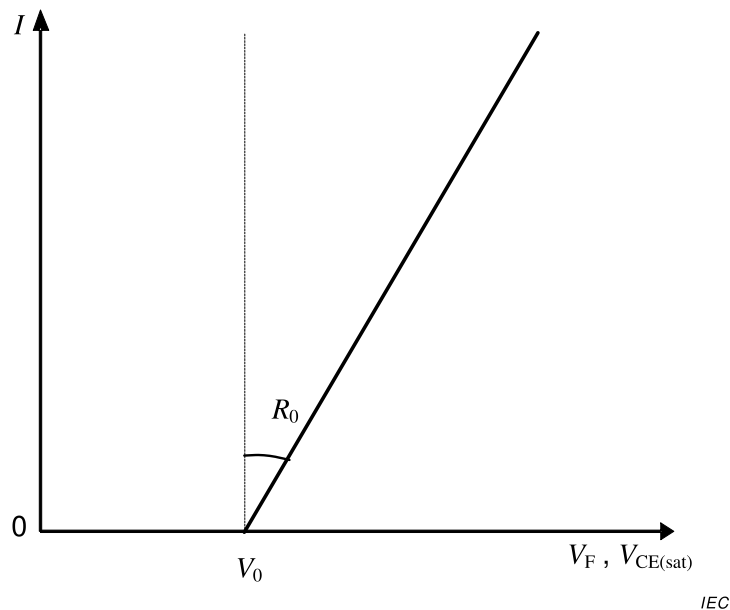


Figure 2 – Piecewise-linear representation of IGBT or diode on-state voltage

Having made this approximation, the conduction losses in each semiconductor device are then determined by using the average and rms currents through that device:

$$P_{\text{cond}} = V_0 \cdot I_{\text{av}} + R_0 \cdot I_{\text{rms}}^2 \quad (3)$$

where

V_0, R_0 are the threshold voltage and slope resistance of the device;

I_{av} is the mean current in the device, averaged over one power-frequency cycle.

$$I_{av} = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} I(\omega t) \cdot d(\omega t) \quad (4)$$

I_{rms} is the rms current in the device, averaged over one power-frequency cycle.

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} I(\omega t)^2 \cdot d(\omega t)} \quad (5)$$

In general, rectifier mode gives rise to the largest diode conduction losses, while inverter operation gives rise to the largest IGBT conduction losses.

It is possible to obtain greater accuracy by using a more exact model of the device on-state voltage (as per Figure 1) rather than the piecewise linear approximation, and then performing a direct numerical integration. However, the piecewise-linear approximation is preferred because it simplifies the calculation process, allows greater transparency and still permits good accuracy to be obtained, provided the measurements used to derive the piecewise-linear approximation are made at appropriate values of current. Therefore it is recommended that V_0 and R_0 are determined by measuring on-state voltage at 100 % and 33 % of the device rated current and performing a linear extrapolation.

5.2 IGBT conduction losses

In the 2-level converter, all IGBTs experience the same current. Consequently the total IGBT conduction losses per valve may be calculated by multiplying the conduction loss per IGBT by the number of VSC levels per valve:

$$P_{V1} = N_t \cdot [V_{0T} \cdot I_{Tav} + R_{0T} \cdot I_{Trms}^2] \quad (6)$$

where

N_t is the number of VSC valve levels per valve;

V_{0T} is the IGBT threshold voltage;

R_{0T} is the IGBT slope resistance;

I_{Tav} is the mean current in the IGBT;

I_{Trms} is the rms current in the IGBT.

IGBT conduction losses in multi-level converters may be evaluated using similar principles outlined above for 2-level converters. However, the procedure is more complex because not all IGBTs in a given phase unit experience the same current.

In general, the average and rms currents need to be calculated separately for each different IGBT operating duty, and the results multiplied by the number of such devices in each valve.

5.3 Diode conduction losses

In the 2-level converter, all diodes experience the same current. Consequently the total diode conduction losses per valve may be calculated by multiplying the conduction loss per diode by the number of VSC levels per valve:

$$P_{V2} = N_t \cdot [V_{0D} \cdot I_{Dav} + R_{0D} \cdot I_{Drms}^2] \quad (7)$$

where

V_{0D} is the diode threshold voltage;

R_{0D} is the diode slope resistance;
 I_{Dav} is the mean current in the diode;
 I_{Drms} is the rms current in the diode.

Diode losses in multi-level converters may be calculated using similar principles but, as described for IGBT losses in the preceding subclause, are more complex and generally need to be calculated separately for each different diode operating duty.

5.4 Other conduction losses

Conduction losses in components other than the semiconductors and submodule d.c. capacitor (for example, busbars) are normally small. However, they may not be negligible and should be included in the calculation of valve losses. Some designs of valve require inductance in series with each valve (valve reactor), either as a discrete component or distributed in the valve. Losses in the valve reactors for such valves shall be considered as part of the valve losses.

Calculation of such losses is relatively straightforward and depends only on the resistance of each conducting element and the rms current that flows through it.

Where the same current flows through all conducting elements in a valve, the value of these losses per valve is given by:

$$P_{V3} = I_{vrms}^2 \cdot R_s \quad (8)$$

where

I_{vrms} is the rms current flowing in the valve;
 R_s is the total resistance of all conducting elements in the valve, other than IGBTs and diodes.

Where not all conducting elements in the valve carry the same currents, the above principles should be evaluated separately for each element.

6 D.C. voltage-dependent losses

D.C. voltage-dependent losses are losses caused by off-state leakage currents through IGBTs and diodes and shunt resistive components in parallel with the IGBTs and diodes. Shunt resistive components in parallel with the IGBTs and diodes could include:

- resistive voltage grading circuits (d.c. grading circuits);
- resistive voltage dividers for voltage measurement;
- water cooling pipework;
- shunt resistive losses across capacitor dielectric material;
- discharge resistors across d.c. capacitors.

These losses are calculated as follows:

$$P_{V4} = V_{vrms}^2 / R_{DC} \quad (9)$$

where

V_{vrms} is the rms value of voltage between the terminals of the valve;
 R_{DC} is the effective d.c. resistance of a complete valve.

NOTE Leakage currents in IGBTs and diodes are normally very low when the valve is in the no-load or idling operating states; however in the operating state, the leakage currents can be significant because of the high junction temperatures.

7 Losses in d.c. capacitors

Some types of VSC valve include in-built d.c. capacitors which carry an appreciable component of current at fundamental or low-order harmonic frequencies. As a result, the power losses in the capacitors of valves of this type cannot be neglected.

In general, losses in d.c. capacitors can be divided into ohmic losses and dielectric losses.

Ohmic losses represent $I^2 \times R$ losses in the metallic components within the capacitor, chiefly the film metallisation and internal leads.

Dielectric losses in a capacitor are related to the energy lost in the dielectric material over each voltage cycle. Dielectric losses are caused by the periodic realignment of the molecules within the dielectric as the voltage stress across the dielectric changes during the cycle, and are analogous to hysteresis losses in ferromagnetic materials.

The effects of ohmic and dielectric losses are frequently combined into a single term referred to as the equivalent series resistance R_{ESR} of the capacitor. R_{ESR} is a function of frequency and is related to, but not exactly equal to, the actual internal series resistance.

The total d.c. capacitor losses per valve are then calculated as follows:

$$P_{\text{V5}} = \sum_{j=1}^{N_c} I_{\text{crms}_j}^2 \cdot R_{\text{ESR}_j} \quad (10)$$

where

N_c is the number of capacitors in the valve;

I_{crms_j} is the rms current flowing in the j^{th} d.c. capacitor of the valve;

R_{ESR_j} is the equivalent series resistance of the j^{th} d.c. capacitor in the valve.

NOTE 1 Dielectric losses are normally most significant in a.c. applications where the capacitor voltage polarity reverses twice per cycle. For d.c. capacitors the voltage is usually non-reversing and dielectric losses are therefore small, but depending on the capacitor technology used, cannot be negligible.

NOTE 2 There can also be a third component of loss caused by the finite insulation resistance of the dielectric material, but this is normally very small. It is covered by d.c. voltage-dependent losses as described in the preceding subclause.

NOTE 3 ESR (equivalent series resistance) is a non-linear, frequency-dependent quantity. For accurate results, it is important that ESR be determined by real measurements on a capacitor of the same type as used in the valve, under realistic conditions of voltage, current and frequency.

8 Switching losses

8.1 General

Each time an IGBT turns on or off, or a diode turns off, it incurs a small switching energy of a few Joules. In most VSC topologies, these switching events occur several times per fundamental-frequency cycle. For converters using pulse-width modulation (PWM) in particular, the resulting switching loss (switching energy multiplied by switching frequency) can be a large proportion of the total valve losses.

Because different converter topologies use different switching strategies and the switching behaviour depends on the overall control methods used, only general guidance on calculating switching losses can be given here. However, the manufacturer shall present, in the loss calculation report, a detailed justification of the method used.

8.2 IGBT switching losses

During turn-on and turn-off in an IGBT, the device is subjected to high current and high voltage simultaneously as part of the switching process. As a result the IGBT incurs a high peak power dissipation, the time integral of which is known as the switching energy. IGBT switching energies are referred to as the turn-on energy E_{on} and the turn-off energy E_{off} . The switching losses of the IGBT E_{on} and E_{off} shall be provided according to the IEC 60747-9:2007 (6.3.11 and 6.3.12).

Both E_{on} and E_{off} depend nearly linearly on the instantaneous value of collector current I_C at the instant of switching, as shown on Figure 3.

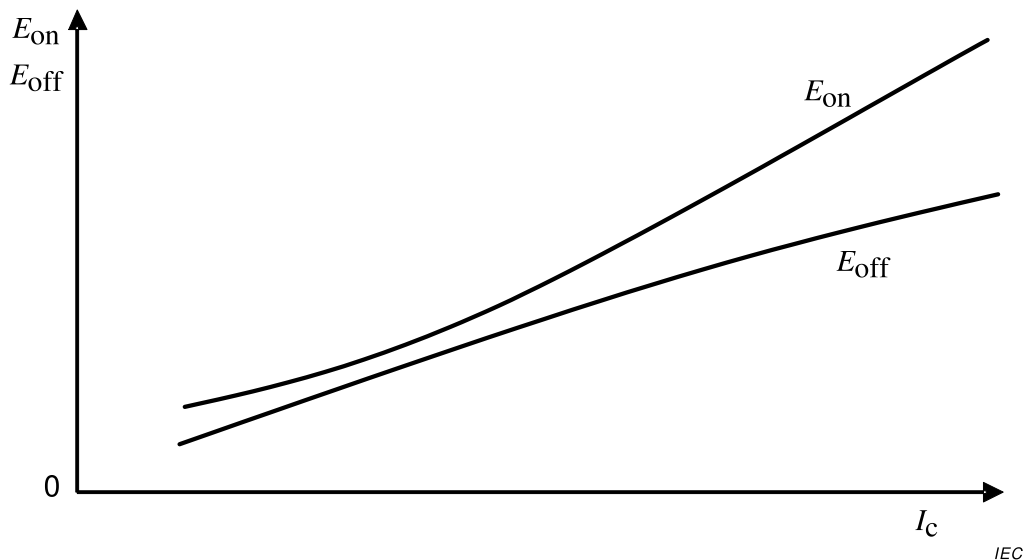


Figure 3 – IGBT switching energy as a function of collector current

E_{on} and E_{off} are normally quoted by the IGBT manufacturer as a function of current, under certain idealised operating conditions with a simple design of gate drive and a fixed value of gate resistor. The gate resistor value influences the switching losses because it affects the charge and discharge times of the gate capacitance, and hence the switching speed.

Moreover, some designs of VSC, particularly in valves of the “switch” type, may use more advanced designs of gate drive which incorporate active voltage sharing algorithms or “active snubber” circuits. The IGBT gate drive circuit may also include an active overvoltage clamp algorithm to suppress the transient overvoltage which occurs across the IGBT after turn-off. These algorithms adjust the switching speed of each IGBT in order to prevent any individual IGBT in the valve from experiencing a potentially harmful overvoltage, but as a consequence they may result in the switching losses being higher than stated by the IGBT manufacturer.

The VSC manufacturer should therefore justify in detail the values of E_{on} and E_{off} used in the loss calculation, based on the design of gate drive circuit, the choice of gate resistor (where applicable) and the philosophy with regard to voltage grading where series connected IGBTs are used.

Switching losses also depend on the d.c. link voltage (per IGBT) at the instant of switching, and ~~to a lesser extent~~ also on junction temperature. In 2-level and 3-level converters, the

mean d.c. link voltage per IGBT varies little from the nominal design value. However, for modular multi-level converters, the d.c. link voltage (here provided by the submodule d.c. capacitor) can vary considerably from one switching instant to the next. Consequently, the IGBT switching losses should be evaluated with care in such designs and the switching losses should be averaged over several cycles in order to obtain a meaningful result. An averaging period of one second is proposed in order to simplify the equation.

The total IGBT switching losses per valve are calculated by summing all the turn-on energies E_{on} and the turn-off energies E_{off} for all of the VSC valve levels in the valve, over a sampling period t_s , which is recommended to be one second:

$$P_{V6} = \frac{1}{t_s} \cdot \sum_{j=1}^{N_t} \sum_{k=1}^{N_s} (E_{on_j,k}(V,I) + E_{off_j,k}(V,I)) \tag{11}$$

where

t_s is the sampling time;

N_s is the average number of switching cycles (on+off) experienced by each VSC valve level during the sampling time t_s ;

$E_{on_j,k}$ is the turn-on energy dissipated in the IGBT(s) of the j^{th} VSC valve level for the k^{th} turn-on event during the sampling time t_s ;

$E_{off_j,k}$ is the turn-off energy dissipated in the IGBT(s) of the j^{th} VSC valve level for the k^{th} turn-off event during the sampling time t_s .

8.3 Diode switching losses

For diodes, the turn-on energy is normally negligible because the diode conducts as soon as it becomes forward biased. However, the turn-off (recovery) energy E_{rec} is not negligible. The recovery energy arises from the reverse recovered charge Q_{rr} which passes through the diode shortly after the current crosses zero. The recovery energy increases with the current which had been flowing in the diode prior to the turn-off event, although the relationship between E_{rec} and current, as shown on Figure 4, is non-linear. E_{rec} can be expressed as a piecewise-linear function of current (as for on-state voltage) or a power law relationship. The switching losses of the diode E_{rec} shall be provided according to IEC 60747-2.

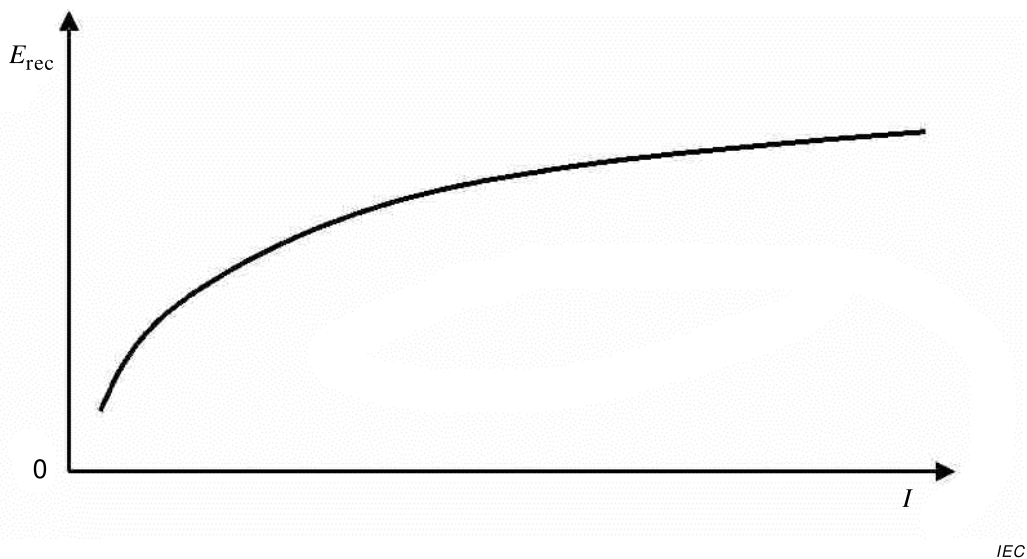


Figure 4 – Diode recovery energy as a function of current

The total diode switching losses per valve are then calculated by summing all the recovery energies E_{rec} for all of the valve levels in the valve, over a defined sampling period t_s :

$$P_{V7} = \frac{1}{t_s} \cdot \sum_{j=1}^{N_t} \sum_{k=1}^{N_s} E_{rec_j,k}(V,I) \quad (12)$$

where

$E_{rec_j,k}$ is the diode recovery energy dissipated in the diode(s) of the j^{th} VSC valve level for the k^{th} diode turn-off event during the sampling time t_s .

9 Other losses

9.1 Snubber circuit losses

Some designs of VSC valve may use passive snubber circuits to reduce the turn-on or turn-off stresses on the IGBTs or, for valves of the “switch” type, to assist with voltage sharing.

NOTE 1 Resistive voltage sharing circuits are not considered as “snubber circuits”, although they can contribute to voltage sharing. Losses in resistive voltage sharing circuits are covered by d.c. voltage dependent losses as described in Clause 6.

NOTE 2 “Active snubber” circuits, where the IGBT gate drive adjusts the speed of switching of each IGBT in order to minimise any voltage distribution errors, are considered under “IGBT switching losses” in 8.2.

Snubber circuits may be designed to assist with turn-on, or turn-off, or both. Each time a switching event takes place, the snubber circuit will dissipate an energy E_{sn_on} (for a turn-on snubber) or E_{sn_off} (for a turn-off snubber). Many different designs of snubber circuit are possible, but in principle the snubber losses are calculated by taking the energy dissipated in the snubber circuit multiplied by the frequency of occurrence of dissipative events in the valve in a similar way to that used for IGBT and diode switching losses:

$$P_{V8} = \frac{1}{t_s} \cdot \sum_{j=1}^{N_t} \sum_{k=1}^{N_s} (E_{sn_on_j,k}(V,I) + E_{sn_off_j,k}(V,I)) \quad (13)$$

where

$E_{sn_on_j,k}$ is the energy dissipated in the snubber circuit(s) of the j^{th} VSC valve level for the k^{th} turn-on event of the associated IGBT during the sampling time t_s ;

$E_{sn_off_j,k}$ is the energy dissipated in the snubber circuit(s) of the j^{th} VSC valve level for the k^{th} turn-off event of the associated IGBT during the sampling time t_s .

The values of E_{sn_on} and E_{sn_off} should ideally be determined by direct measurement on a real snubber circuit, as part of the characterization testing; however, since the performance of the snubber is affected by the switching characteristics of the semiconductor devices and vice versa, the testing also needs to represent the semiconductor devices. It should be noted that, with this approach it is impossible to distinguish between measurements of snubber energies and semiconductor switching energies. Hence, where snubber losses are determined by measurement it may be necessary to consider the test as a combined test of snubber energy and switching energy, and subsequently to combine the calculation of P_{V8} with that of P_{V6} and P_{V7} .

9.2 Valve electronics power consumption

The total valve electronics power consumption per valve is calculated by multiplying the power loss per valve level by the number of valve levels per valve:

$$P_{V9} = P_{GU} \cdot N_t \quad (14)$$

where

P_{GU} is the total power consumption of gate unit(s), power supply circuits and other auxiliary circuits in one VSC valve level.

NOTE Where the valve electronics derives its power from a passive snubber circuit, the power consumption of the valve electronics can already be counted in the losses of the snubber circuit as described in the previous subclause.

10 Total valve losses per converter substation

The total losses per valve are calculated by summing the contributions P_{V1} to P_{V9} :

$$P_{VT} = \sum_{i=1}^9 P_{Vi} \quad (15)$$

The total VSC valve losses per converter substation are equal to the losses per valve, P_{VT} multiplied by the number of valves in the converter substation.

NOTE Some multi-level converter topologies contain more than one type of valve, or valves with different operating duties. In such cases, the above procedure is evaluated separately for each type of valve or operating duty.

Table 1 contains a matrix indicating sources of data needed for calculation of various types of valve losses.

Table 1 – Matrix indicating the relationship of data needed for calculation of losses and the type of valve losses (1 of 2)

Data needed as input for calculation of losses	Source			Type of valve losses								
	Routine testing	Characterising testing	Specified by VSC manufacturer	IGBT conduction losses (P_{V1})	Diode conduction losses (P_{V2})	Other conduction losses (P_{V3})	D.C. voltage-dependent losses (P_{V4})	Losses in d.c. capacitors (P_{V5})	IGBT switching losses (P_{V6})	Diode switching losses (P_{V7})	Snubber circuit losses (P_{V8})	Valve electronics power consumption (P_{V9})
IGBT on-state voltage $V_{CE(sat)}$ under standardized reference conditions.	x			x								
IGBT on-state voltage $V_{CE(sat)}$ as a function of current and temperature.		x		x								
Diode forward voltage V_F under standardized reference conditions.	x				x							
Diode forward voltage V_F as a function of current and temperature		x			x							
Total resistance of all conducting elements in the valve R_s			x			x						
Effective d.c. resistance of a complete valve R_{DC}			x				x					
d.c. capacitor ESR as a function of frequency		x						x				
IGBT turn-on energy E_{on} under standardized reference conditions.	x								x			
IGBT turn-on energy E_{on} as a function of current, voltage, temperature, commutating inductance and gate drive parameters		x							x			
IGBT turn-off energy E_{off} under standardized reference conditions.	x								x			
IGBT turn-off energy E_{off} as a function of current, voltage, temperature, commutating inductance and gate drive parameters		x							x			

Annex A (informative)

Determination of power losses in other HVDC substation equipment

A.1 General

For the majority of the equipment in a VSC HVDC substation, with the exception of the converter valves, it is possible to determine power losses in a similar way to that specified in IEC 61803 for an HVDC substation with line-commutated converters (LCC). Nevertheless there are some differences. Since there is currently no standard for calculating power losses in such equipment for a VSC HVDC substation, the purpose of this annex is to describe the main differences between the practice adopted in IEC 61803 for an LCC HVDC substation, and the method needed for a VSC HVDC substation. In general terms, the main differences arise from the different harmonic spectra emitted by LCC and VSC HVDC substations. Line-commutated converters produce very high amplitudes of relatively low-order characteristic harmonic currents on the a.c. side (11th, 13th, 23rd, 25th...) and harmonic voltages on the d.c. side (12th, 24th, 36th...). Voltage-sourced converters generally produce much smaller amounts of these low-order harmonics but may produce larger levels of higher-order harmonics.

When the converter valve is of the “switch” type (for example the 2-level and 3-level converters with Pulse-Width Modulation, PWM) the converter usually produces large amounts of harmonics at the PWM frequency, multiples and sidebands thereof. In such converters, the range of harmonics considered in IEC 61803 (fundamental to 49th on the a.c. side and 12th to 48th on the d.c. side) may not be wide enough and it may be necessary to extend the upper limit, for example to 100th harmonic.

Voltage sourced converters in which the converter valves are of the “controllable voltage source” type (for example the modular multi-level converter and cascaded two-level converter) generally produce only small amounts of harmonic distortion and in many cases require no filtering.

Figure A.1 illustrates a typical single-line diagram of a VSC HVDC substation. It should be emphasised that not all of the components shown on Figure A.1 will necessarily exist in all substations, and conversely some VSC substations may have a requirement for additional equipment not shown on Figure A.1.

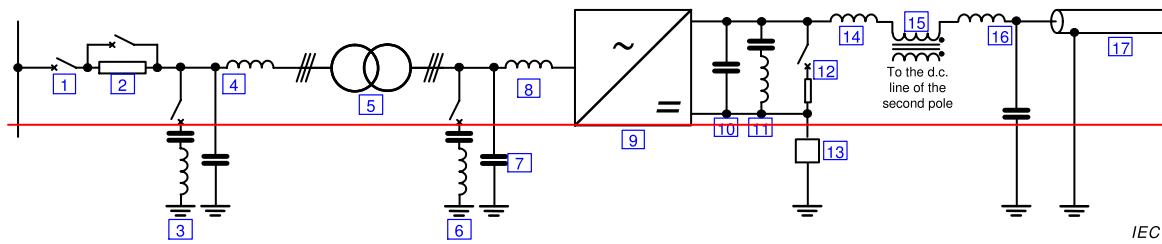
A.2 Guidance for calculating losses in each equipment

A.2.1 Circuit breaker

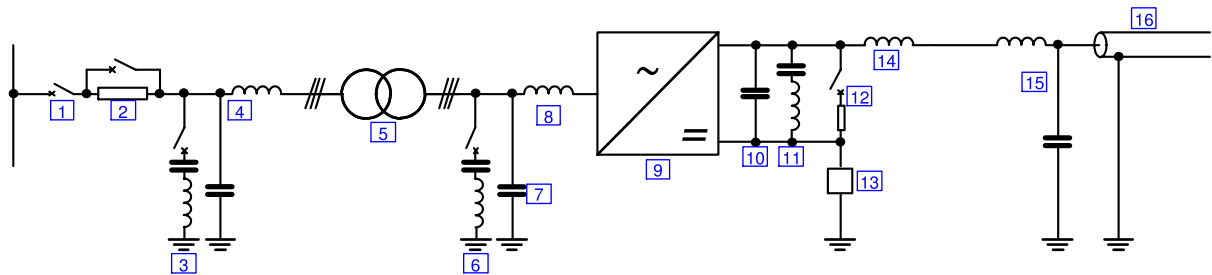
Power losses in the circuit breaker are normally neglected.

A.2.2 Pre-insertion resistor

Some VSC systems include a pre-insertion resistance in the a.c. connection to the converter, which is bypassed by a circuit breaker or disconnector after the VSC d.c. capacitors and submodule/cell d.c. capacitors have been fully charged. However, this system does not contribute to steady-state losses and need not be considered in the loss evaluation.



IEC



IEC

Key

1	circuit breaker	10	VSC d.c. capacitor ^c
2	pre-insertion resistor	11	d.c. harmonic filter
3	line side harmonic filter	12	dynamic braking system
4	line side high frequency filter	13	neutral point grounding branch ^d
5	interface transformer	14	d.c. reactor
6	converter side harmonic filter	15	common-mode blocking reactor
7	converter side high frequency filter ^a	16 15	d.c. side high frequency filter
8	phase reactor ^a	17 16	d.c. cable or overhead transmission line
9	VSC unit ^b		

^a In some designs of VSC, the phase reactor can fulfil part of the function of the converter-side high frequency filter.

^b In some VSC topologies, each valve of the VSC unit can include a “valve reactor”, which can be built in to the valve or provided as a separate component.

^c In some designs of VSC, the VSC d.c. capacitor can be partly or entirely distributed amongst the three phase units of the VSC unit, where it is referred to as the d.c. submodule capacitors.

^d The philosophy and location of the neutral point grounding branch can be different depending on the design of the VSC unit.

Figure A.1 – Major components that may be found in a VSC substation

A.2.3 Line side harmonic filter

Losses in the line side harmonic filter, where fitted, may be calculated by a similar process to the calculation of losses in the a.c. filters of an LCC HVDC substation, as described in 5.3 of IEC 61803:1999 and IEC 61803:1999/AMD1:2010. However, it should be noted that in comparison with the a.c. harmonic filters on an LCC HVDC substation, the a.c. filters in a VSC substation generally have much lower MVar and consequently a smaller capacitor in relation to the tuning inductor(s) and damping resistor(s).

A.2.4 Line side high frequency filter

Losses in the line side high frequency filter, where fitted, may be calculated by a similar process to the calculation of losses in the a.c. series filters of an LCC HVDC substation, as described in 5.9 of IEC 61803:1999 and IEC 61803:1999/AMD1:2010, but noting the possible need to extend the range of harmonic orders considered.

A.2.5 Interface transformer

The interface transformer is analogous to the converter transformer in an LCC HVDC substation and is generally the second largest contributor to the losses of the entire substation, after the VSC valves.

Power losses in the interface transformer may be calculated in a similar way to the method given in 5.2 of IEC 61803:1999, IEC 61803:1999/AMD1:2010 and IEC 61803:1999/AMD2:2016, but noting the possible need to extend the range of harmonic orders considered.

A.2.6 Converter side harmonic filter

Losses in the converter side harmonic filter, where fitted, may be calculated by a similar process to those outlined for the line side harmonic filter (A.2.3 above).

A.2.7 Converter side high frequency filter

Losses in the converter side high frequency filter, where fitted, may be calculated by a similar process to those outlined for the line side high frequency filter (A.2.4 above).

A.2.8 Phase reactor

The phase reactor used in some VSC substations has no direct equivalent in an LCC HVDC substation. It carries mainly fundamental frequency current but in converters based on valves of the “switch” type, is exposed to high levels of harmonic currents and voltages from the converter. In such cases the reactor may require a special design in order to eliminate problems of electromagnetic interference or heating caused by skin and proximity effects. The general principles outlined in IEC 61803:1999, IEC 61803:1999/AMD1:2010 and IEC 61803:1999/AMD2:2016 (5.2, 5.3.3 and 5.6 being the most relevant) may be used for guidance but determination of losses in such reactors should be performed with care.

Where the converter is based on valves of the “controllable voltage source” type, the phase reactor may be of a more conventional design (usually air-cored) or may be omitted altogether. In such cases, the losses in the phase reactor may be calculated by a similar process to the calculation of losses in the a.c. filter reactors of an LCC HVDC substation, as described in 5.3.3 of IEC 61803:1999 and IEC 61803:1999/AMD1:2010. In such designs, the harmonic content of the reactor current is normally very low.

A.2.9 VSC unit

The VSC unit consists of the VSC valves, which are covered by the body of this standard, and in some topologies the VSC unit also includes valve reactors. Losses in the valve reactors, where fitted, may be calculated by a similar process to the method for a.c. filter reactors given in 5.3.3 of IEC 61803:1999/AMD1:2010.

A.2.10 VSC d.c. capacitor

The VSC d.c. capacitor used in some VSC substations has no direct equivalent in an LCC HVDC substation, although it is analogous to the capacitive part of the d.c. filter. Its power losses may be calculated by a similar process to the calculation of losses in the d.c. filter capacitor of an LCC HVDC substation, as described in 5.7.2 of IEC 61803:1999.

NOTE The submodule d.c. capacitors fitted to some designs of valve are considered as part of the valve and are covered by the body of this standard.

A.2.11 D.C. harmonic filter

Power losses in the d.c. harmonic filter, where fitted, may be calculated in a similar way to the method given in 5.7 of IEC 61803:1999/AMD1:2010, but noting the possible need to extend the range of harmonic orders considered.

A.2.12 Dynamic braking system

Some VSC systems may include a dynamic braking system for active control of d.c. overvoltage, particularly during load-rejection events when importing power from an islanded a.c. generating system. The dynamic braking system generally consists of a power electronic valve (the dynamic braking valve) similar in construction to the main valves of the converter, and a large braking resistor. In some designs the braking resistor may be built in to the dynamic braking valve as opposed to being a separate item of equipment.

Losses in the dynamic braking system while it is operating to reduce the d.c. voltage do not need to be accounted for in the overall determination of losses, since such events are rare and of very short duration. However, the steady-state losses of the dynamic braking system should be accounted for.

In steady state, the losses in the resistive part of the dynamic braking system can generally be neglected. Similarly, conduction losses and d.c. capacitor losses in the dynamic braking valve may be neglected; however the dynamic braking valve will generally incur d.c. voltage-dependent losses (Clause 6) and the power consumption of the valve electronics (9.2). Some types of valve may also incur snubber losses (9.1) and switching losses (Clause 8).

Losses in the dynamic braking valve under steady-state conditions should be calculated using the relevant clauses of the body of this standard.

A.2.13 Neutral point grounding branch

The neutral-point grounding branch used in some VSC substations has no direct equivalent in an LCC HVDC substation. It is used in some symmetrical monopole VSC systems to provide a ground reference on the valve side of the interface transformer. It typically consists of a three-phase shunt reactor of relatively high impedance. Its losses may be calculated in a similar way to the method given for shunt reactors in 5.5 of IEC 61803:1999 and IEC 61803:1999/AMD1:2010.

A.2.14 D.C. reactor

Power losses in the d.c. reactor, where fitted, may be calculated in a similar way to the method given in 5.6 of IEC 61803:1999 and IEC 61803:1999/AMD1:2010, but noting the possible need to extend the range of harmonic orders considered.

However, it should be noted that the d.c. reactor in a VSC substation is usually somewhat smaller than its counterpart in an LCC substation and is usually air-cored in construction.

A.2.15 ~~Common mode blocking reactor~~

~~The common mode blocking reactor used in some VSC substations has no direct equivalent in an LCC HVDC substation. It is used in some VSC systems to introduce a low inductance for differential mode currents but high inductance for common mode currents caused, for example, by certain faults. It resembles a pair of d.c. reactors in a common structure so that there is a large mutual coupling between the two.~~

~~The losses in the common mode blocking reactor may be calculated using the general principles outlined for the d.c. reactor (A.2.16 below). For determination of losses, measurements should be based as far as possible on measurements taken with the currents in the two windings flowing in the normal (differential) mode rather than in common mode.~~

A.2.16 D.C. side high frequency filter

Losses in the d.c. side high frequency filter, where fitted, may be calculated by a similar process to the calculation of losses in the d.c. series filters of an LCC HVDC substation, as described in 5.9 of IEC 61803:1999, IEC 61803:1999/AMD1:2010 and

IEC 61803:1999/AMD2:2016, but noting the possible need to extend the range of harmonic orders considered.

A.2.17 D.C. cable or overhead transmission line

Power losses in the d.c. cable or overhead transmission line are out of the scope of this standard.

A.3 Auxiliaries and station service losses

Power losses in auxiliary and station service equipment may be calculated by the same process to the calculation of losses in the auxiliary and station service equipment of an LCC HVDC substation, as described in 5.8 of IEC 61803:1999 and IEC 61803:1999/AMD1:2010. There are no significant differences between the VSC and LCC technologies in this respect.

Bibliography

IEC 60747-1, *Semiconductor devices – Part 1: General*

IEC 61803:1999, *Determination of power losses in high-voltage direct current (HVDC) converter stations*

IEC 61803:1999/AMD1:2010

IEC 61803:1999/AMD2:2016

IEC TR 62543, *High-voltage direct current (HVDC) power transmission using voltage sourced converters (VSC)*

VSC Transmission, CIGRÉ Technical Brochure No. 269

Component Testing of VSC System for HVDC Applications, CIGRÉ Technical Brochure No. 447

Voltage Source Converter (VSC) HVDC for Power Transmission – Economic Aspects and Comparison with other AC and DC Technologies, CIGRÉ Technical Brochure No. 492

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	34
1 Domaine d'application	36
2 Références normatives	36
3 Termes et définitions	37
3.1 Types de convertisseurs	37
3.2 Dispositifs à semiconducteurs	37
3.3 Etats de fonctionnement du convertisseur	38
3.4 Caractéristiques du dispositif	39
3.5 Autres définitions	39
4 Conditions générales	40
4.1 Généralités	40
4.2 Causes des pertes de puissance	41
4.3 Catégories de pertes de la valve	42
4.4 Conditions de fonctionnement	42
4.4.1 Généralités	42
4.4.2 Conditions ambiantes de référence	42
4.4.3 Conditions du système c.a. de référence	42
4.4.4 Etats de fonctionnement du convertisseur	43
4.4.5 Traitement des redondances	43
4.5 Utilisation des données mesurées réelles	43
4.5.1 Généralités	43
4.5.2 Essais individuels de série	43
4.5.3 Essais de caractérisation	44
5 Pertes de conduction	44
5.1 Généralités	44
5.2 Pertes de conduction de l'IGBT	47
5.3 Pertes de conduction de la diode	47
5.4 Autres pertes de conduction	47
6 Pertes dépendant de la tension c.c.	48
7 Pertes dans les condensateurs c.c.	48
8 Pertes de commutation	49
8.1 Généralités	49
8.2 Pertes de commutation de l'IGBT	50
8.3 Pertes de commutation de la diode	51
9 Autres pertes	52
9.1 Pertes du circuit d'amortissement	52
9.2 Consommation de puissance de l'électronique de valve	53
10 Pertes totales de la valve par poste de convertisseur	53
Annexe A (informative) Détermination des pertes de puissance dans d'autres équipements du poste CCHT	56
A.1 Généralités	56
A.2 Lignes directrices pour le calcul des pertes dans chaque équipement	56
A.2.1 Disjoncteur	56
A.2.2 Résistance de pré-insertion	56
A.2.3 Filtre d'harmonique côté réseau	57

A.2.4	Filtre haute fréquence côté réseau	57
A.2.5	Transformateur d'interface.....	58
A.2.6	Filtre d'harmonique côté convertisseur	58
A.2.7	Filtre haute fréquence côté convertisseur	58
A.2.8	Inductance de phase	58
A.2.9	Unité VSC.....	58
A.2.10	Condensateur c.c. à VSC.....	58
A.2.11	Filtre d'harmonique c.c.	59
A.2.12	Système à freinage dynamique.....	59
A.2.13	Branche de mise à la terre du point neutre	59
A.2.14	Inductance c.c.	59
A.2.15	Inductance de blocage en mode commun	60
A.2.16	Filtre haute fréquence côté c.c.....	60
A.2.17	Câble c.c. ou ligne de transport aérienne.....	60
A.3	Pertes des équipements auxiliaires et du poste en service.....	60
	Bibliographie.....	61
	Figure 1 – Tension à l'état passant d'un IGBT ou d'une diode.....	45
	Figure 2 – Représentation linéaire segmentée de la tension à l'état passant de l'IGBT ou de la diode	46
	Figure 3 – Energie de commutation de l'IGBT en fonction du courant du collecteur.....	50
	Figure 4 – Energie de rétablissement de la diode en fonction du courant.....	52
	Figure A.1 – Principaux composants susceptibles de composer un poste à VSC.....	57
	Tableau 1 – Matrice indiquant la relation des données nécessaires au calcul des pertes et le type de pertes de la valve (1 sur 2)	54

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**PERTES DE PUISSANCE DANS LES VALVES
À CONVERTISSEUR DE SOURCE DE TENSION (VSC)
DES SYSTEMES EN COURANT CONTINU À HAUTE TENSION (CCHT)****Partie 1: Exigences générales****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 62751-1 porte le numéro d'édition 1.1. Elle comprend la première édition (2014-08) [documents 22F/302/CDV et 22F/321A/RVC] et son amendement 1 (2018-04) [documents 22F/439A/CDV et 22F/458A/RVC]. 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 62751-1 a été établie par le sous-comité 22F: Electronique de puissance pour les réseaux électriques de transport et de distribution, du comité d'études 22 de l'IEC: Systèmes et équipements électroniques de puissance.

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

Une liste de toutes les parties de la série IEC 62751, publiées sous le titre général *Pertes de puissance dans les valves à convertisseur de source de tension (VSC) des systèmes en courant continu à haute tension (CCHT)*, 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.

PERTES DE PUISSANCE DANS LES VALVES À CONVERTISSEUR DE SOURCE DE TENSION (VSC) DES SYSTEMES EN COURANT CONTINU À HAUTE TENSION (CCHT)

Partie 1: Exigences générales

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 62751 définit les principes généraux de calcul des pertes de puissance dans les valves à convertisseur de source de tension (VSC¹) pour des applications en courant continu à haute tension (CCHT), quelle que soit la topologie du convertisseur. Les Articles 6 et 8 et les paragraphes 9.1, 9.2 et A.2.12 de la norme peuvent également être utilisés pour calculer les pertes de puissance dans les valves à freinage dynamique (le cas échéant) et comme guide pour le calcul des pertes de puissance des valves d'une installation STATCOM.

Les pertes de puissance dans d'autres parties de l'équipement du poste CCHT, outre les valves à convertisseur, sont exclues du domaine d'application de la présente norme. Dans la plupart des équipements d'un poste à VSC, les pertes de puissance peuvent être calculées à l'aide des mêmes procédures que celles indiquées pour les systèmes CCHT munis de convertisseurs commutés par le réseau (CCR) de l'IEC 61803. L'Annexe A présente les principales différences entre les postes CCHT à CCR et à VSC, pour autant qu'elles influencent la méthode de détermination des pertes de puissance d'autres équipements.

La présente norme ne s'applique pas aux valves à convertisseur des systèmes CCHT munis de convertisseurs commutés par le réseau.

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 60633, *Terminologie pour le transport d'énergie en courant continu à haute tension (CCHT)*

IEC 60747-2, *Dispositifs à semiconducteurs – Dispositifs discrets et circuits intégrés – Partie 2: Diodes de redressement*

IEC 60747-9:2007, *Dispositifs à semiconducteurs – Dispositifs discrets – Partie 9: Transistors bipolaires à grille isolée (IGBT)*

IEC 62747:2014, *Terminologie relative aux convertisseurs de source de tension (VSC) des systèmes en courant continu à haute tension (CCHT)*

Guide ISO/IEC 98-3, *Incertitude de mesure – Partie 3: Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM:1995)*

¹ Voltage sourced converter en anglais.

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions de l'IEC 60633, IEC 62747, IEC 60747-2, IEC 60747-9 ainsi que les suivants s'appliquent.

NOTE 1 D'autres termes et définitions associés peuvent aussi être trouvés dans l'IEC TR 62543, IEC 62751-2 et dans les autres parties correspondantes de l'IEC 60747.

NOTE 2 Tout au long de la présente norme, le terme «transistor bipolaire à grille isolée (IGBT)» est utilisé pour indiquer un dispositif à semiconducteurs blocable; toutefois, la norme s'applique également aux autres types de dispositifs à semiconducteurs blocables tels que GTO, IGCT, ETO, IEGT, etc.

3.1 Types de convertisseurs

3.1.1

convertisseur à deux niveaux

convertisseur dans lequel la tension entre les bornes c.a. de l'unité VSC et le point médian de l'unité VSC est commutée entre deux niveaux de tension c.c. discrets

Note 1 à l'article: Le point médian de l'unité VSC est défini en 3.5.9.

3.1.2

convertisseur multi-niveaux

convertisseur dans lequel la tension entre les bornes c.a. de l'unité VSC et le point médian de l'unité VSC est commutée entre plus de trois niveaux de tension c.c. discrets

Note 1 à l'article: Le point médian de l'unité VSC est défini en 3.5.9.

3.1.3

convertisseur multi-niveaux modulaire MMC

convertisseur multi-niveaux dans lequel chaque valve à VSC est composée d'un certain nombre de blocs modules MMC connectés en série

Note 1 à l'article: Le bloc module MMC est défini en 3.5.4.

Note 2 à l'article: L'abréviation «MMC» est dérivée du terme anglais développé correspondant "modular multi-level converter".

3.1.4

convertisseur à deux niveaux monté en cascade CTL

convertisseur multi-niveaux modulaire dans lequel chaque position de commutation est composée de plusieurs paires IGBT-diode connectées en série

Note 1 à l'article: La paire IGBT-diode est définie en 3.2.4.

Note 2 à l'article: L'abréviation «CTL» est dérivée du terme anglais développé correspondant "cascaded two-level converter".

3.2 Dispositifs à semiconducteurs

3.2.1

dispositif à semiconducteurs blocable

dispositif à semiconducteurs commandable qui peut être réactivé et coupé par un signal de commande (IGBT, par exemple)

3.2.2

transistor bipolaire à grille isolée IGBT

dispositif à semiconducteurs blocable possédant trois bornes: une borne de grille (G) et deux bornes de charge: émetteur (E) et collecteur (C)

Note 1 à l'article: En appliquant la grille appropriée aux tensions de l'émetteur, le courant dans une direction peut être commandé, c'est-à-dire être coupé ou réactivé.

Note 2 à l'article: L'abréviation "IGBT" est dérivée du terme anglais développé correspondant "insulated gate bipolar transistor".

3.2.3

diode de roue libre

FWD

dispositif à semiconducteurs de puissance ayant les caractéristiques d'une diode

Note 1 à l'article: Une FWD possède deux bornes: une anode (A) et une cathode (K). Le courant dans les FWD circule en sens opposé au courant de l'IGBT. Les FWD sont caractérisées par leur capacité à faire face à des chutes brutales de courant dues au comportement de commutation de l'IGBT.

Note 2 à l'article: L'abréviation «FWD» est dérivée du terme anglais développé correspondant «free-wheeling diode».

3.2.4

paire IGBT-diode

combinaison de l'IGBT et de la FWD connectés en parallèle en sens inverse

Note 1 à l'article: Une paire IGBT-diode est généralement assemblée dans un boîtier commun. Toutefois, elle peut inclure des boîtiers d'IGBT et/ou de diodes individuels connectés en parallèle.

3.3 Etats de fonctionnement du convertisseur

3.3.1

état de fonctionnement à vide

condition dans laquelle le poste à VSC est sous tension, mais les IGBT sont bloqués, et où toutes les charges de service et tous les équipements auxiliaires du poste sont connectés

3.3.2

état de fonctionnement en veille

condition dans laquelle le poste à VSC est sous tension et les IGBT sont débloqués mais ne disposent pas d'une sortie de puissance active ou réactive à l'endroit de la connexion commune au réseau c.a.

Note 1 à l'article: Les conditions de "fonctionnement en veille" et «à vide» sont similaires, mais du point de vue de l'état à vide plusieurs secondes peuvent être nécessaires avant la transmission de la puissance, alors que du point de vue du fonctionnement en veille, la transmission de la puissance peut commencer presque immédiatement (moins de 3 cycles de fréquence industrielle).

Note 2 à l'article: A l'état de fonctionnement en veille, le convertisseur est en mesure de contrôler activement la tension c.c., contrairement à l'état à vide, dans lequel le convertisseur est essentiellement "passif".

Note 3 à l'article: A l'état à vide, les pertes sont en général légèrement inférieures à celles de l'état de fonctionnement en veille. Ce mode de fonctionnement est donc préférable lorsque la disposition du système à VSC le permet.

3.3.3

état de fonctionnement

condition dans laquelle le poste à VSC est alimenté et où les convertisseurs sont débloqués

Note 1 à l'article: A l'inverse du convertisseur commuté par le réseau, le convertisseur de source de tension (VSC) peut fonctionner avec une sortie de puissance active/réactive nulle.

3.3.4

pertes de puissance à vide

pertes de puissance dans la valve à VSC à l'état à vide

Note 1 à l'article: Dans certaines conceptions de convertisseur, il peut s'avérer nécessaire de réaliser des opérations occasionnelles de commutation afin d'équilibrer les tensions entre les différentes parties du convertisseur. Dans ce type de convertisseur, le calcul des pertes à vide doit tenir compte de la fréquence de commutation de ce type de mode de fonctionnement.

3.3.5

pertes en fonctionnement en veille

pertes dans la valve à VSC à l'état de fonctionnement en veille

3.3.6

pertes en fonctionnement

pertes dans la valve à VSC à l'état de fonctionnement

3.4 Caractéristiques du dispositif

3.4.1

tension de saturation collecteur-émetteur IGBT

$V_{CE(sat)}$

tension collecteur-émetteur dans les conditions de tension grille-émetteur à laquelle le courant du collecteur est essentiellement indépendant de la tension grille-émetteur

3.4.2

énergie d'activation IGBT

E_{on}

énergie dissipée à l'intérieur de l'IGBT lors de l'activation d'une seule impulsion de courant du collecteur

3.4.3

énergie de désactivation IGBT

E_{off}

énergie dissipée à l'intérieur de l'IGBT lors de la procédure de désactivation d'une seule impulsion de courant du collecteur

3.4.4

tension directe de la diode

V_F

tension entre les bornes d'une diode, résultant du débit de courant vers l'avant

3.4.5

énergie de rétablissement inverse de la diode

E_{rec}

énergie dissipée à l'intérieur de la diode lors de la procédure de désactivation

3.5 Autres définitions

3.5.1

niveau de valve à VSC

plus petite unité fonctionnelle indivisible d'une valve à VSC

Note 1 à l'article: Pour toute valve à VSC dans laquelle les IGBT sont connectés en série et manœuvrés simultanément, un niveau de valve à VSC correspond à une paire IGBT-diode, y compris ses auxiliaires. Pour une valve de type MMC, un niveau de valve correspond à un sous-module associé à ses auxiliaires.

3.5.2

niveaux redondants

nombre maximal de niveaux de valve à VSC ou de niveaux de valve à diode connectés en série dans une valve, qui peut supporter un court-circuit externe ou interne au cours de l'utilisation sans que le fonctionnement sécurisé de la valve n'en soit altéré, comme il est démontré par les essais de type, et qui, en cas de dépassement, nécessite l'arrêt de la valve pour permettre le remplacement des niveaux défaillants ou l'acceptation d'un risque accru de dysfonctionnements

Note 1 à l'article: Dans les conceptions de valve telles que le convertisseur à deux niveaux monté en cascade, qui contiennent deux chemins de conduction ou plus dans chaque cellule et comportent des niveaux de valve à VSC connectés en série dans chaque chemin, les niveaux redondants doivent être comptés uniquement dans un chemin de conduction de chaque cellule.

3.5.3

électronique de valve

circuits électroniques au(x) potentiel(s) de la (des) valve(s) qui remplissent des fonctions de commande et de protection d'un ou de plusieurs niveaux de valve

3.5.4

bloc module MMC

source de tension indépendante commandable à deux bornes, dotée de condensateur(s) c.c. et d'auxiliaires immédiats, faisant partie d'un MMC

3.5.5

position de commutation

fonction d'un semiconducteur qui se comporte comme un seul commutateur indivisible

Note 1 à l'article: Une position de commutation peut être composée d'une seule paire IGBT-diode ou, dans le cas du convertisseur à deux niveaux monté en cascade, d'une connexion en série de plusieurs paires IGBT-diode.

3.5.6

sous-module

bloc module MMC dans lequel chaque position de commutation est composée d'une seule cellule de paire IGBT-diode

3.5.7

cellule

bloc module MMC dans lequel chaque position de commutation est composée de plusieurs paires IGBT-diode connectées en série

3.5.8

unité VSC

trois unités de phase VSC, associées à un équipement de commande de l'unité VSC, des dispositifs essentiels de protection et de commutation, des condensateurs de stockage c.c., des bobines d'inductance de phase et des auxiliaires, le cas échéant, utilisés pour la conversion

3.5.9

point médian de l'unité VSC

point d'une unité VSC dont le potentiel électrique est égal à la moyenne des potentiels des bornes c.c. positives et négatives de l'unité VSC

Note 1 à l'article: Dans certaines applications, le point médian d'unité VSC peut exister uniquement en tant que point virtuel, lequel ne correspond pas au nœud physique dans le circuit.

4 Conditions générales

4.1 Généralités

Il est nécessaire que les fournisseurs connaissent en détails comment et où sont générées les pertes, cela affectant les caractéristiques assignées du composant et de l'équipement. Les clients ont intérêt à disposer de chiffres de perte vérifiables permettant une comparaison équitable des offres et, dans le cadre d'une procédure après livraison, permettant de vérifier objectivement les exigences de performances garanties du fournisseur.

L'incertitude globale de la valeur des pertes constitue un paramètre important pour un convertisseur et pour un poste de conversion, étant donné que la valeur des pertes est utilisée pour comparer le coût d'investissement au coût capitalisé sur la durée de vie des postes de conversion. Pour s'assurer que les prévisions sont indiscutables, l'adhésion aux dispositions de la présente norme et aux dispositions du Guide ISO/IEC 98-3 sont indispensables. Toutes les mesures doivent, de plus, être traçables par rapport aux normes nationales et/ou internationales de mesure.

En principe, il est souhaitable de déterminer l'efficacité d'un poste de conversion CCHT en mesurant directement ses pertes d'énergie. Toutefois, il convient que les tentatives de détermination des pertes du poste, obtenue en soustrayant la puissance de sortie mesurée de la puissance d'entrée mesurée, permettent de reconnaître que ces mesures se caractérisent par une inexactitude inhérente, plus particulièrement si elles sont réalisées à haute tension. Les pertes d'un poste de conversion CCHT à pleine charge sont en général de l'ordre de 1 % de la puissance transmise. Il y a donc peu de chances que la perte mesurée comme étant une petite différence entre deux grandeurs élevées représente une indication de précision suffisante des pertes réelles.

Dans certains cas particuliers, il peut être possible, par exemple, de prévoir une connexion d'essai provisoire dans laquelle deux convertisseurs fonctionnent à partir de la même source c.a. et sont également connectés entre eux par l'intermédiaire de leurs bornes c.c. Dans cette connexion, la puissance délivrée à partir de la source c.a. équivaut aux pertes dans le circuit. Toutefois, la source c.a. fournit également un support de puissance réactive (var) et une tension de commutation aux deux convertisseurs. Une fois encore, la mesure présente des difficultés pratiques. Pour éviter les problèmes décrits ci-dessus, la présente norme présente une méthode normalisée de calcul des pertes du poste de conversion CCHT en faisant la somme des pertes calculées pour chaque élément de l'équipement. La méthode de calcul normalisée permet au client de comparer valablement les offres concurrentes. Elle permet également de générer aisément les courbes de performances pour une large plage de conditions de fonctionnement dont il est nécessaire de connaître les performances. En l'absence de méthode expérimentale bon marché pouvant être utilisée dans le cadre d'une vérification objective des pertes pendant les essais de type, la méthode de calcul est la meilleure alternative puisqu'elle utilise, dans la mesure du possible, les données expérimentales obtenues suite à des mesures réalisées sur un équipement individuel et des composants dans des conditions équivalentes à celles rencontrées en fonctionnement réel.

De ce fait, dans la plupart des cas, les pertes sont évaluées à partir des caractéristiques des composants, à l'aide de modèles mathématiques appropriés des convertisseurs. Il est toutefois important que toutes ces estimations reposent sur des mesures réelles dont l'incertitude est suffisamment faible. Il convient également de veiller à représenter la propagation des incertitudes des mesures et leur mode d'interaction avec le modèle. Il convient de prendre également en considération les estimations des contributions à l'incertitude liées aux imperfections des modèles eux-mêmes.

Il est important de noter que la perte de puissance de chaque élément d'équipement dépend des conditions ambiantes dans lesquelles il fonctionne, ainsi que des conditions de fonctionnement ou des cycles de service dont il fait l'objet. Par conséquent, les conditions ambiantes et les conditions de fonctionnement doivent être définies pour chaque élément, en fonction de celles de l'ensemble du poste de conversion CCHT.

4.2 Causes des pertes de puissance

Selon la topologie du convertisseur, une valve à VSC peut soit faire office de commutateur commandable ou de source de tension commandable.

Pour le convertisseur de type source de tension commandable, la valve à VSC est un assemblage complet de sources de tension commandable, en général connectée entre une borne c.a. et une borne c.c.

Pour le convertisseur de type commutateur, la valve à VSC est une disposition de paires IGBT-diode connectées en série et disposées de manière à être commutées simultanément comme une seule unité fonctionnelle.

La plupart des pertes de puissance des valves à VSC ont lieu dans les IGBT et les diodes. Dans chaque cas, deux mécanismes sont concernés :

- pertes de conduction;

- pertes de commutation.

De plus, de petites pertes peuvent apparaître dans les condensateurs de sous-module ou de cellule c.c., le diviseur de tension continue et les circuits d'amortissement, l'électronique de la valve etc.

La technologie de la transmission VSC se développant rapidement avec plusieurs topologies VSC assez différentes, une procédure détaillée de calcul des pertes de puissance n'a pas encore été élaborée pour toutes les topologies de convertisseur possibles. Il en résulte que le fabricant de l'équipement VSC doit présenter un rapport détaillé concernant le calcul des pertes de la valve à VSC, en expliquant la méthode utilisée et en justifiant toutes les hypothèses retenues. La présente norme donne les principes généraux à suivre pour le calcul des pertes de la valve et donne les lignes directrices pour la préparation et l'interprétation de ce type de rapport.

Compte tenu de l'exactitude des systèmes de mesure c.c. (plus particulièrement en raison de la faible exactitude de mesure de la tension c.c.), la démarche de la norme s'appuie sur des calculs reposant sur la réalisation d'essais individuels de série des dispositifs (fiche technique) avec certaines mesures de caractérisation.

4.3 Catégories de pertes de la valve

Les différents composants des pertes de la valve sont subdivisés en termes désignés P_{V1} à P_{V9} :

- P_{V1} : pertes de conduction de l'IGBT
- P_{V2} : pertes de conduction de la diode
- P_{V3} : autres pertes de conduction de la valve
- P_{V4} : pertes dépendant de la tension c.c.
- P_{V5} : pertes dans les condensateurs c.c. de la valve
- P_{V6} : pertes de commutation de l'IGBT
- P_{V7} : pertes de désactivation de la diode
- P_{V8} : pertes du circuit d'amortissement
- P_{V9} : consommation de puissance de l'électronique de valve

4.4 Conditions de fonctionnement

4.4.1 Généralités

Les clients des systèmes CCHT peuvent spécifier leurs propres conditions de référence normalisées en matière de pression atmosphérique, de température ambiante, d'humidité, de température de l'agent de refroidissement, de niveau de transmission de la puissance etc., pour lesquelles les pertes de puissance doivent être déterminées. Si le client ne précise pas ces conditions de référence, les pertes doivent être déterminées dans les conditions par défaut ci-dessous.

4.4.2 Conditions ambiantes de référence

Les conditions ambiantes de référence par défaut suivantes sont appliquées:

- température ambiante sèche = 20 °C
- température ambiante humide = 14 °C
- pression atmosphérique = 101,3 kPa.

4.4.3 Conditions du système c.a. de référence

Les conditions du système c.a. de référence par défaut suivantes sont appliquées:

- fréquence nominale du système c.a.
- tension nominale du réseau c.a.
- conditions c.a. équilibrées (c'est-à-dire pas de séquence de phase négative).

4.4.4 Etats de fonctionnement du convertisseur

Les pertes de la valve à VSC doivent au moins être déterminées pour les états de fonctionnement suivants:

- fonctionnement à vide;
- fonctionnement en veille;
- fonctionnement avec une puissance assignée de 100 % dans toutes les directions pertinentes de la transmission de puissance, avec un échange de puissance réactive nette nulle avec le système c.a., et avec la tension c.c. à la valeur par rapport à la puissance transmise.

Dans certains systèmes à VSC, le transformateur d'interface comprend un changeur de prise, dont l'objet est de régler la tension c.a. côté valve, en régime permanent, à une valeur permettant d'optimiser les pertes de puissance. La position de la prise a un impact important sur les pertes de puissance du transformateur et du convertisseur. Il convient donc de la représenter correctement dans tous les calculs. La position de la prise du changeur de prise du transformateur (le cas échéant) est importante pour la détermination des pertes. Les calculs des pertes doivent tenir compte de la position de la prise correspondant au point de fonctionnement auquel les pertes doivent être déterminées et des stratégies de commande et de protection utilisées pour le système à VSC, y compris, par exemple, les exigences d'alimentation sans panne. Le fabricant est chargé de définir et de justifier la position de la prise pour le calcul des pertes.

4.4.5 Traitement des redondances

Pour calculer les pertes de la valve, tous les niveaux VSC redondants doivent être supposés en fonctionnement.

NOTE Cette approche donne les pertes totales les plus élevées dans la valve, même si elle ne donne pas les pertes les plus élevées par niveau de valve à VSC, ce qui est le cas lorsque les niveaux redondants sont court-circuités.

4.5 Utilisation des données mesurées réelles

4.5.1 Généralités

Les caractéristiques des IGBT et des diodes utilisés dans la valve doivent être déterminées par une combinaison d'essais individuels de série, réalisés dans des conditions normalisées sur 100 % de la production, et d'essais de caractérisation plus exhaustifs réalisés sur des échantillons plus petits et dans des conditions plus représentatives de celles rencontrées dans les valves à convertisseur réelles.

Les essais individuels de série doivent permettre de déduire une moyenne de population de tous les IGBT et de toutes les diodes fournis pour le projet, mais dans des conditions de fonctionnement normalisées qui peuvent ne pas être nécessairement applicables au projet (température de jonction, par exemple). Les essais de caractérisation doivent alors permettre de déduire les facteurs de correction applicables aux conditions de fonctionnement exactes du projet.

4.5.2 Essais individuels de série

Les essais suivants doivent au moins être réalisés conformément aux Publications de l'IEC par le fabricant du dispositif sur tous les IGBT (IEC 60747-9) et diodes (IEC 60747-2) utilisés pour la valve:

- tension à l'état passant $V_{CE(sat)}$ de l'IGBT et tension directe V_F de la diode à une valeur type de courant et de température;
- énergie d'activation E_{on} de l'IGBT et énergie de désactivation E_{off} à une condition de commutation type;
- énergie de rétablissement E_{rec} de la diode à une condition de commutation type.

Ces données doivent être utilisées pour calculer les propriétés moyennes du dispositif pour le calcul des pertes de l'ensemble du convertisseur.

Les conditions de réalisation des essais individuels de série peuvent ne pas être totalement représentatives de celles rencontrées dans la valve à VSC quant à la température, à l'inductance parasite, au comportement de la commande de grille, etc.

4.5.3 Essais de caractérisation

4.5.3.1 Essais de caractérisation des dispositifs à semiconducteurs

Au moins 10 dispositifs issus d'au moins 2 lots de production différents doivent faire l'objet d'un programme plus exhaustif d'essais de caractérisation. Il s'agit d'adapter les données d'essai individuel de série obtenues en 4.4.1 ci-dessus aux conditions de fonctionnement correctes de la valve à VSC. Les conditions suivantes doivent être reproduites de manière adéquate.

Les valeurs fixes d'une conception donnée de valve à VSC sont les suivantes:

- inductance parasite de la boucle de commutation;
- autres dispositifs à semiconducteurs affectés par le processus de commutation;
- caractéristiques de la commande de grille;
- circuits d'amortissement (le cas échéant).

Les variables de fonctionnement sont les suivantes:

- tension de condensateur c.c. ou de condensateur de sous-module c.c., échelonnée en fonction d'un niveau VSC;
- courant de dispositif (dans la plage comprise entre la veille et le fonctionnement à pleine puissance en mode redresseur ou onduleur);
- température de jonction (dans la plage comprise entre la veille et le fonctionnement à pleine puissance en mode redresseur ou onduleur).

Les essais de caractérisation doivent être réalisés conformément à l'IEC 60747-2 et à l'IEC 60747-9.

4.5.3.2 Essais de caractérisation d'autres composants

Les essais de caractérisation des composants sont les suivants:

- essai R_{ESR} ;
- essais d'activation et de désactivation du circuit d'amortissement.

5 Pertes de conduction

5.1 Généralités

Lorsqu'un IGBT ou une diode est à l'état conducteur, il/elle génère une légère tension à l'état passant de quelques volts. Cette tension à l'état passant, lorsqu'elle est multipliée par le courant qui traverse le dispositif, donne lieu à des "pertes de conduction". La tension à l'état passant est appelée V_F dans les diodes et $V_{CE(sat)}$ dans les IGBT.

La tension à l'état passant dépend du courant de manière non linéaire et, ~~dans une moindre mesure,~~ de la "température de jonction" du dispositif (voir Figure 1).

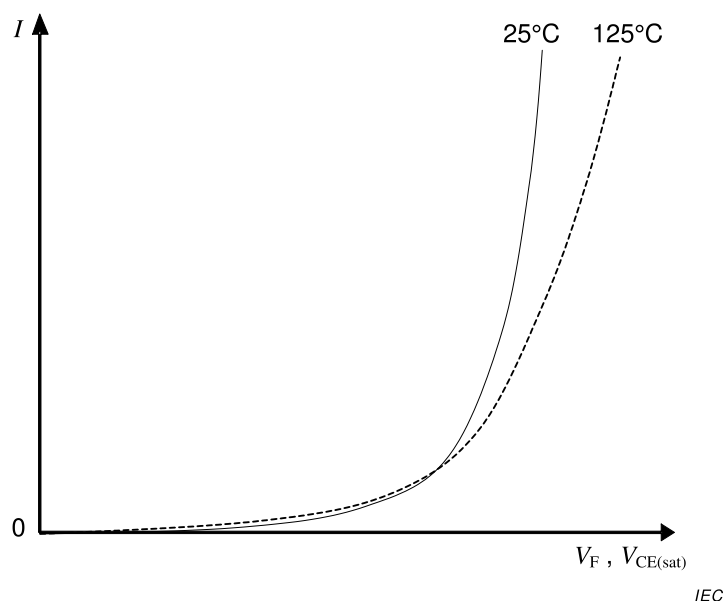


Figure 1 – Tension à l'état passant d'un IGBT ou d'une diode

NOTE 1 La tension à l'état passant V_{CE} d'un IGBT dépend également de la tension grille-émetteur V_{GE} . Pour les valeurs basses de V_{GE} , l'augmentation de V_{GE} diminue la valeur de V_{CE} . Toutefois, au-dessus d'une certaine valeur de V_{GE} , V_{CE} diminue légèrement et l'IGBT est dit "saturé". Dans le cas présent, V_{GE} est supposée suffisamment élevée pour garantir la totale saturation de l'IGBT. Par conséquent, $V_{CE(sat)}$ (la valeur saturée de V_{CE}) peut être utilisée pour le calcul des pertes.

NOTE 2 Sur certains types de dispositifs à semiconducteurs, le courant «de transition» peut être très faible, si bien que pour la plupart des valeurs pratiques de courant, la tension à l'état passant augmente toujours avec la température.

Le calcul des pertes de puissance implique de représenter la tension à l'état passant sous forme mathématique, de manière à pouvoir évaluer les pertes de conduction moyennes au cours d'un cycle complet de la façon suivante:

$$P_{\text{cond}_T} = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} I_T(\omega t) \cdot V_{CE(sat)}(I_T) \cdot d(\omega t) \quad (1)$$

pour un IGBT, ou

$$P_{\text{cond}_D} = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} I_D(\omega t) \cdot V_F(I_D) \cdot d(\omega t) \quad (2)$$

pour une diode.

Les pertes de conduction des semiconducteurs d'une valve complète sont ensuite déterminées en faisant la somme des pertes de conduction calculées de la manière ci-dessus pour chaque IGBT et chaque diode de la valve.

Pour simplifier ce processus, la tension à l'état passant illustrée à la Figure 1 est en général représentée sous la forme d'une approximation linéaire segmentée, avec une tension de seuil V_0 et une résistance de pente R_0 (voir Figure 2).

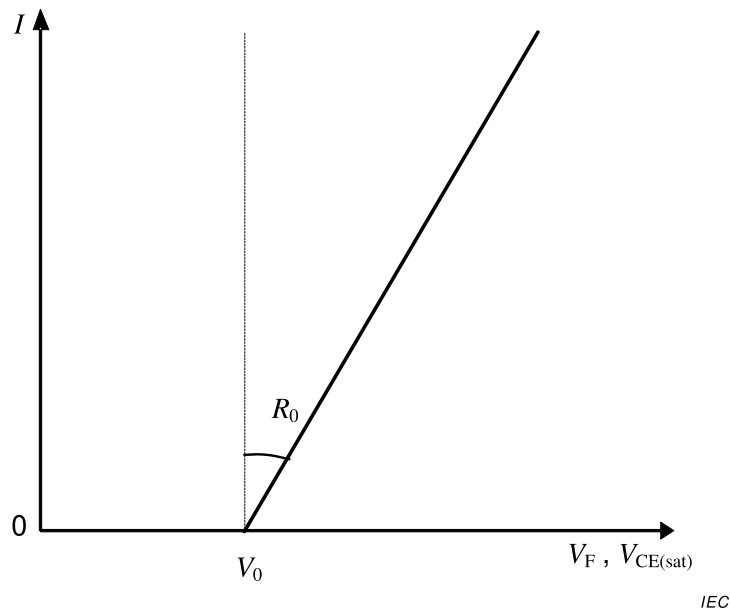


Figure 2 – Représentation linéaire segmentée de la tension à l'état passant de l'IGBT ou de la diode

Suite à cette approximation, les pertes de conduction de chaque dispositif à semiconducteurs sont déterminées à l'aide des courants moyens et efficaces qui traversent le dispositif:

$$P_{\text{cond}} = V_0 \cdot I_{\text{av}} + R_0 \cdot I_{\text{rms}}^2 \tag{3}$$

où

V_0, R_0 sont la tension de seuil et la résistance de pente du dispositif;

I_{av} est le courant moyen dans le dispositif, moyenné sur un cycle de fréquence industrielle.

$$I_{\text{av}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} I(\omega t) \cdot d(\omega t) \tag{4}$$

I_{rms} est le courant efficace dans le dispositif, moyenné sur un cycle de fréquence industrielle.

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} I(\omega t)^2 \cdot d(\omega t)} \tag{5}$$

En général, le mode redresseur donne des pertes de conduction de diode plus importantes, le fonctionnement en mode onduleur donnant des pertes de conduction de l'IGBT plus élevées.

Il est possible d'obtenir une plus grande précision à l'aide d'un modèle plus exact de la tension à l'état passant du dispositif (comme dans la Figure 1) plutôt que d'une approximation linéaire segmentée, puis en procédant à une intégration numérique directe. Toutefois, l'approximation linéaire segmentée est préférable car elle simplifie le processus de calcul, assure une plus grande transparence et permet toujours d'obtenir une plus grande précision, à condition que les mesures utilisées pour la déduire soient réalisées à des valeurs appropriées de courant. Par conséquent, il est recommandé de déterminer V_0 et R_0 en mesurant la tension à l'état passant à 100 % et 33 % du courant assigné du dispositif et en procédant à une extrapolation linéaire.

5.2 Pertes de conduction de l'IGBT

Dans le convertisseur à 2 niveaux, tous les IGBT utilisent le même courant. Par conséquent, les pertes totales de conduction de l'IGBT par valve peuvent être calculées en multipliant la perte de conduction par IGBT par le nombre de niveaux VSC par valve:

$$P_{V1} = N_t \cdot [V_{0T} \cdot I_{Tav} + R_{0T} \cdot I_{Trms}^2] \quad (6)$$

où

N_t est le nombre de niveaux de valve à VSC par valve;

V_{0T} est la tension de seuil de l'IGBT;

R_{0T} est la résistance de pente de l'IGBT;

I_{Tav} est le courant moyen dans l'IGBT;

I_{Trms} est le courant efficace dans l'IGBT.

Les pertes de conduction de l'IGBT dans les convertisseurs multi-niveaux peuvent être évaluées par des principes analogues à ceux présentés ci-dessus pour les convertisseurs à 2 niveaux. Toutefois, la procédure est plus complexe, tous les IGBT d'une même unité de phase n'utilisant pas le même courant.

En général, il est nécessaire de calculer les courants moyen et efficace séparément pour chaque cycle de fonctionnement de l'IGBT, et de multiplier les résultats par le nombre de ces dispositifs dans chaque valve.

5.3 Pertes de conduction de la diode

Dans le convertisseur à 2 niveaux, toutes les diodes utilisent le même courant. Par conséquent, les pertes totales de conduction de la diode par valve peuvent être calculées en multipliant la perte de conduction par diode par le nombre de niveaux VSC par valve:

$$P_{V2} = N_t \cdot [V_{0D} \cdot I_{Dav} + R_{0D} \cdot I_{Drms}^2] \quad (7)$$

où

V_{0D} est la tension de seuil de la diode;

R_{0D} est la résistance de pente de la diode;

I_{Dav} est le courant moyen dans la diode;

I_{Drms} est le courant efficace dans la diode.

Les pertes de la diode dans les convertisseurs multi-niveaux peuvent être calculées par des principes analogues mais, comme indiqué pour les pertes de l'IGBT dans le paragraphe précédent, la procédure est plus complexe, et il est nécessaire de calculer les pertes séparément pour chaque cycle de fonctionnement de la diode.

5.4 Autres pertes de conduction

Les pertes de conduction dans les composants autres que les semiconducteurs et le condensateur de sous-module c.c. (les barres omnibus, par exemple) sont en général limitées. Toutefois, elles peuvent ne pas être négligeables et il convient de les inclure dans le calcul des pertes de la valve. Certaines conceptions de valve requièrent une inductance en série avec chaque valve (inductance de valve), soit sous la forme d'un composant discret, soit répartie dans la valve. Les pertes dans les inductances de valve de ces valves doivent être prises en compte dans les pertes de la valve.

Le calcul de ces pertes est relativement simple et dépend uniquement de la résistance de chaque élément conducteur et du courant efficace qui le traverse.

Si le même courant circule dans tous les éléments conducteurs d'une valve, la valeur de ces pertes par valve est donnée par l'équation suivante:

$$P_{V3} = I_{\text{vrms}}^2 \cdot R_s \quad (8)$$

où

I_{vrms} est le courant efficace dans la valve;

R_s est la résistance totale de tous les éléments conducteurs de la valve, autres que les IGBT et les diodes.

Si tous les éléments conducteurs de la valve ne transportent pas le même courant, il convient d'évaluer les principes ci-dessus séparément pour chaque élément.

6 Pertes dépendant de la tension c.c.

Les pertes dépendant de la tension c.c. sont générées par les courants de fuite à l'état bloqué passant par les IGBT et les diodes, et les composants résistifs de shunt parallèlement aux IGBT et aux diodes. Les composants résistifs de shunt parallèlement aux IGBT et aux diodes peuvent inclure:

- des circuits de répartition des potentiels résistifs (circuits de répartition c.c.);
- des diviseurs de tension résistifs pour mesure de la tension;
- des conduits de refroidissement d'eau;
- des pertes résistives de shunt dans le matériau diélectrique du condensateur;
- des résistances de décharge dans les condensateurs c.c.

Ces pertes sont calculées comme suit:

$$P_{V4} = V_{\text{vrms}}^2 / R_{CC} \quad (9)$$

où

V_{vrms} est la valeur efficace de la tension entre les bornes de la valve;

R_{CC} est la résistance c.c. efficace d'une valve complète.

NOTE Les courants de fuite dans les IGBT et les diodes sont en général très faibles lorsque la valve est à l'état de fonctionnement à vide ou en veille. Toutefois, à l'état de fonctionnement, les courants de fuite peuvent être significatifs en raison des températures de jonction élevées.

7 Pertes dans les condensateurs c.c.

Certains types de valves à VSC comportent des condensateurs c.c. intégrés transportant une composante de courant notable aux fréquences d'harmonique fondamentales ou de rang inférieur. Les pertes de puissance dans les condensateurs des valves de ce type ne sont donc pas négligeables.

En règle générale, les pertes dans les condensateurs c.c. peuvent être divisées en pertes ohmiques et en pertes diélectriques.

Les pertes ohmiques représentent les pertes $I^2 \times R$ dans les composants métalliques du condensateur, notamment les câbles de métallisation de film et les câbles internes.

Les pertes diélectriques d'un condensateur sont liées à la perte énergétique du matériau diélectrique dans chaque cycle de tension. Les pertes diélectriques sont générées par le réalignement périodique des molécules dans l'élément diélectrique au fur et à mesure de la variation de la contrainte de tension pendant le cycle, et s'apparentent à des pertes d'hystérésis dans les matériaux ferromagnétiques.

Les effets des pertes ohmiques et diélectriques sont fréquemment regroupés en un seul terme appelé "résistance-série équivalente" R_{ESR} du condensateur. R_{ESR} dépend de la fréquence, et est associée à la résistance-série interne réelle, mais sans lui être totalement équivalente.

Les pertes totales de condensateur c.c. par valve sont alors calculées comme suit:

$$P_{V5} = \sum_{j=1}^{N_c} I_{\text{crms}_j}^2 \cdot R_{ESR_j} \quad (10)$$

où

N_c est le nombre de condensateurs dans la valve;

I_{crms_j} est le courant efficace qui circule dans le $j^{\text{ème}}$ condensateur c.c. de la valve;

R_{ESR_j} est la résistance-série équivalente du $j^{\text{ème}}$ condensateur c.c. de la valve.

NOTE 1 En règle générale, les pertes diélectriques sont plus significatives dans les applications c.a. pour lesquelles la polarité de tension du condensateur s'inverse deux fois par cycle. Pour les condensateurs c.c., la tension est en général non inversée, et les pertes diélectriques sont donc limitées, mais peuvent ne pas être négligeables selon la technologie de condensateur utilisée.

NOTE 2 Il peut également exister une troisième composante de perte générée par la résistance d'isolement fini du matériau diélectrique, mais elle est généralement très limitée. Elle est couverte par les pertes dépendant de la tension c.c., comme indiqué au paragraphe précédent.

NOTE 3 L'ESR (résistance-série équivalente)² est une grandeur non linéaire dépendant de la fréquence. Pour obtenir des résultats précis, il est important de déterminer l'ESR par des mesures réelles réalisées sur un condensateur du même type que celui utilisé dans la valve, dans les conditions réalistes de tension, de courant et de fréquence.

8 Pertes de commutation

8.1 Généralités

A chaque fois qu'un IGBT est activé ou désactivé ou qu'une diode est désactivée, cela induit une légère énergie de commutation de quelques Joules. Dans la plupart des topologies VSC, ces événements de commutation se produisent plusieurs fois par cycle de fréquence fondamentale. Pour les convertisseurs utilisant la modulation de largeur d'impulsion (PWM)³, en particulier, la perte de commutation qui en résulte (énergie de commutation multipliée par la fréquence de commutation) peut représenter une large proportion des pertes totales de la valve.

Etant donné que différentes topologies de convertisseur utilisent des stratégies de commutation différentes, et que le comportement de commutation dépend des méthodes de commande globales utilisées, seules des lignes directrices générales sur le calcul des pertes de commutation peuvent être données ici. Toutefois, le rapport de calcul des pertes du fabricant doit présenter une justification détaillée de la méthode utilisée.

² *Equivalent series resistance* en anglais.

³ *Pulse-width modulation* en anglais.

8.2 Pertes de commutation de l'IGBT

Lors de l'activation ou de la désactivation d'un IGBT, le dispositif est soumis simultanément à un courant élevé et à une tension élevée dans le cadre du processus de commutation. Il en résulte que l'IGBT induit une dissipation de puissance de crête élevée, dont l'intégrale de temps est connue comme étant l'énergie de commutation. Les énergies de commutation de l'IGBT sont appelées énergie d'activation E_{on} et énergie de désactivation E_{off} . Les pertes de commutation de l'IGBT E_{on} et E_{off} doivent être précisées conformément à l'IEC 60747-9:2007 (6.3.11 et 6.3.12).

Les énergies E_{on} et E_{off} dépendent de manière presque linéaire de la valeur instantanée du courant du collecteur I_C au moment de la commutation (voir Figure 3).

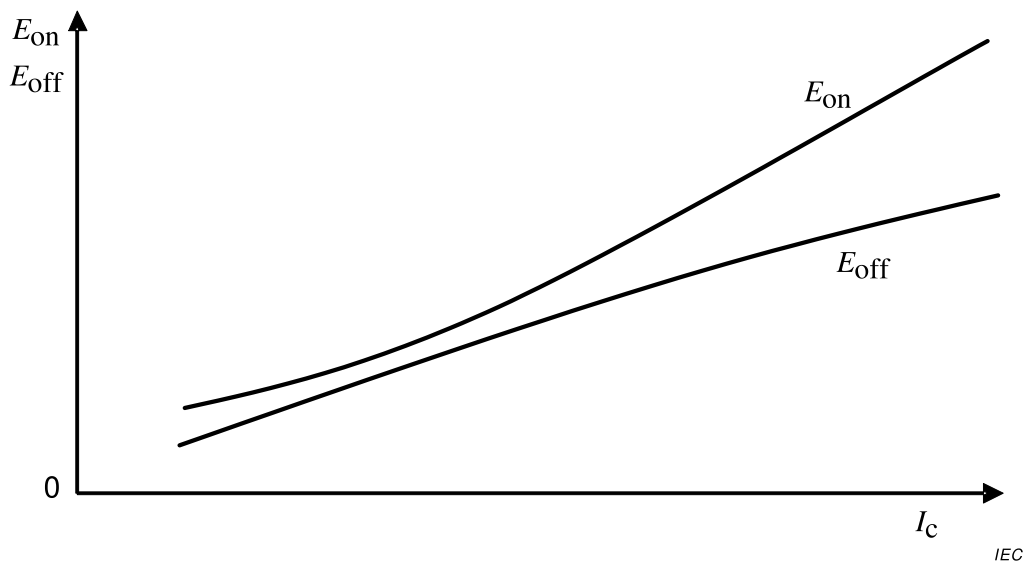


Figure 3 – Energie de commutation de l'IGBT en fonction du courant du collecteur

Les énergies E_{on} et E_{off} sont en général indiquées par le fabricant de l'IGBT comme étant fonction du courant, dans certaines conditions de fonctionnement idéalisées avec une simple conception de la commande de grille et d'une valeur fixe de résistance de grille. La valeur de la résistance de grille influence les pertes de commutation, car elle a un effet sur les temps de charge et de décharge de la capacité de grille, et donc sur la vitesse de commutation.

Par ailleurs, certaines conceptions de VSC, et plus particulièrement les valves de type "commutateur", peuvent utiliser plusieurs conceptions avancées de commande de grille qui intègrent des algorithmes de partage de tension actifs ou circuits "d'amortissement actif". Le circuit de commande de grille de l'IGBT peut également inclure un algorithme de calage de surtension actif permettant de supprimer la surtension transitoire qui apparaît dans l'IGBT après la désactivation. Ces algorithmes ajustent la vitesse de commutation de chaque IGBT afin d'éviter qu'un IGBT de la valve ne fasse l'objet d'une surtension potentiellement nuisible, mais ils peuvent en conséquence donner lieu à des pertes de commutation plus élevées que celles établies par le fabricant de l'IGBT.

Il convient que le fabricant du VSC justifie donc en détail les valeurs de E_{on} et E_{off} utilisées pour le calcul des pertes, en fonction de la conception du circuit de commande de grille, du choix de la résistance de grille (le cas échéant) et de la philosophie adoptée en matière de répartition des potentiels lorsque des IGBT connectés en série sont utilisés.

Les pertes de commutation dépendent également de la tension de liaison c.c. (par IGBT) au moment de la commutation et, dans une moindre mesure, de la température de jonction. Dans les convertisseurs à 2 et 3 niveaux, la tension de liaison c.c. moyenne par IGBT varie très

peu par rapport à la valeur de conception nominale. Toutefois, pour les convertisseurs multi-niveaux modulaires, la tension de liaison c.c. (fournie ici par le condensateur de sous-module c.c.) peut varier considérablement d'un moment de commutation à l'autre. Par conséquent, il convient d'évaluer les pertes de commutation de l'IGBT avec soin dans ces types de conception, et de calculer la moyenne des pertes de commutation sur plusieurs cycles afin d'obtenir un résultat significatif. Une période de moyennage d'une seconde est proposée pour simplifier l'équation.

Les pertes de commutation totales de l'IGBT par valve sont calculées en faisant la somme de toutes les énergies d'activation E_{on} et de désactivation E_{off} pour tous les niveaux de valve à VSC dans la valve sur une période d'échantillonnage t_s , dont la valeur recommandée est d'une seconde:

$$P_{V6} = \frac{1}{t_s} \cdot \sum_{j=1}^{N_t} \sum_{k=1}^{N_s} (E_{on_j,k}(V,I) + E_{off_j,k}(V,I)) \quad (11)$$

où

t_s est la durée d'échantillonnage;

N_s est le nombre moyen de cycles de commutation (actif + inactif) dont fait l'objet chaque niveau de valve à VSC pendant la durée d'échantillonnage t_s ;

$E_{on_j,k}$ est l'énergie d'activation dissipée dans le ou les IGBT du $j^{\text{ème}}$ niveau de valve à VSC pour le $k^{\text{ème}}$ événement d'activation pendant la durée d'échantillonnage t_s ;

$E_{off_j,k}$ est l'énergie de désactivation dissipée dans le ou les IGBT du $j^{\text{ème}}$ niveau de valve à VSC pour le $k^{\text{ème}}$ événement de désactivation pendant la durée d'échantillonnage t_s .

8.3 Pertes de commutation de la diode

Pour les diodes, l'énergie d'activation est généralement négligeable, la diode assurant la conduction dès sa polarisation dans le sens direct. Toutefois, l'énergie de désactivation (rétablissement) E_{rec} n'est pas négligeable. L'énergie de rétablissement provient de la charge rétablie inverse Q_{rr} qui passe par la diode peu de temps après le passage du courant à zéro. L'énergie de rétablissement augmente avec le courant qui circulait dans la diode avant l'événement de désactivation, même si la relation entre E_{rec} et le courant (voir Figure 4) n'est pas linéaire. E_{rec} peut être exprimée sous la forme d'une fonction linéaire segmentée du courant (comme pour la tension à l'état passant) ou d'une relation de loi exponentielle. Les pertes de commutation de la diode E_{rec} doivent être indiquées conformément à l'IEC 60747-2.

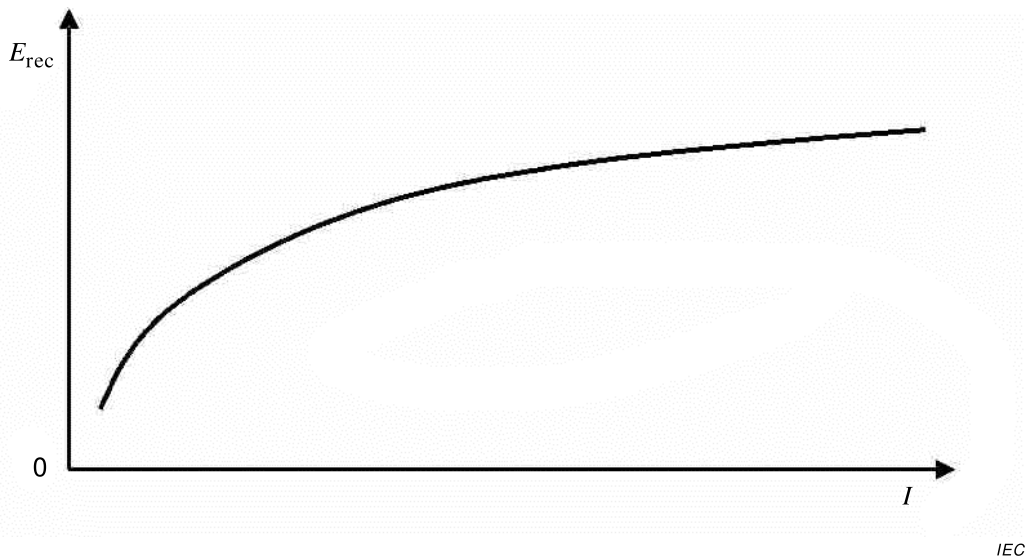


Figure 4 – Energie de rétablissement de la diode en fonction du courant

Les pertes de commutation totales de la diode par valve sont alors calculées en faisant la somme de toutes les énergies de rétablissement E_{rec} pour tous les niveaux de valve de la valve sur une période d'échantillonnage définie t_s :

$$P_{V7} = \frac{1}{t_s} \cdot \sum_{j=1}^{N_t} \sum_{k=1}^{N_s} E_{rec_j,k}(V,I) \tag{12}$$

où

$E_{rec_j,k}$ est l'énergie de rétablissement dissipée de la diode dans la ou les diodes du $j^{\text{ème}}$ niveau de valve à VSC pour le $k^{\text{ème}}$ événement de désactivation de diode pendant la durée d'échantillonnage t_s .

9 Autres pertes

9.1 Pertes du circuit d'amortissement

Certaines conceptions de valve à VSC peuvent utiliser des circuits d'amortissement passif afin de réduire les contraintes d'activation et de désactivation exercées sur les IGBT ou, pour les valves du type «commutateur», pour faciliter le partage de tension.

NOTE 1 Les circuits de partage de tension résistifs ne sont pas considérés comme des "circuits d'amortissement", même s'ils peuvent contribuer au partage de tension. Les pertes dans les circuits de partage de tension résistifs entrent dans la catégorie des pertes dépendant de la tension c.c. (voir l'Article 6).

NOTE 2 Les circuits «d'amortissement actif», dans lesquels la commande de grille de l'IGBT ajuste la vitesse de commutation de chaque IGBT afin de limiter les erreurs de répartition de tension, sont abordés dans "Pertes de commutation de l'IGBT" de 8.2.

Les circuits d'amortissement peuvent être conçus pour faciliter l'activation et/ou la désactivation. A chaque événement de commutation, le circuit d'amortissement dissipe une énergie E_{sn_on} (pour un circuit d'amortissement d'activation) ou E_{sn_off} (pour un circuit d'amortissement de désactivation). Un circuit d'amortissement peut être conçu de plusieurs façons, mais en principe, les pertes du circuit d'amortissement sont calculées en multipliant l'énergie dissipée dans le circuit d'amortissement par la fréquence d'occurrence des événements de dissipation dans la valve de manière analogue à celle utilisée pour les pertes de commutation de l'IGBT et de la diode:

$$P_{V8} = \frac{1}{t_s} \cdot \sum_{j=1}^{N_t} \sum_{k=1}^{N_s} (E_{sn_on_j,k}(V,I) + E_{sn_off_j,k}(V,I)) \quad (13)$$

où

$E_{sn_on_j,k}$ est l'énergie dissipée dans le ou les circuits d'amortissement du $j^{\text{ème}}$ niveau de valve à VSC pour le $k^{\text{ème}}$ événement d'activation de l'IGBT associé pendant la durée d'échantillonnage t_s ;

$E_{sn_off_j,k}$ est l'énergie dissipée dans le ou les circuits d'amortissement du $j^{\text{ème}}$ niveau de valve à VSC pour le $k^{\text{ème}}$ événement de désactivation de l'IGBT associé pendant la durée d'échantillonnage t_s .

Dans l'idéal, il convient de déterminer les valeurs de E_{sn_on} et E_{sn_off} par des mesures directes réalisées sur un circuit d'amortissement réel, dans le cadre d'un essai de caractérisation. Toutefois, étant donné que les performances du circuit d'amortissement sont affectées par les caractéristiques de commutation des dispositifs à semiconducteurs, et inversement, il est également nécessaire que l'essai représente les dispositifs à semiconducteurs. Il convient de noter que cette approche ne permet pas de faire la distinction entre les mesures des énergies d'amortissement et des énergies de commutation du semiconducteur. Par conséquent, lorsque les pertes du circuit d'amortissement sont déterminées par des mesures, il peut s'avérer nécessaire de considérer l'essai comme étant un essai combiné de l'énergie d'amortissement et de l'énergie de commutation, et donc de combiner le calcul de P_{V8} à celui de P_{V6} et de P_{V7} .

9.2 Consommation de puissance de l'électronique de valve

La consommation de puissance totale de l'électronique de valve par valve est calculée en multipliant la perte de puissance par niveau de valve par le nombre de niveaux de valve par valve:

$$P_{V9} = P_{GU} \cdot N_t \quad (14)$$

où:

P_{GU} est la consommation de puissance totale des unités de grille, des circuits d'alimentation électrique et des autres circuits auxiliaires dans un niveau de valve à VSC.

NOTE Si l'électronique de valve déduit sa puissance d'un circuit d'amortissement passif, la consommation de puissance de l'électronique de valve peut déjà être prise en compte dans les pertes du circuit d'amortissement (voir le paragraphe précédent).

10 Pertes totales de la valve par poste de convertisseur

Les pertes totales par valve sont calculées en faisant la somme des contributions P_{V1} à P_{V9} :

$$P_{VT} = \sum_{i=1}^9 P_{Vi} \quad (15)$$

Les pertes totales de la valve à VSC par poste de convertisseur sont égales aux pertes par valve, P_{VT} multipliées par le nombre de valves du poste de convertisseur.

NOTE Certaines topologies de convertisseur multi-niveaux contiennent plusieurs types de valves ou des valves présentant des cycles de fonctionnement différents. Dans ces cas, la procédure ci-dessus est évaluée séparément pour chaque type de valve ou de cycle de fonctionnement.

Le Tableau 1 comporte une matrice indiquant les sources des données nécessaires au calcul des différents types de pertes de la valve.

Tableau 1 – Matrice indiquant la relation des données nécessaires au calcul des pertes et le type de pertes de la valve (1 sur 2)

Données nécessaires au calcul des pertes	Source			Type de pertes de la valve								
	Essais individuels de série	Essais de caractérisation	Spécifié par le fabricant du VSC	Pertes de conduction de l'IGBT (P_{V1})	Pertes de conduction de la diode (P_{V2})	Autres pertes de conduction (P_{V3})	Pertes dépendant de la tension c.c. (P_{V4})	Pertes dans les condensateurs c.c. (P_{V5})	Pertes de commutation de l'IGBT (P_{V6})	Pertes de commutation de la diode (P_{V7})	Pertes du circuit d'amortissement (P_{V8})	Consommation de puissance de l'électronique de valve (P_{V9})
Tension à l'état passant $V_{CE(sat)}$ de l'IGBT dans les conditions de référence normalisées.	x			x								
Tension à l'état passant $V_{CE(sat)}$ de l'IGBT en fonction du courant et de la température.		x		x								
Tension directe V_F de la diode dans les conditions de référence normalisées.	x				x							
Tension directe V_F de la diode en fonction du courant et de la température		x			x							
Résistance totale de tous les éléments conducteurs de la valve R_s			x			x						
Résistance c.c. efficace d'une valve R_{CC} complète			x				x					
ESR du condensateur c.c. en fonction de la fréquence		x						x				
Energie d'activation E_{on} de l'IGBT dans les conditions de référence normalisées.	x								x			
Energie d'activation E_{on} de l'IGBT en fonction du courant, de la tension, de la température, de l'inductance de commutation et des paramètres de la commande de grille		x							x			

Annexe A (informative)

Détermination des pertes de puissance dans d'autres équipements du poste CCHT

A.1 Généralités

Pour la majorité des équipements d'un poste CCHT à VSC, à l'exception des valves du convertisseur, il est possible de déterminer les pertes de puissance de manière analogue à celle spécifiée dans l'IEC 61803 pour un poste CCHT muni de convertisseurs commutés par le réseau (LCC⁴). Il existe néanmoins quelques différences. Comme il n'existe actuellement aucune norme de calcul des pertes de puissance de ces équipements pour un poste CCHT à VSC, la présente annexe a pour objet de décrire les principales différences qui existent entre la pratique adoptée dans l'IEC 61803 pour un poste CCHT à LCC et la méthode adoptée pour un poste CCHT à VSC. De manière générale, les principales différences proviennent du spectre d'harmonique différent émis par les postes CCHT à LCC et à VSC. Les convertisseurs commutés par le réseau génèrent des amplitudes très élevées de courants d'harmonique de caractéristique de rang relativement inférieur du côté c.a. (11^{ème}, 13^{ème}, 23^{ème}, 25^{ème}...) et des tensions d'harmonique du côté c.c. (12^{ème}, 24^{ème}, 36^{ème}...). Les convertisseurs de source de tension produisent en général de beaucoup plus petites quantités de ces harmoniques de rang inférieur, mais ils peuvent générer des niveaux plus élevés d'harmoniques de rang supérieur.

Si la valve du convertisseur est de type «commutateur» (convertisseurs à 2 et 3 niveaux à modulation de largeur d'impulsion, par exemple), le convertisseur produit en général de grandes quantités d'harmoniques à la fréquence PWM, et leurs multiples et bandes latérales. Dans ces convertisseurs, la plage d'harmoniques considérée dans l'IEC 61803 (de l'harmonique fondamentale à la 49^{ème} du côté c.a. et de la 12^{ème} à la 48^{ème} harmonique du côté c.c.) peut ne pas être suffisamment large, et il peut s'avérer nécessaire d'étendre la limite supérieure (jusqu'à la 100^{ème} harmonique, par exemple).

Les convertisseurs de source de tension dont les valves sont du type «source de tension commandable» (convertisseur multi-niveaux modulaire et convertisseur à deux niveaux monté en cascade, par exemple) ne produisent en général que de faibles quantités de distorsion harmonique ce qui, dans la plupart des cas, ne nécessite aucun filtrage.

La Figure A.1 présente un schéma monophasé type d'un poste CCHT à VSC. Il convient de souligner que tous les postes ne sont pas nécessairement dotés de tous les composants présentés à la Figure A.1, et qu'inversement, certains postes à VSC peuvent devoir satisfaire à l'exigence de disposer d'équipements supplémentaires qui ne sont pas représentés à la Figure A.1.

A.2 Lignes directrices pour le calcul des pertes dans chaque équipement

A.2.1 Disjoncteur

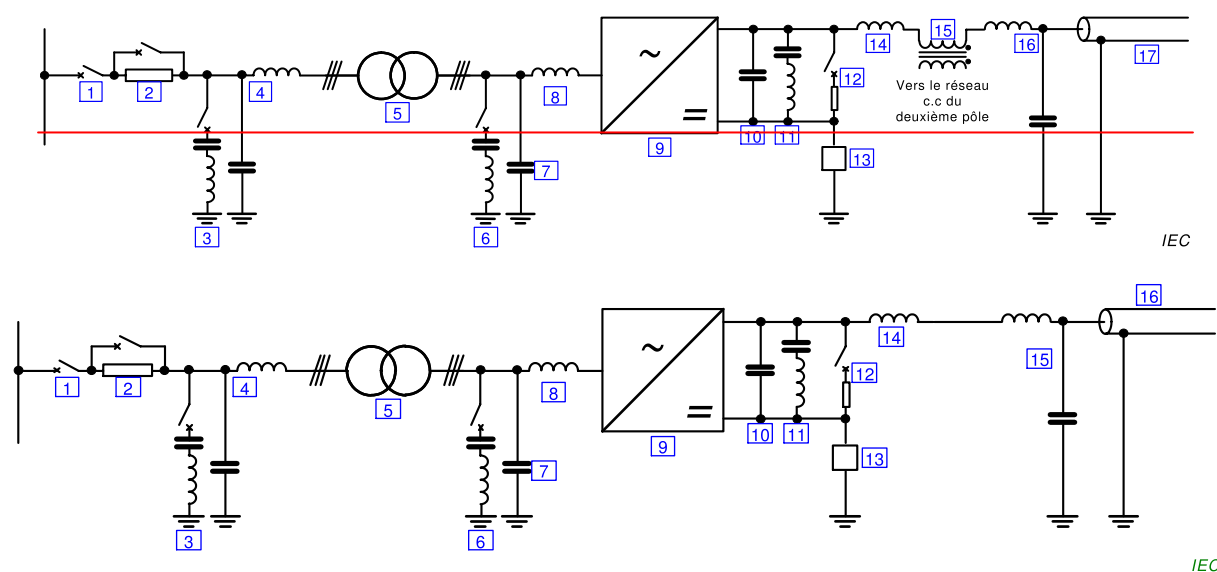
Les pertes de puissance dans le disjoncteur sont en principe ignorées.

A.2.2 Résistance de pré-insertion

Certains systèmes à VSC contiennent une résistance de pré-insertion dans la connexion c.a. au convertisseur, qui est shuntée par un disjoncteur ou un sectionneur après avoir totalement chargé les condensateurs c.c. à VSC et les condensateurs c.c. de sous-module/de cellule.

⁴ *Line-commutated converters* en anglais.

Toutefois, ce système ne contribue pas aux pertes en régime permanent et n'est pas à prendre en compte pour l'évaluation des pertes.



Légende

1	disjoncteur	10	condensateur c.c. à VSC ^c
2	résistance de pré-insertion	11	filtre d'harmonique c.c.
3	filtre d'harmonique côté réseau	12	système à freinage dynamique
4	filtre haute fréquence côté réseau	13	branche de mise à la terre du point neutre ^d
5	transformateur d'interface	14	inductance c.c.
6	filtre d'harmonique côté convertisseur	15	inductance de blocage en mode commun
7	filtre haute fréquence côté convertisseur ^a	16 15	filtre haute fréquence côté c.c.
8	inductance de phase ^a	17 16	câble c.c. ou ligne de transport aérienne
9	unité VSC ^b		

^a Dans certaines conceptions de VSC, l'inductance de phase peut remplir une partie des fonctions du filtre haute fréquence côté convertisseur.

^b Dans certaines topologies VSC, chaque valve de l'unité VSC peut comprendre une «inductance de valve» qui peut être intégrée dans la valve ou fournie comme un composant séparé.

^c Dans certaines conceptions de VSC, le condensateur c.c. à VSC peut être en partie ou en totalité réparti entre les trois unités de phase de l'unité VSC, auquel cas il est appelé condensateur de sous-module c.c.

^d La philosophie et l'emplacement de la branche de mise à la terre du point neutre peuvent être différents selon la conception de l'unité VSC.

Figure A.1 – Principaux composants susceptibles de composer un poste à VSC

A.2.3 Filtre d'harmonique côté réseau

Les pertes dans le filtre d'harmonique côté réseau, lorsqu'il est installé, peuvent être calculées selon une méthode analogue au calcul des pertes dans les filtres c.a. d'un poste CCHT à LCC (voir 5.3 de l'IEC 61803:1999 et l'IEC 61803:1999/AMD1:2010). Toutefois, il convient de noter que, comparés aux filtres d'harmonique c.a. d'un poste CCHT à LCC, les filtres c.a. d'un poste à VSC présentent généralement un MVar beaucoup plus faible et, par conséquent, un condensateur plus petit par rapport aux inductances de réglage et aux résistances d'amortissement.

A.2.4 Filtre haute fréquence côté réseau

Les pertes dans le filtre haute fréquence côté réseau, lorsqu'il est installé, peuvent être calculées selon une méthode analogue au calcul des pertes dans les filtres série c.a. d'un

poste CCHT à LCC (voir 5.9 de l'IEC 61803:1999 et l'IEC 61803:1999/AMD1:2010), mais en notant la possible nécessité d'étendre la plage des rangs d'harmonique considérée.

A.2.5 Transformateur d'interface

Le transformateur d'interface s'apparente au transformateur de convertisseur d'un poste CCHT à LCC, et est généralement le deuxième plus grand contributeur aux pertes de l'ensemble du poste, après les valves à VSC.

Les pertes de puissance dans le transformateur d'interface peuvent être calculées de manière analogue à la méthode donnée au 5.2 de l'IEC 61803:1999, l'IEC 61803:1999/AMD1:2010 et l'IEC 61803:1999/AMD2:2016, mais en notant la possible nécessité d'étendre la plage des rangs d'harmonique considérée.

A.2.6 Filtre d'harmonique côté convertisseur

Les pertes dans le filtre d'harmonique côté convertisseur, lorsqu'il est installé, peuvent être calculées selon une méthode analogue à celle indiquée pour le filtre d'harmonique côté réseau (A.2.3 ci-dessus).

A.2.7 Filtre haute fréquence côté convertisseur

Les pertes dans le filtre haute fréquence côté convertisseur, lorsqu'il est installé, peuvent être calculées selon une méthode analogue à celle indiquée pour le filtre haute fréquence côté réseau (A.2.4 ci-dessus).

A.2.8 Inductance de phase

L'inductance de phase utilisée dans certains postes à VSC n'a aucun équivalent direct dans un poste CCHT à LCC. Elle transporte essentiellement le courant de fréquence fondamentale, mais dans les convertisseurs dotés de valves de type «commutateur», elle est exposée à des niveaux élevés de courants et de tensions harmoniques provenant du convertisseur. Dans de tels cas, l'inductance peut nécessiter une conception particulière visant à éliminer les problèmes d'interférence électromagnétique ou de réchauffement provoqués par les effets pelliculaires et de proximité. Les principes généraux présentés dans l'IEC 61803:1999, l'IEC 61803:1999/AMD1:2010 et l'IEC 61803:1999/AMD2:2016 (5.2, 5.3.3 et 5.6 étant les plus pertinents) peuvent faire office de lignes directrices, mais il convient de déterminer les pertes dans ces inductances avec beaucoup de précaution.

Si le convertisseur est doté de valves de type "source de tension commandable", la conception de l'inductance de phase peut être plus conventionnelle (en général dans l'air) ou peut être ignorée. Dans de tels cas, les pertes dans l'inductance de phase peuvent être calculées selon une méthode analogue au calcul des pertes dans les inductances de filtre c.a. d'un poste CCHT à LCC (voir 5.3.3 de l'IEC 61803:1999 et l'IEC 61803:1999/AMD1:2010). Dans ce type de conception, le contenu harmonique du courant d'inductance est en principe très faible.

A.2.9 Unité VSC

L'unité VSC est composée des valves à VSC couvertes par la présente norme et, dans certaines topologies, l'unité VSC comprend également des inductances de valve. Les pertes dans les inductances de valve, lorsqu'elles sont installées, peuvent être calculées selon une méthode analogue à celle indiquée pour les inductances de filtre c.a. (5.3.3 de l'IEC 61803:1999/AMD1:2010).

A.2.10 Condensateur c.c. à VSC

Le condensateur c.c. à VSC utilisé dans certains postes à VSC n'a pas d'équivalent direct dans un poste CCHT à LCC, même s'il s'apparente à la partie capacitive du filtre c.c. Ses

pertes de puissance peuvent être calculées selon une méthode analogue au calcul des pertes dans le condensateur de filtre c.c. d'un poste CCHT à LCC (voir 5.7.2 de l'IEC 61803:1999).

NOTE Les condensateurs c.c. de sous-module qui équipent certaines conceptions de valve sont considérés comme faisant partie intégrante de la valve et sont couverts par la présente norme.

A.2.11 Filtre d'harmonique c.c.

Les pertes de puissance dans le filtre d'harmonique c.c., lorsqu'il est installé, peuvent être calculées de manière analogue à la méthode donnée au 5.7 de l'IEC 61803:1999/AMD1:2010, mais en notant la possible nécessité d'étendre la plage des rangs d'harmonique considérée.

A.2.12 Système à freinage dynamique

Certains systèmes à VSC peuvent inclure un système à freinage dynamique pour la commande active de la surtension c.c., particulièrement lors d'événements de rejet de charge se produisant lors de l'importation de puissance depuis un système de génération c.a. isolé. En règle générale, le système à freinage dynamique est composé d'une valve d'électronique de puissance (valve à freinage dynamique) dont la construction est analogue à celle des valves principales du convertisseur, et d'une grande résistance de freinage. Dans certaines conceptions, la résistance de freinage peut être intégrée à la valve à freinage dynamique, par opposition aux éléments séparés de l'équipement.

Il n'est pas nécessaire de tenir compte des pertes dans le système à freinage dynamique, lorsqu'il fonctionne pour réduire la tension c.c., pour la détermination globale des pertes, ces événements étant rares et de très courte durée. Toutefois, il convient de tenir compte des pertes en régime permanent du système à freinage dynamique.

En régime permanent, les pertes dans la partie résistive du système à freinage dynamique peuvent en général être ignorées. De même, les pertes de conduction et les pertes de condensateur c.c. de la valve à freinage dynamique peuvent être ignorées. Toutefois, la valve à freinage dynamique induit en général des pertes dépendant de la tension c.c. (Article 6) et la consommation de puissance de l'électronique de valve (9.2). Certains types de valve peuvent également induire des pertes du circuit d'amortissement (9.1) et des pertes de commutation (Article 8).

Il convient de calculer les pertes dans la valve à freinage dynamique en régime permanent en s'appuyant sur les articles correspondants de la présente norme.

A.2.13 Branche de mise à la terre du point neutre

La branche de mise à la terre du point neutre utilisée dans certains postes à VSC n'a aucun équivalent direct dans un poste CCHT à LCC. Elle est utilisée dans certains systèmes à VSC monopolaires symétriques pour fournir une référence de terre du côté valve du transformateur d'interface. Elle est en général composée d'une inductance shunt triphasée d'impédance relativement élevée. Ses pertes peuvent être calculées selon la même méthode que celle donnée pour les inductances shunt du 5.5 de l'IEC 61803:1999 et l'IEC 61803:1999/AMD1:2010.

A.2.14 Inductance c.c.

Les pertes de puissance dans l'inductance c.c., lorsqu'elle est installée, peuvent être calculées de manière analogue à la méthode donnée au 5.6 de l'IEC 61803:1999 et l'IEC 61803:1999/AMD1:2010, mais en notant la possible nécessité d'étendre la plage des rangs d'harmonique considérée.

Toutefois, il convient de noter que l'inductance c.c. du poste à VSC est en général légèrement inférieure à celle de son homologue du poste à LCC, et en principe de construction dans l'air.

A.2.15 Inductance de blocage en mode commun

~~L'inductance de blocage en mode commun utilisée dans certains postes à VSC n'a aucun équivalent direct dans un poste CCHT à LCC. Elle est utilisée dans certains systèmes à VSC pour introduire une faible inductance pour les courants en mode différentiel, mais une inductance élevée pour les courants en mode commun générés, par exemple, suite à certaines défaillances. Elle s'apparente à une paire d'inductances c.c. dans une structure commune, de manière à assurer un large couplage mutuel entre les deux.~~

~~Les pertes dans l'inductance de blocage en mode commun peuvent être calculées en appliquant les principes généraux présentés pour l'inductance c.c. (A.2.16 ci-dessous). Pour déterminer les pertes, il convient de s'appuyer dans la mesure du possible sur les mesures réalisées avec les courants circulant dans les deux enroulements en mode normal (différentiel) plutôt qu'en mode commun.~~

A.2.16 Filtre haute fréquence côté c.c.

Les pertes dans le filtre haute fréquence côté c.c., lorsqu'il est installé, peuvent être calculées selon une méthode analogue au calcul des pertes dans les filtres série c.c. d'un poste CCHT à LCC (voir 5.9 de l'IEC 61803:1999, l'IEC 61803:1999/AMD1:2010 et l'IEC 61803:1999/AMD2:2016), mais en notant la possible nécessité d'étendre la plage des rangs d'harmonique considérée.

A.2.17 Câble c.c. ou ligne de transport aérienne

Les pertes de puissance du câble c.c. ou de la ligne de transport aérienne n'entrent pas dans le domaine d'application de la présente norme.

A.3 Pertes des équipements auxiliaires et du poste en service

Les pertes de puissance dans les équipements auxiliaires et le poste en service peuvent être calculées selon la même méthode que le calcul des pertes dans les équipements auxiliaires et le poste en service d'un poste CCHT à LCC (voir 5.8 de l'IEC 61803:1999 et l'IEC 61803:1999/AMD1:2010). Il n'existe aucune différence significative entre les technologies VSC et LCC à cet égard.

Bibliographie

IEC 60747-1, *Dispositifs à semiconducteurs – Partie 1: Généralités*

IEC 61803:1999, *Détermination des pertes en puissance dans les postes de conversion en courant continu à haute tension (CCHT)*

IEC 61803:1999/AMD1:2010

IEC 61803:1999/AMD2:2016

IEC TR 62543, *High-voltage direct current (HVDC) power transmission using voltage sourced converters (VSC)* (disponible en anglais seulement)

VSC Transmission, CIGRÉ Technical Brochure No. 269

Component Testing of VSC System for HVDC Applications, CIGRÉ Technical Brochure No. 447

Voltage Source Converter (VSC) HVDC for Power Transmission – Economic Aspects and Comparison with other AC and DC Technologies, CIGRÉ Technical Brochure No. 492

FINAL VERSION

VERSION FINALE



**Power losses in voltage sourced converter (VSC) valves for high-voltage direct current (HVDC) systems –
Part 1: General requirements**

**Pertes de puissance dans les valves à convertisseur de source de tension (VSC) des systèmes en courant continu à haute tension (CCHT) –
Partie 1: Exigences générales**

CONTENTS

FOREWORD.....	4
1 Scope.....	6
2 Normative references	6
3 Terms and definitions	6
3.1 Converter types	7
3.2 Semiconductor devices	7
3.3 Converter operating states.....	8
3.4 Device characteristics.....	8
3.5 Other definitions	9
4 General conditions.....	10
4.1 General.....	10
4.2 Causes of power losses	11
4.3 Categories of valve losses	11
4.4 Operating conditions	12
4.4.1 General	12
4.4.2 Reference ambient conditions.....	12
4.4.3 Reference a.c. system conditions	12
4.4.4 Converter operating states.....	12
4.4.5 Treatment of redundancy.....	13
4.5 Use of real measured data.....	13
4.5.1 General	13
4.5.2 Routine testing	13
4.5.3 Characterisation testing.....	13
5 Conduction losses	14
5.1 General.....	14
5.2 IGBT conduction losses	16
5.3 Diode conduction losses	16
5.4 Other conduction losses.....	17
6 D.C. voltage-dependent losses	17
7 Losses in d.c. capacitors	18
8 Switching losses.....	18
8.1 General.....	18
8.2 IGBT switching losses.....	19
8.3 Diode switching losses.....	20
9 Other losses	21
9.1 Snubber circuit losses.....	21
9.2 Valve electronics power consumption.....	21
10 Total valve losses per converter substation	22
Annex A (informative) Determination of power losses in other HVDC substation equipment.....	25
A.1 General.....	25
A.2 Guidance for calculating losses in each equipment	25
A.2.1 Circuit breaker	25
A.2.2 Pre-insertion resistor	25
A.2.3 Line side harmonic filter.....	26

A.2.4	Line side high frequency filter	26
A.2.5	Interface transformer	26
A.2.6	Converter side harmonic filter	27
A.2.7	Converter side high frequency filter	27
A.2.8	Phase reactor	27
A.2.9	VSC unit	27
A.2.10	VSC d.c. capacitor	27
A.2.11	D.C. harmonic filter	27
A.2.12	Dynamic braking system	27
A.2.13	Neutral point grounding branch	28
A.2.14	D.C. reactor	28
A.2.16	D.C. side high frequency filter	28
A.2.17	D.C. cable or overhead transmission line	28
A.3	Auxiliaries and station service losses	28
	Bibliography	29
	Figure 1 – On-state voltage of an IGBT or diode	14
	Figure 2 – Piecewise-linear representation of IGBT or diode on-state voltage	15
	Figure 3 – IGBT switching energy as a function of collector current	19
	Figure 4 – Diode recovery energy as a function of current	20
	Figure A.1 – Major components that may be found in a VSC substation	26
	Table 1 – Matrix indicating the relationship of data needed for calculation of losses and the type of valve losses (1 of 2)	23

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**POWER LOSSES IN VOLTAGE SOURCED CONVERTER (VSC)
VALVES FOR HIGH-VOLTAGE DIRECT CURRENT (HVDC) SYSTEMS –****Part 1: General requirements**

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 62751-1 bears the edition number 1.1. It consists of the first edition (2014-08) [documents 22F/302/CDV and 22F/321A/RVC] and its amendment 1 (2018-04) [documents 22F/439A/CDV and 22F/458A/RVC]. 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 62751-1 has been prepared by subcommittee 22F: Power electronics for electrical transmission and distribution systems, of IEC technical committee 22: Power electronic systems and equipment.

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

A list of all parts in the IEC 62751series, published under the general title *Power losses in voltage sourced converter (VSC) valves for high-voltage direct current (HVDC) systems*, 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.

POWER LOSSES IN VOLTAGE SOURCED CONVERTER (VSC) VALVES FOR HIGH-VOLTAGE DIRECT CURRENT (HVDC) SYSTEMS –

Part 1: General requirements

1 Scope

This part of IEC 62751 sets out the general principles for calculating the power losses in the converter valves of a voltage sourced converter (VSC) for high-voltage direct current (HVDC) applications, independent of the converter topology. Clauses 6 and 8 and subclauses 9.1, 9.2 and A.2.12 of the standard can also be used for calculating the power losses in the dynamic braking valves (where used) and as guidance for calculating the power losses of the valves for a STATCOM installation.

Power losses in other items of equipment in the HVDC substation, apart from the converter valves, are excluded from the scope of this standard. Power losses in most equipment in a VSC substation can be calculated using similar procedures to those prescribed for HVDC systems with line-commutated converters (LCC) in IEC 61803. Annex A presents the main differences between LCC and VSC HVDC substations in so far as they influence the method for determining power losses of other equipment.

This standard does not apply to converter valves for line-commutated converter HVDC systems.

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 60633, *Terminology for high-voltage direct current (HVDC) transmission*

IEC 60747-2, *Semiconductor devices – Discrete devices and integrated circuits – Part 2: Rectifier diodes*

IEC 60747-9:2007, *Semiconductor devices – Discrete devices – Part 9: Insulated-gate bipolar transistors (IGBTs)*

IEC 62747:2014, *Terminology for voltage-sourced converters (VSC) for high-voltage direct current (HVDC) systems*

ISO/IEC Guide 98-3, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC 60633, IEC 62747, IEC 60747-2, IEC 60747-9 as well as the following apply.

NOTE 1 Related terms and definitions can also be found in IEC TR 62543, IEC 62751-2 and in the other relevant parts of the IEC 60747 series.

NOTE 2 Throughout this standard, the term “insulated gate bipolar transistor (IGBT)” is used to indicate a turn-off semiconductor device; however, the standard is equally applicable to other types of turn-off semiconductor devices such as the GTO, IGCT, ETO, IEGT, etc.

3.1 Converter types

3.1.1

2-level converter

converter in which the voltage between the a.c. terminals of the VSC unit and VSC unit midpoint is switched between two discrete d.c. voltage levels

Note 1 to entry: VSC unit midpoint is defined in 3.5.9.

3.1.2

multi-level converter

converter in which the voltage between the a.c. terminals of the VSC unit and VSC unit midpoint is switched between more than three discrete d.c. voltage levels

Note 1 to entry: VSC unit midpoint is defined in 3.5.9.

3.1.3

modular multi-level converter

MMC

multi-level converter in which each VSC valve consists of a number of MMC building blocks connected in series

Note 1 to entry: MMC building block is defined in 3.5.4.

Note 2 to entry: This note applies to the French language only.

3.1.4

cascaded two-level converter

CTL

modular multi-level converter in which each switch position consists of more than one IGBT-diode pair connected in series

Note 1 to entry: IGBT-diode pair is defined in 3.2.4.

Note 2 to entry: This note applies to the French language only.

3.2 Semiconductor devices

3.2.1

turn-off semiconductor device

controllable semiconductor device which may be turned on and off by a control signal, for example an IGBT

3.2.2

insulated gate bipolar transistor

IGBT

turn-off semiconductor device with three terminals: a gate terminal (G) and two load terminals emitter (E) and collector (C)

Note 1 to entry: By applying appropriate gate to emitter voltages, current in one direction can be controlled, i.e. turned on and turned off.

Note 2 to entry: This note applies to the French language only.

3.2.3

free-wheeling diode

FWD

power semiconductor device with diode characteristic

Note 1 to entry: A FWD has two terminals: an anode (A) and a cathode (K). The current through FWDs is in opposite direction to the IGBT current. FWDs are characterized by the capability to cope with high rates of decrease of current caused by the switching behaviour of the IGBT.

Note 2 to entry: This note applies to the French language only.

3.2.4

IGBT-diode pair

arrangement of IGBT and FWD connected in inverse parallel

Note 1 to entry: An IGBT-diode pair is usually in one common package; however, it can include individual IGBTs and/or diodes packages connected in parallel.

3.3 Converter operating states

3.3.1

no-load operating state

condition in which the VSC substation is energized but the IGBTs are blocked and all substation service loads and auxiliary equipment are connected

3.3.2

idling operating state

condition in which the VSC substation is energized and the IGBTs are de-blocked but with no active or reactive power output at the point of common connection to the a.c. network

Note 1 to entry: The “idling operating” and “no-load” conditions are similar but from the no-load state several seconds may be needed before power can be transmitted, while from the idling operating state, power transmission may be commenced almost immediately (less than 3 power frequency cycles).

Note 2 to entry: In the idling operating state, the converter is capable of actively controlling the d.c. voltage, in contrast to the no-load state where the behaviour of the converter is essentially “passive”.

Note 3 to entry: Losses will generally be slightly lower in the no-load state than in the idling operating state, therefore this operating mode is preferred where the arrangement of the VSC system permits it.

3.3.3

operating state

condition in which the VSC substation is energized and the converters are de-blocked

Note 1 to entry: Unlike line-commutated converter, VSC can operate with zero active/reactive power output.

3.3.4

no-load power losses

power losses in the VSC valve in the no-load state

Note 1 to entry: In some converter designs, it may be necessary to make occasional switching operations for the purposes of balancing voltages between different parts of the converter. In such converters, the calculation of no-load losses shall take into account the switching frequency of such an operating mode.

3.3.5

idling operating losses

losses in the VSC valve in the idling operating state

3.3.6

operating losses

losses in the VSC valve in the operating state

3.4 Device characteristics

3.4.1

IGBT collector-emitter saturation voltage

$V_{CE(sat)}$

collector-emitter voltage under conditions of gate-emitter voltage at which the collector current is essentially independent of the gate-emitter voltage

3.4.2

IGBT turn-on energy

E_{on}

energy dissipated inside the IGBT during the turn-on of a single collector current pulse

3.4.3

IGBT turn-off energy

E_{off}

energy dissipated inside the IGBT during the turn-off procedure of a single collector current pulse

3.4.4

diode forward voltage

V_F

voltage across the terminals of a diode which results from the flow of current in the forward direction

3.4.5

diode reverse recovery energy

E_{rec}

energy dissipated inside the diode during the turn-off procedure

3.5 Other definitions

3.5.1

VSC valve level

smallest indivisible functional unit of VSC valve

Note 1 to entry: For any VSC valve in which IGBTs are connected in series and operated simultaneously, one VSC valve level is one IGBT-diode pair including its auxiliaries. For MMC type valve, one valve level is one submodule together with its auxiliaries.

3.5.2

redundant levels

maximum number of series connected VSC valve levels or diode valve levels in a valve that may be short-circuited externally or internally during service without affecting the safe operation of the valve as demonstrated by type tests, and which if and when exceeded, would require shutdown of the valve to replace the failed levels or acceptance of increased risk of failures

Note 1 to entry: In valve designs such as the cascaded two level converter, which contain two or more conduction paths within each cell and have series-connected VSC valve levels in each path, redundant levels shall be counted only in one conduction path in each cell

3.5.3

valve electronics

electronic circuits at valve potential(s) which perform control and protection functions for one or more valve levels

3.5.4

MMC building block

self-contained, two-terminal controllable voltage source together with d.c. capacitor(s) and immediate auxiliaries, forming part of a MMC

3.5.5

switch position

semiconductor function which behaves as a single, indivisible switch

Note 1 to entry: A switch position may consist of a single IGBT-diode pair or, in the case of the cascaded two level converter, a series connection of multiple IGBT-diode pairs.

3.5.6**submodule**

MMC building block where each switch position consists of only one IGBT-diode pair cell

3.5.7**cell**

MMC building block where each switch position consists of more than one IGBT-diode pair connected in series

3.5.8**VSC unit**

three VSC phase units, together with VSC unit control equipment, essential protective and switching devices, d.c. storage capacitors, phase reactors and auxiliaries, if any, used for conversion

3.5.9**VSC unit midpoint**

point in a VSC unit whose electrical potential is equal to the average of the potentials of the positive and negative d.c. terminals of the VSC unit

Note 1 to entry: In some applications the VSC unit midpoint may exist only as a virtual point, not corresponding to a physical node in the circuit.

4 General conditions**4.1 General**

Suppliers need to know in detail how and where losses are generated, since this affects component and equipment ratings. Purchasers are interested in a verifiable loss figure which allows equitable bid comparison and in a procedure after delivery which can objectively verify the guaranteed performance requirements of the supplier.

The overall uncertainty of the value of losses is an important parameter for a converter and for a converter station since the value of losses is used to compare investment cost to capitalized cost over the life-time of the converter station. To ensure that estimates are undisputed, adherence to the provisions of this standard and the provisions of ISO/IEC Guide 98-3 is indispensable. All measurements shall furthermore be traceable to national and/or international standards of measurement.

As a general principle, it would be desirable to determine the efficiency of an HVDC converter station by a direct measurement of its energy losses. However, attempts to determine the station losses by subtracting the measured output power from the measured input power should recognize that such measurements have an inherent inaccuracy, especially if performed at high voltage. The losses of an HVDC converter station at full load are generally of the order 1 % of the transmitted power. Therefore, the loss measured as a small difference between two large quantities is not likely to be a sufficiently accurate indication of the actual losses.

In some special circumstances it may be possible, for example, to arrange a temporary test connection in which two converters are operated from the same a.c. source and also connected together via their d.c. terminals. In this connection, the power drawn from the a.c. source equals the losses in the circuit. However, the a.c. source also provides var support and commutating voltage to the two converters. Once again, there are practical measurement difficulties. In order to avoid the problems described above, this standard standardizes a method of calculating the HVDC converter station losses by summing the losses calculated for each item of equipment. The standardized calculation method will help the purchaser to meaningfully compare the competing bids. It will also allow an easy generation of performance curves for the wide range of operating conditions in which the performance has to be known. In the absence of an inexpensive experimental method which could be employed

for an objective verification of losses during type tests, the calculation method is the next best alternative as it uses, wherever possible, experimental data obtained from measurements on individual equipment and components under conditions equivalent to those encountered in real operation.

Thus, for most cases, the losses are estimated from component characteristics, using suitable mathematical models of the converters. It is however important that all such estimates have a base in actual measurements having sufficiently low uncertainty. Care should also be taken to show the propagation of uncertainties from measurements and how they interact with the model. Estimates of the uncertainty contributions from imperfections in the models themselves should also be considered.

It is important to note that the power loss in each item of equipment will depend on the ambient conditions under which it operates, as well as on the operating conditions or duty cycles to which it is subjected. Therefore, the ambient and operating conditions shall be defined for each item of equipment, based on the ambient and operating conditions of the entire HVDC converter station.

4.2 Causes of power losses

Dependent on the converter topology, a VSC valve can either have the function to act like a controllable switch or to act like a controllable voltage source.

For the controllable voltage source type converter, the VSC valve is a complete controllable voltage source assembly, which is generally connected between one a.c. terminal and one d.c. terminal.

For the switch type converter, the VSC valve is an arrangement of IGBT-diode pairs connected in series and arranged to be switched simultaneously as a single functional unit.

Most of the power losses in VSC valves appear in IGBTs and diodes. In each case, two mechanisms are involved:

- conduction losses;
- switching losses.

There may, in addition, be small losses in d.c. submodule or cell capacitors, voltage divider and snubber circuits, valve electronics etc.

Since the technology of VSC transmission is developing rapidly with several quite different VSC topologies being used, a detailed procedure for calculating the power losses is not yet available for all possible converter topologies. As a result, the manufacturer of the VSC equipment shall present a detailed report of the VSC valve loss calculation, explaining the method used and justifying any assumptions made. This standard gives the general principles to be followed in calculating valve losses and provides guidance for the preparation and interpretation of such a report.

Due to the accuracy of d.c. metering systems (especially due to the poor accuracy of d.c. voltage measurement) the approach of the standard rests on calculations based on routine testing of devices (datasheet) together with some characterisation measurements.

4.3 Categories of valve losses

The various components of valve losses are subdivided into terms referred to as P_{V1} to P_{V9} :

- P_{V1} : IGBT conduction losses
- P_{V2} : diode conduction losses
- P_{V3} : other valve conduction losses

- P_{V4} : d.c. voltage-dependent losses
- P_{V5} : losses in d.c. capacitors of the valve
- P_{V6} : IGBT switching losses
- P_{V7} : diode turn-off losses
- P_{V8} : snubber losses
- P_{V9} : valve electronics power consumption

4.4 Operating conditions

4.4.1 General

Purchasers of HVDC systems may specify their own standard reference conditions for atmospheric pressure, ambient temperature, humidity, coolant temperature, power transmission level etc, at which the power losses are to be determined. Where the purchaser does not specify such reference conditions, losses shall be determined under the following default conditions.

4.4.2 Reference ambient conditions

The following default reference ambient conditions are applied:

- dry-bulb ambient temperature = 20 °C
- wet-bulb ambient temperature = 14 °C
- atmospheric pressure = 101,3 kPa.

4.4.3 Reference a.c. system conditions

The following default reference a.c. system conditions are applied:

- nominal a.c. system frequency,
- nominal a.c. network voltage,
- balanced a.c. conditions (i.e. no negative phase sequence).

4.4.4 Converter operating states

As a minimum, VSC valve losses shall be determined for the following operating states:

- no-load operation;
- idling operation;
- operation with 100 % rated power in each relevant direction of power transmission, with zero net reactive power exchange with the a.c. system, and with the d.c. voltage at the value as applicable to the power being transmitted.

In some VSC systems, the interface transformer includes a tap changer, the purpose of which is to adjust the valve-side a.c. voltage, in steady-state, to a value which allows the power losses to be optimised. The tap position has a large effect on the power losses of both the transformer and the converter and should therefore be correctly represented in all calculations. The tap position of the transformer tap changer (where fitted) is important in the determination of losses. The calculations of losses shall take into account the tap position corresponding to the operating point at which losses are to be determined and the control and protection strategies employed for the VSC system, including, for example, fault ride-through requirements. The manufacturer is responsible for defining and justifying the tap position for the loss calculation.

4.4.5 Treatment of redundancy

For the calculation of valve losses, all redundant VSC levels shall be assumed to be in operation.

NOTE This approach yields the highest total losses in the valve, although it does not give the highest losses per VSC valve level, which occur when redundant levels are shorted.

4.5 Use of real measured data

4.5.1 General

The characteristics of the IGBTs and diodes used in the valve shall be determined by a combination of routine tests performed under standardised conditions on 100 % of production, and more comprehensive characterisation tests performed on smaller samples under conditions that are more representative of the conditions encountered in the real converter valve.

The routine tests shall be used to derive a population average of all IGBTs and diodes supplied for the project, but under standardised operating conditions which may not necessarily be applicable to the project (for example, junction temperature). The characterisation tests shall then be used to derive correction factors applicable for the exact operating conditions of the project.

4.5.2 Routine testing

As a minimum, the following tests shall be performed in accordance with IEC Publications by the device manufacturer on all IGBTs (IEC 60747-9), and diodes (IEC 60747-2) used for the valve:

- IGBT on-state voltage $V_{CE(sat)}$ and diode forward voltage V_F at one typical value of current and temperature;
- IGBT turn-on energy E_{on} and turn-off energy E_{off} at one typical commutating condition;
- diode recovery energy E_{rec} at one typical commutating condition.

This data shall be used to calculate the average device properties for calculation of the losses of the complete converter.

The conditions under which the routine tests are performed may not be fully representative of the conditions encountered in the VSC valve, in respect of temperature, stray inductance, gate drive behaviour, etc.

4.5.3 Characterisation testing

4.5.3.1 Characterisation testing of semiconductor devices

A minimum of 10 devices from at least 2 different production lots shall be subjected to a more comprehensive programme of characterisation tests to permit the routine test data obtained in 4.4.1 above to be adjusted to the correct operating conditions of the VSC valve. The following conditions shall be reproduced adequately.

Fixed values for a given design of VSC valve are as follows:

- stray inductance of commutating loop;
- other semiconductor devices affected by the commutation process;
- gate drive characteristics;
- snubber circuits (if any).

Operating variables are as follows:

- d.c. capacitor or d.c. submodule capacitor voltage, scaled to one VSC level;
- device current (over the range from standby to operation at full power in either rectifier or inverter mode);
- junction temperature (over the range from standby to operation at full power in either rectifier or inverter mode).

The characterization tests shall be performed in accordance with IEC 60747-2 and IEC 60747-9.

4.5.3.2 Characterisation testing of other components

Characterization tests for components are as follows:

- R_{ESR} test;
- snubber turn-on and turn-off tests.

5 Conduction losses

5.1 General

When an IGBT or a diode is in the conducting state, it exhibits a small on-state voltage of a few volts. This on-state voltage, multiplied by the current flowing through the device, gives rise to “conduction losses”. The on-state voltage is referred to as V_F in diodes and $V_{CE(sat)}$ in IGBTs.

The on-state voltage depends on current in a non-linear manner, and also on the “junction temperature” of the device, as shown on Figure 1.

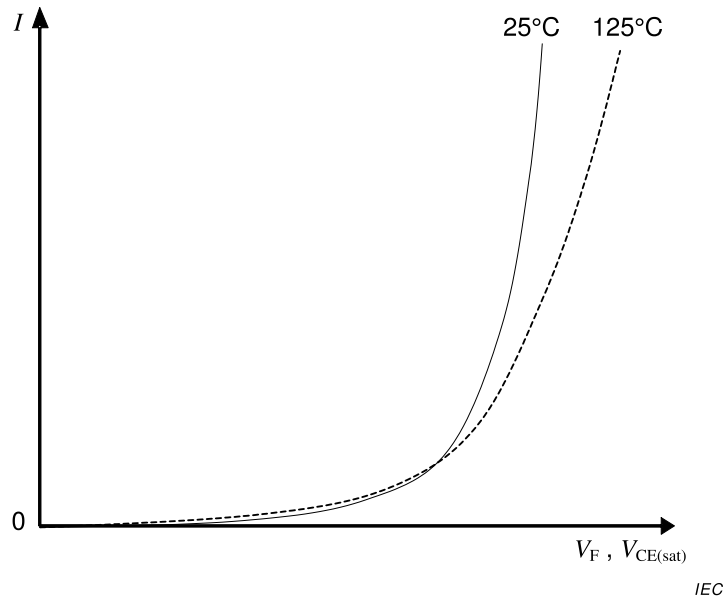


Figure 1 – On-state voltage of an IGBT or diode

NOTE 1 The on-state voltage V_{CE} of an IGBT also depends on the gate-emitter voltage V_{GE} . For low values of V_{GE} , increasing V_{GE} reduces the value of V_{CE} . However, above a certain value of V_{GE} , little or no further reduction of V_{CE} occurs and the IGBT is said to be “saturated”. It is assumed here that V_{GE} is high enough to ensure that the IGBT remains fully saturated. Consequently $V_{CE(sat)}$ (the saturated value of V_{CE}) can be used for loss calculation.

NOTE 2 On some types of semiconductor device, the “crossover” current can be very low, such that for most practical values of current the on-state voltage always increases with temperature.

Calculation of power losses requires that the on-state voltage be represented mathematically, so that the average conduction losses over a complete cycle may be evaluated as follows:

$$P_{\text{cond}_T} = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} I_T(\omega t) \cdot V_{\text{CE(sat)}}(I_T) \cdot d(\omega t) \quad (1)$$

for an IGBT, or

$$P_{\text{cond}_D} = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} I_D(\omega t) \cdot V_F(I_D) \cdot d(\omega t) \quad (2)$$

for a diode.

The conduction losses of semiconductors in a complete valve are then found by summing the conduction losses calculated as above for each IGBT and each diode in the valve.

To simplify this process, the on-state voltage shown in Figure 1 is usually represented as a piecewise-linear approximation with a threshold voltage V_0 and a slope resistance R_0 , as shown on Figure 2.

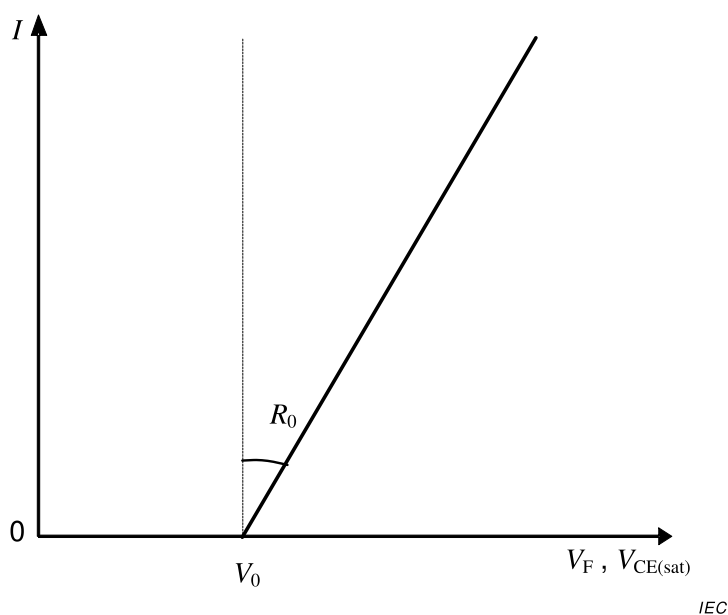


Figure 2 – Piecewise-linear representation of IGBT or diode on-state voltage

Having made this approximation, the conduction losses in each semiconductor device are then determined by using the average and rms currents through that device:

$$P_{\text{cond}} = V_0 \cdot I_{\text{av}} + R_0 \cdot I_{\text{rms}}^2 \quad (3)$$

where

V_0, R_0 are the threshold voltage and slope resistance of the device;

I_{av} is the mean current in the device, averaged over one power-frequency cycle.

$$I_{av} = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} I(\omega t) \cdot d(\omega t) \quad (4)$$

I_{rms} is the rms current in the device, averaged over one power-frequency cycle.

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} I(\omega t)^2 \cdot d(\omega t)} \quad (5)$$

In general, rectifier mode gives rise to the largest diode conduction losses, while inverter operation gives rise to the largest IGBT conduction losses.

It is possible to obtain greater accuracy by using a more exact model of the device on-state voltage (as per Figure 1) rather than the piecewise linear approximation, and then performing a direct numerical integration. However, the piecewise-linear approximation is preferred because it simplifies the calculation process, allows greater transparency and still permits good accuracy to be obtained, provided the measurements used to derive the piecewise-linear approximation are made at appropriate values of current. Therefore it is recommended that V_0 and R_0 are determined by measuring on-state voltage at 100 % and 33 % of the device rated current and performing a linear extrapolation.

5.2 IGBT conduction losses

In the 2-level converter, all IGBTs experience the same current. Consequently the total IGBT conduction losses per valve may be calculated by multiplying the conduction loss per IGBT by the number of VSC levels per valve:

$$P_{V1} = N_t \cdot [V_{0T} \cdot I_{Tav} + R_{0T} \cdot I_{Trms}^2] \quad (6)$$

where

N_t is the number of VSC valve levels per valve;

V_{0T} is the IGBT threshold voltage;

R_{0T} is the IGBT slope resistance;

I_{Tav} is the mean current in the IGBT;

I_{Trms} is the rms current in the IGBT.

IGBT conduction losses in multi-level converters may be evaluated using similar principles outlined above for 2-level converters. However, the procedure is more complex because not all IGBTs in a given phase unit experience the same current.

In general, the average and rms currents need to be calculated separately for each different IGBT operating duty, and the results multiplied by the number of such devices in each valve.

5.3 Diode conduction losses

In the 2-level converter, all diodes experience the same current. Consequently the total diode conduction losses per valve may be calculated by multiplying the conduction loss per diode by the number of VSC levels per valve:

$$P_{V2} = N_t \cdot [V_{0D} \cdot I_{Dav} + R_{0D} \cdot I_{Drms}^2] \quad (7)$$

where

V_{0D} is the diode threshold voltage;

R_{0D} is the diode slope resistance;
 I_{Dav} is the mean current in the diode;
 I_{Drms} is the rms current in the diode.

Diode losses in multi-level converters may be calculated using similar principles but, as described for IGBT losses in the preceding subclause, are more complex and generally need to be calculated separately for each different diode operating duty.

5.4 Other conduction losses

Conduction losses in components other than the semiconductors and submodule d.c. capacitor (for example, busbars) are normally small. However, they may not be negligible and should be included in the calculation of valve losses. Some designs of valve require inductance in series with each valve (valve reactor), either as a discrete component or distributed in the valve. Losses in the valve reactors for such valves shall be considered as part of the valve losses.

Calculation of such losses is relatively straightforward and depends only on the resistance of each conducting element and the rms current that flows through it.

Where the same current flows through all conducting elements in a valve, the value of these losses per valve is given by:

$$P_{V3} = I_{vrms}^2 \cdot R_s \quad (8)$$

where

I_{vrms} is the rms current flowing in the valve;
 R_s is the total resistance of all conducting elements in the valve, other than IGBTs and diodes.

Where not all conducting elements in the valve carry the same currents, the above principles should be evaluated separately for each element.

6 D.C. voltage-dependent losses

D.C. voltage-dependent losses are losses caused by off-state leakage currents through IGBTs and diodes and shunt resistive components in parallel with the IGBTs and diodes. Shunt resistive components in parallel with the IGBTs and diodes could include:

- resistive voltage grading circuits (d.c. grading circuits);
- resistive voltage dividers for voltage measurement;
- water cooling pipework;
- shunt resistive losses across capacitor dielectric material;
- discharge resistors across d.c. capacitors.

These losses are calculated as follows:

$$P_{V4} = V_{vrms}^2 / R_{DC} \quad (9)$$

where

V_{vrms} is the rms value of voltage between the terminals of the valve;
 R_{DC} is the effective d.c. resistance of a complete valve.

NOTE Leakage currents in IGBTs and diodes are normally very low when the valve is in the no-load or idling operating states; however in the operating state, the leakage currents can be significant because of the high junction temperatures.

7 Losses in d.c. capacitors

Some types of VSC valve include in-built d.c. capacitors which carry an appreciable component of current at fundamental or low-order harmonic frequencies. As a result, the power losses in the capacitors of valves of this type cannot be neglected.

In general, losses in d.c. capacitors can be divided into ohmic losses and dielectric losses.

Ohmic losses represent $I^2 \times R$ losses in the metallic components within the capacitor, chiefly the film metallisation and internal leads.

Dielectric losses in a capacitor are related to the energy lost in the dielectric material over each voltage cycle. Dielectric losses are caused by the periodic realignment of the molecules within the dielectric as the voltage stress across the dielectric changes during the cycle, and are analogous to hysteresis losses in ferromagnetic materials.

The effects of ohmic and dielectric losses are frequently combined into a single term referred to as the equivalent series resistance R_{ESR} of the capacitor. R_{ESR} is a function of frequency and is related to, but not exactly equal to, the actual internal series resistance.

The total d.c. capacitor losses per valve are then calculated as follows:

$$P_{V5} = \sum_{j=1}^{N_c} I_{\text{crms}_j}^2 \cdot R_{\text{ESR}_j} \quad (10)$$

where

N_c is the number of capacitors in the valve;

I_{crms_j} is the rms current flowing in the j^{th} d.c. capacitor of the valve;

R_{ESR_j} is the equivalent series resistance of the j^{th} d.c. capacitor in the valve.

NOTE 1 Dielectric losses are normally most significant in a.c. applications where the capacitor voltage polarity reverses twice per cycle. For d.c. capacitors the voltage is usually non-reversing and dielectric losses are therefore small, but depending on the capacitor technology used, cannot be negligible.

NOTE 2 There can also be a third component of loss caused by the finite insulation resistance of the dielectric material, but this is normally very small. It is covered by d.c. voltage-dependent losses as described in the preceding subclause.

NOTE 3 ESR (equivalent series resistance) is a non-linear, frequency-dependent quantity. For accurate results, it is important that ESR be determined by real measurements on a capacitor of the same type as used in the valve, under realistic conditions of voltage, current and frequency.

8 Switching losses

8.1 General

Each time an IGBT turns on or off, or a diode turns off, it incurs a small switching energy of a few Joules. In most VSC topologies, these switching events occur several times per fundamental-frequency cycle. For converters using pulse-width modulation (PWM) in particular, the resulting switching loss (switching energy multiplied by switching frequency) can be a large proportion of the total valve losses.

Because different converter topologies use different switching strategies and the switching behaviour depends on the overall control methods used, only general guidance on calculating switching losses can be given here. However, the manufacturer shall present, in the loss calculation report, a detailed justification of the method used.

8.2 IGBT switching losses

During turn-on and turn-off in an IGBT, the device is subjected to high current and high voltage simultaneously as part of the switching process. As a result the IGBT incurs a high peak power dissipation, the time integral of which is known as the switching energy. IGBT switching energies are referred to as the turn-on energy E_{on} and the turn-off energy E_{off} . The switching losses of the IGBT E_{on} and E_{off} shall be provided according to the IEC 60747-9:2007 (6.3.11 and 6.3.12).

Both E_{on} and E_{off} depend nearly linearly on the instantaneous value of collector current I_C at the instant of switching, as shown on Figure 3.

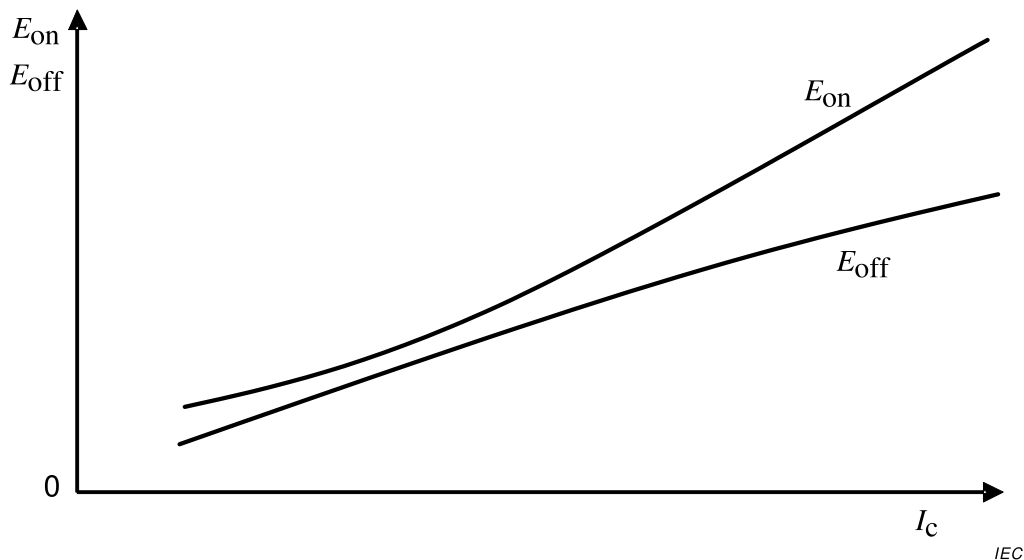


Figure 3 – IGBT switching energy as a function of collector current

E_{on} and E_{off} are normally quoted by the IGBT manufacturer as a function of current, under certain idealised operating conditions with a simple design of gate drive and a fixed value of gate resistor. The gate resistor value influences the switching losses because it affects the charge and discharge times of the gate capacitance, and hence the switching speed.

Moreover, some designs of VSC, particularly in valves of the “switch” type, may use more advanced designs of gate drive which incorporate active voltage sharing algorithms or “active snubber” circuits. The IGBT gate drive circuit may also include an active overvoltage clamp algorithm to suppress the transient overvoltage which occurs across the IGBT after turn-off. These algorithms adjust the switching speed of each IGBT in order to prevent any individual IGBT in the valve from experiencing a potentially harmful overvoltage, but as a consequence they may result in the switching losses being higher than stated by the IGBT manufacturer.

The VSC manufacturer should therefore justify in detail the values of E_{on} and E_{off} used in the loss calculation, based on the design of gate drive circuit, the choice of gate resistor (where applicable) and the philosophy with regard to voltage grading where series connected IGBTs are used.

Switching losses also depend on the d.c. link voltage (per IGBT) at the instant of switching, and also on junction temperature. In 2-level and 3-level converters, the mean d.c. link voltage

per IGBT varies little from the nominal design value. However, for modular multi-level converters, the d.c. link voltage (here provided by the submodule d.c. capacitor) can vary considerably from one switching instant to the next. Consequently, the IGBT switching losses should be evaluated with care in such designs and the switching losses should be averaged over several cycles in order to obtain a meaningful result. An averaging period of one second is proposed in order to simplify the equation.

The total IGBT switching losses per valve are calculated by summing all the turn-on energies E_{on} and the turn-off energies E_{off} for all of the VSC valve levels in the valve, over a sampling period t_s , which is recommended to be one second:

$$P_{V6} = \frac{1}{t_s} \cdot \sum_{j=1}^{N_t} \sum_{k=1}^{N_s} (E_{on_j,k}(V,I) + E_{off_j,k}(V,I)) \tag{11}$$

where

t_s is the sampling time;

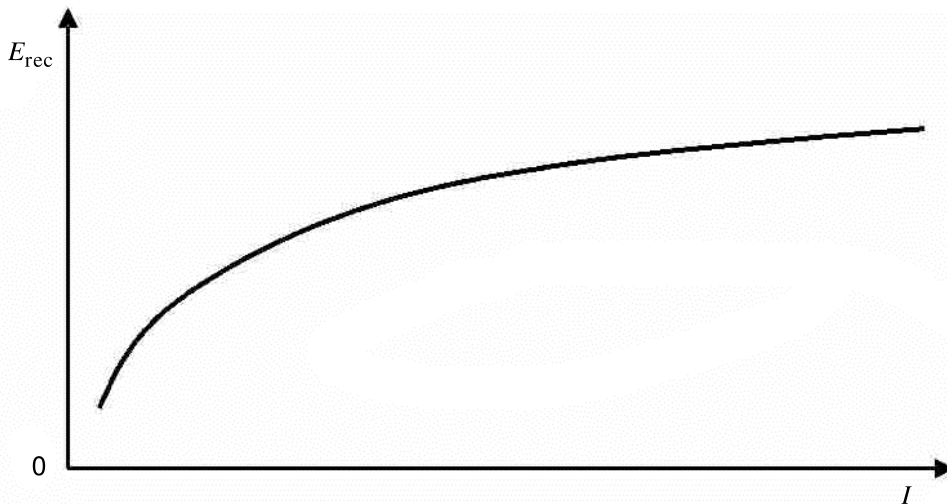
N_s is the average number of switching cycles (on+off) experienced by each VSC valve level during the sampling time t_s ;

$E_{on_j,k}$ is the turn-on energy dissipated in the IGBT(s) of the j^{th} VSC valve level for the k^{th} turn-on event during the sampling time t_s ;

$E_{off_j,k}$ is the turn-off energy dissipated in the IGBT(s) of the j^{th} VSC valve level for the k^{th} turn-off event during the sampling time t_s .

8.3 Diode switching losses

For diodes, the turn-on energy is normally negligible because the diode conducts as soon as it becomes forward biased. However, the turn-off (recovery) energy E_{rec} is not negligible. The recovery energy arises from the reverse recovered charge Q_{rr} which passes through the diode shortly after the current crosses zero. The recovery energy increases with the current which had been flowing in the diode prior to the turn-off event, although the relationship between E_{rec} and current, as shown on Figure 4, is non-linear. E_{rec} can be expressed as a piecewise-linear function of current (as for on-state voltage) or a power law relationship. The switching losses of the diode E_{rec} shall be provided according to IEC 60747-2.



IEC

Figure 4 – Diode recovery energy as a function of current

The total diode switching losses per valve are then calculated by summing all the recovery energies E_{rec} for all of the valve levels in the valve, over a defined sampling period t_s :

$$P_{V7} = \frac{1}{t_s} \cdot \sum_{j=1}^{N_t} \sum_{k=1}^{N_s} E_{rec_j,k}(V,I) \quad (12)$$

where

$E_{rec_j,k}$ is the diode recovery energy dissipated in the diode(s) of the j^{th} VSC valve level for the k^{th} diode turn-off event during the sampling time t_s .

9 Other losses

9.1 Snubber circuit losses

Some designs of VSC valve may use passive snubber circuits to reduce the turn-on or turn-off stresses on the IGBTs or, for valves of the “switch” type, to assist with voltage sharing.

NOTE 1 Resistive voltage sharing circuits are not considered as “snubber circuits”, although they can contribute to voltage sharing. Losses in resistive voltage sharing circuits are covered by d.c. voltage dependent losses as described in Clause 6.

NOTE 2 “Active snubber” circuits, where the IGBT gate drive adjusts the speed of switching of each IGBT in order to minimise any voltage distribution errors, are considered under “IGBT switching losses” in 8.2.

Snubber circuits may be designed to assist with turn-on, or turn-off, or both. Each time a switching event takes place, the snubber circuit will dissipate an energy E_{sn_on} (for a turn-on snubber) or E_{sn_off} (for a turn-off snubber). Many different designs of snubber circuit are possible, but in principle the snubber losses are calculated by taking the energy dissipated in the snubber circuit multiplied by the frequency of occurrence of dissipative events in the valve in a similar way to that used for IGBT and diode switching losses:

$$P_{V8} = \frac{1}{t_s} \cdot \sum_{j=1}^{N_t} \sum_{k=1}^{N_s} (E_{sn_on_j,k}(V,I) + E_{sn_off_j,k}(V,I)) \quad (13)$$

where

$E_{sn_on_j,k}$ is the energy dissipated in the snubber circuit(s) of the j^{th} VSC valve level for the k^{th} turn-on event of the associated IGBT during the sampling time t_s ;

$E_{sn_off_j,k}$ is the energy dissipated in the snubber circuit(s) of the j^{th} VSC valve level for the k^{th} turn-off event of the associated IGBT during the sampling time t_s .

The values of E_{sn_on} and E_{sn_off} should ideally be determined by direct measurement on a real snubber circuit, as part of the characterization testing; however, since the performance of the snubber is affected by the switching characteristics of the semiconductor devices and vice versa, the testing also needs to represent the semiconductor devices. It should be noted that, with this approach it is impossible to distinguish between measurements of snubber energies and semiconductor switching energies. Hence, where snubber losses are determined by measurement it may be necessary to consider the test as a combined test of snubber energy and switching energy, and subsequently to combine the calculation of P_{V8} with that of P_{V6} and P_{V7} .

9.2 Valve electronics power consumption

The total valve electronics power consumption per valve is calculated by multiplying the power loss per valve level by the number of valve levels per valve:

$$P_{V9} = P_{GU} \cdot N_t \quad (14)$$

where

P_{GU} is the total power consumption of gate unit(s), power supply circuits and other auxiliary circuits in one VSC valve level.

NOTE Where the valve electronics derives its power from a passive snubber circuit, the power consumption of the valve electronics can already be counted in the losses of the snubber circuit as described in the previous subclause.

10 Total valve losses per converter substation

The total losses per valve are calculated by summing the contributions P_{V1} to P_{V9} :

$$P_{VT} = \sum_{i=1}^9 P_{Vi} \quad (15)$$

The total VSC valve losses per converter substation are equal to the losses per valve, P_{VT} multiplied by the number of valves in the converter substation.

NOTE Some multi-level converter topologies contain more than one type of valve, or valves with different operating duties. In such cases, the above procedure is evaluated separately for each type of valve or operating duty.

Table 1 contains a matrix indicating sources of data needed for calculation of various types of valve losses.

Table 1 – Matrix indicating the relationship of data needed for calculation of losses and the type of valve losses (1 of 2)

Data needed as input for calculation of losses	Source			Type of valve losses								
	Routine testing	Characterising testing	Specified by VSC manufacturer	IGBT conduction losses (P_{V1})	Diode conduction losses (P_{V2})	Other conduction losses (P_{V3})	D.C. voltage-dependent losses (P_{V4})	Losses in d.c. capacitors (P_{V5})	IGBT switching losses (P_{V6})	Diode switching losses (P_{V7})	Snubber circuit losses (P_{V8})	Valve electronics power consumption (P_{V9})
IGBT on-state voltage $V_{CE(sat)}$ under standardized reference conditions.	x			x								
IGBT on-state voltage $V_{CE(sat)}$ as a function of current and temperature.		x		x								
Diode forward voltage V_F under standardized reference conditions.	x				x							
Diode forward voltage V_F as a function of current and temperature		x			x							
Total resistance of all conducting elements in the valve R_s			x			x						
Effective d.c. resistance of a complete valve R_{DC}			x				x					
d.c. capacitor ESR as a function of frequency		x						x				
IGBT turn-on energy E_{on} under standardized reference conditions.	x								x			
IGBT turn-on energy E_{on} as a function of current, voltage, temperature, commutating inductance and gate drive parameters		x							x			
IGBT turn-off energy E_{off} under standardized reference conditions.	x								x			
IGBT turn-off energy E_{off} as a function of current, voltage, temperature, commutating inductance and gate drive parameters		x							x			

Annex A (informative)

Determination of power losses in other HVDC substation equipment

A.1 General

For the majority of the equipment in a VSC HVDC substation, with the exception of the converter valves, it is possible to determine power losses in a similar way to that specified in IEC 61803 for an HVDC substation with line-commutated converters (LCC). Nevertheless there are some differences. Since there is currently no standard for calculating power losses in such equipment for a VSC HVDC substation, the purpose of this annex is to describe the main differences between the practice adopted in IEC 61803 for an LCC HVDC substation, and the method needed for a VSC HVDC substation. In general terms, the main differences arise from the different harmonic spectra emitted by LCC and VSC HVDC substations. Line-commutated converters produce very high amplitudes of relatively low-order characteristic harmonic currents on the a.c. side (11th, 13th, 23rd, 25th...) and harmonic voltages on the d.c. side (12th, 24th, 36th...). Voltage-sourced converters generally produce much smaller amounts of these low-order harmonics but may produce larger levels of higher-order harmonics.

When the converter valve is of the “switch” type (for example the 2-level and 3-level converters with Pulse-Width Modulation, PWM) the converter usually produces large amounts of harmonics at the PWM frequency, multiples and sidebands thereof. In such converters, the range of harmonics considered in IEC 61803 (fundamental to 49th on the a.c. side and 12th to 48th on the d.c. side) may not be wide enough and it may be necessary to extend the upper limit, for example to 100th harmonic.

Voltage sourced converters in which the converter valves are of the “controllable voltage source” type (for example the modular multi-level converter and cascaded two-level converter) generally produce only small amounts of harmonic distortion and in many cases require no filtering.

Figure A.1 illustrates a typical single-line diagram of a VSC HVDC substation. It should be emphasised that not all of the components shown on Figure A.1 will necessarily exist in all substations, and conversely some VSC substations may have a requirement for additional equipment not shown on Figure A.1.

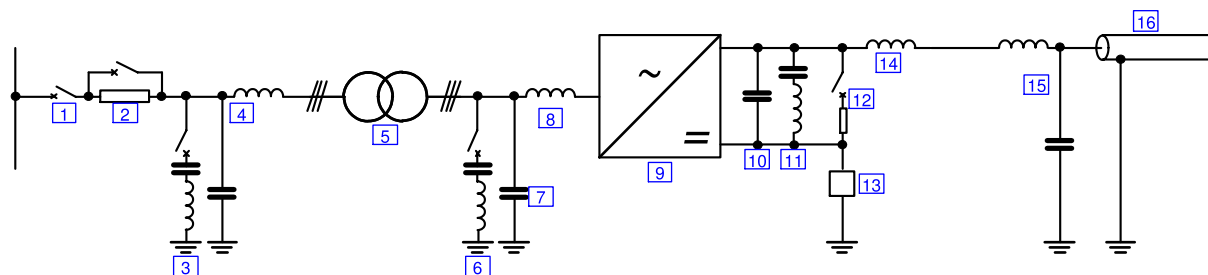
A.2 Guidance for calculating losses in each equipment

A.2.1 Circuit breaker

Power losses in the circuit breaker are normally neglected.

A.2.2 Pre-insertion resistor

Some VSC systems include a pre-insertion resistance in the a.c. connection to the converter, which is bypassed by a circuit breaker or disconnecter after the VSC d.c. capacitors and submodule/cell d.c. capacitors have been fully charged. However, this system does not contribute to steady-state losses and need not be considered in the loss evaluation.



IEC

Key

1	circuit breaker	10	VSC d.c. capacitor ^c
2	pre-insertion resistor	11	d.c. harmonic filter
3	line side harmonic filter	12	dynamic braking system
4	line side high frequency filter	13	neutral point grounding branch ^d
5	interface transformer	14	d.c. reactor
6	converter side harmonic filter	15	d.c. side high frequency filter
7	converter side high frequency filter ^a	16	d.c. cable or overhead transmission line
8	phase reactor ^a		
9	VSC unit ^b		

^a In some designs of VSC, the phase reactor can fulfil part of the function of the converter-side high frequency filter.

^b In some VSC topologies, each valve of the VSC unit can include a “valve reactor”, which can be built in to the valve or provided as a separate component.

^c In some designs of VSC, the VSC d.c. capacitor can be partly or entirely distributed amongst the three phase units of the VSC unit, where it is referred to as the d.c. submodule capacitors.

^d The philosophy and location of the neutral point grounding branch can be different depending on the design of the VSC unit.

Figure A.1 – Major components that may be found in a VSC substation

A.2.3 Line side harmonic filter

Losses in the line side harmonic filter, where fitted, may be calculated by a similar process to the calculation of losses in the a.c. filters of an LCC HVDC substation, as described in 5.3 of IEC 61803:1999 and IEC 61803:1999/AMD1:2010. However, it should be noted that in comparison with the a.c. harmonic filters on an LCC HVDC substation, the a.c. filters in a VSC substation generally have much lower MVar and consequently a smaller capacitor in relation to the tuning inductor(s) and damping resistor(s).

A.2.4 Line side high frequency filter

Losses in the line side high frequency filter, where fitted, may be calculated by a similar process to the calculation of losses in the a.c. series filters of an LCC HVDC substation, as described in 5.9 of IEC 61803:1999 and IEC 61803:1999/AMD1:2010, but noting the possible need to extend the range of harmonic orders considered.

A.2.5 Interface transformer

The interface transformer is analogous to the converter transformer in an LCC HVDC substation and is generally the second largest contributor to the losses of the entire substation, after the VSC valves.

Power losses in the interface transformer may be calculated in a similar way to the method given in 5.2 of IEC 61803:1999, IEC 61803:1999/AMD1:2010 and IEC 61803:1999/AMD2:2016, but noting the possible need to extend the range of harmonic orders considered.

A.2.6 Converter side harmonic filter

Losses in the converter side harmonic filter, where fitted, may be calculated by a similar process to those outlined for the line side harmonic filter (A.2.3 above).

A.2.7 Converter side high frequency filter

Losses in the converter side high frequency filter, where fitted, may be calculated by a similar process to those outlined for the line side high frequency filter (A.2.4 above).

A.2.8 Phase reactor

The phase reactor used in some VSC substations has no direct equivalent in an LCC HVDC substation. It carries mainly fundamental frequency current but in converters based on valves of the “switch” type, is exposed to high levels of harmonic currents and voltages from the converter. In such cases the reactor may require a special design in order to eliminate problems of electromagnetic interference or heating caused by skin and proximity effects. The general principles outlined in IEC 61803:1999, IEC 61803:1999/AMD1:2010 and IEC 61803:1999/AMD2:2016 (5.2, 5.3.3 and 5.6 being the most relevant) may be used for guidance but determination of losses in such reactors should be performed with care.

Where the converter is based on valves of the “controllable voltage source” type, the phase reactor may be of a more conventional design (usually air-cored) or may be omitted altogether. In such cases, the losses in the phase reactor may be calculated by a similar process to the calculation of losses in the a.c. filter reactors of an LCC HVDC substation, as described in 5.3.3 of IEC 61803:1999 and IEC 61803:1999/AMD1:2010. In such designs, the harmonic content of the reactor current is normally very low.

A.2.9 VSC unit

The VSC unit consists of the VSC valves, which are covered by the body of this standard, and in some topologies the VSC unit also includes valve reactors. Losses in the valve reactors, where fitted, may be calculated by a similar process to the method for a.c. filter reactors given in 5.3.3 of IEC 61803:1999/AMD1:2010.

A.2.10 VSC d.c. capacitor

The VSC d.c. capacitor used in some VSC substations has no direct equivalent in an LCC HVDC substation, although it is analogous to the capacitive part of the d.c. filter. Its power losses may be calculated by a similar process to the calculation of losses in the d.c. filter capacitor of an LCC HVDC substation, as described in 5.7.2 of IEC 61803:1999.

NOTE The submodule d.c. capacitors fitted to some designs of valve are considered as part of the valve and are covered by the body of this standard.

A.2.11 D.C. harmonic filter

Power losses in the d.c. harmonic filter, where fitted, may be calculated in a similar way to the method given in 5.7 of IEC 61803:1999/AMD1:2010, but noting the possible need to extend the range of harmonic orders considered.

A.2.12 Dynamic braking system

Some VSC systems may include a dynamic braking system for active control of d.c. overvoltage, particularly during load-rejection events when importing power from an islanded a.c. generating system. The dynamic braking system generally consists of a power electronic valve (the dynamic braking valve) similar in construction to the main valves of the converter, and a large braking resistor. In some designs the braking resistor may be built in to the dynamic braking valve as opposed to being a separate item of equipment.

Losses in the dynamic braking system while it is operating to reduce the d.c. voltage do not need to be accounted for in the overall determination of losses, since such events are rare and of very short duration. However, the steady-state losses of the dynamic braking system should be accounted for.

In steady state, the losses in the resistive part of the dynamic braking system can generally be neglected. Similarly, conduction losses and d.c. capacitor losses in the dynamic braking valve may be neglected; however the dynamic braking valve will generally incur d.c. voltage-dependent losses (Clause 6) and the power consumption of the valve electronics (9.2). Some types of valve may also incur snubber losses (9.1) and switching losses (Clause 8).

Losses in the dynamic braking valve under steady-state conditions should be calculated using the relevant clauses of the body of this standard.

A.2.13 Neutral point grounding branch

The neutral-point grounding branch used in some VSC substations has no direct equivalent in an LCC HVDC substation. It is used in some symmetrical monopole VSC systems to provide a ground reference on the valve side of the interface transformer. It typically consists of a three-phase shunt reactor of relatively high impedance. Its losses may be calculated in a similar way to the method given for shunt reactors in 5.5 of IEC 61803:1999 and IEC 61803:1999/AMD1:2010.

A.2.14 D.C. reactor

Power losses in the d.c. reactor, where fitted, may be calculated in a similar way to the method given in 5.6 of IEC 61803:1999 and IEC 61803:1999/AMD1:2010, but noting the possible need to extend the range of harmonic orders considered.

However, it should be noted that the d.c. reactor in a VSC substation is usually somewhat smaller than its counterpart in an LCC substation and is usually air-cored in construction.

A.2.15

A.2.16 D.C. side high frequency filter

Losses in the d.c. side high frequency filter, where fitted, may be calculated by a similar process to the calculation of losses in the d.c. series filters of an LCC HVDC substation, as described in 5.9 of IEC 61803:1999, IEC 61803:1999/AMD1:2010 and IEC 61803:1999/AMD2:2016, but noting the possible need to extend the range of harmonic orders considered.

A.2.17 D.C. cable or overhead transmission line

Power losses in the d.c. cable or overhead transmission line are out of the scope of this standard.

A.3 Auxiliaries and station service losses

Power losses in auxiliary and station service equipment may be calculated by the same process to the calculation of losses in the auxiliary and station service equipment of an LCC HVDC substation, as described in 5.8 of IEC 61803:1999 and IEC 61803:1999/AMD1:2010. There are no significant differences between the VSC and LCC technologies in this respect.

Bibliography

IEC 60747-1, *Semiconductor devices – Part 1: General*

IEC 61803:1999, *Determination of power losses in high-voltage direct current (HVDC) converter stations*

IEC 61803:1999/AMD1:2010

IEC 61803:1999/AMD2:2016

IEC TR 62543, *High-voltage direct current (HVDC) power transmission using voltage sourced converters (VSC)*

VSC Transmission, CIGRÉ Technical Brochure No. 269

Component Testing of VSC System for HVDC Applications, CIGRÉ Technical Brochure No. 447

Voltage Source Converter (VSC) HVDC for Power Transmission – Economic Aspects and Comparison with other AC and DC Technologies, CIGRÉ Technical Brochure No. 492

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	32
1 Domaine d'application	34
2 Références normatives	34
3 Termes et définitions	35
3.1 Types de convertisseurs	35
3.2 Dispositifs à semiconducteurs	35
3.3 Etats de fonctionnement du convertisseur	36
3.4 Caractéristiques du dispositif	37
3.5 Autres définitions	37
4 Conditions générales	38
4.1 Généralités	38
4.2 Causes des pertes de puissance	39
4.3 Catégories de pertes de la valve	40
4.4 Conditions de fonctionnement	40
4.4.1 Généralités	40
4.4.2 Conditions ambiantes de référence	40
4.4.3 Conditions du système c.a. de référence	40
4.4.4 Etats de fonctionnement du convertisseur	41
4.4.5 Traitement des redondances	41
4.5 Utilisation des données mesurées réelles	41
4.5.1 Généralités	41
4.5.2 Essais individuels de série	41
4.5.3 Essais de caractérisation	42
5 Pertes de conduction	42
5.1 Généralités	42
5.2 Pertes de conduction de l'IGBT	45
5.3 Pertes de conduction de la diode	45
5.4 Autres pertes de conduction	45
6 Pertes dépendant de la tension c.c.	46
7 Pertes dans les condensateurs c.c.	46
8 Pertes de commutation	47
8.1 Généralités	47
8.2 Pertes de commutation de l'IGBT	48
8.3 Pertes de commutation de la diode	49
9 Autres pertes	50
9.1 Pertes du circuit d'amortissement	50
9.2 Consommation de puissance de l'électronique de valve	51
10 Pertes totales de la valve par poste de convertisseur	51
Annexe A (informative) Détermination des pertes de puissance dans d'autres équipements du poste CCHT	54
A.1 Généralités	54
A.2 Lignes directrices pour le calcul des pertes dans chaque équipement	54
A.2.1 Disjoncteur	54
A.2.2 Résistance de pré-insertion	54
A.2.3 Filtre d'harmonique côté réseau	55

A.2.4	Filtre haute fréquence côté réseau	55
A.2.5	Transformateur d'interface.....	55
A.2.6	Filtre d'harmonique côté convertisseur	56
A.2.7	Filtre haute fréquence côté convertisseur	56
A.2.8	Inductance de phase	56
A.2.9	Unité VSC.....	56
A.2.10	Condensateur c.c. à VSC.....	56
A.2.11	Filtre d'harmonique c.c.	56
A.2.12	Système à freinage dynamique	57
A.2.13	Branche de mise à la terre du point neutre	57
A.2.14	Inductance c.c.	57
A.2.16	Filtre haute fréquence côté c.c.....	57
A.2.17	Câble c.c. ou ligne de transport aérienne.....	58
A.3	Pertes des équipements auxiliaires et du poste en service.....	58
	Bibliographie.....	59
	Figure 1 – Tension à l'état passant d'un IGBT ou d'une diode.....	43
	Figure 2 – Représentation linéaire segmentée de la tension à l'état passant de l'IGBT ou de la diode	44
	Figure 3 – Energie de commutation de l'IGBT en fonction du courant du collecteur.....	48
	Figure 4 – Energie de rétablissement de la diode en fonction du courant	50
	Figure A.1 – Principaux composants susceptibles de composer un poste à VSC.....	55
	Tableau 1 – Matrice indiquant la relation des données nécessaires au calcul des pertes et le type de pertes de la valve (<i>1 sur 2</i>)	52

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**PERTES DE PUISSANCE DANS LES VALVES
À CONVERTISSEUR DE SOURCE DE TENSION (VSC)
DES SYSTEMES EN COURANT CONTINU À HAUTE TENSION (CCHT)****Partie 1: Exigences générales****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 62751-1 porte le numéro d'édition 1.1. Elle comprend la première édition (2014-08) [documents 22F/302/CDV et 22F/321A/RVC] et son amendement 1 (2018-04) [documents 22F/439A/CDV et 22F/458A/RVC]. 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 62751-1 a été établie par le sous-comité 22F: Electronique de puissance pour les réseaux électriques de transport et de distribution, du comité d'études 22 de l'IEC: Systèmes et équipements électroniques de puissance.

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

Une liste de toutes les parties de la série IEC 62751, publiées sous le titre général *Pertes de puissance dans les valves à convertisseur de source de tension (VSC) des systèmes en courant continu à haute tension (CCHT)*, 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.

PERTES DE PUISSANCE DANS LES VALVES À CONVERTISSEUR DE SOURCE DE TENSION (VSC) DES SYSTEMES EN COURANT CONTINU À HAUTE TENSION (CCHT)

Partie 1: Exigences générales

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 62751 définit les principes généraux de calcul des pertes de puissance dans les valves à convertisseur de source de tension (VSC¹) pour des applications en courant continu à haute tension (CCHT), quelle que soit la topologie du convertisseur. Les Articles 6 et 8 et les paragraphes 9.1, 9.2 et A.2.12 de la norme peuvent également être utilisés pour calculer les pertes de puissance dans les valves à freinage dynamique (le cas échéant) et comme guide pour le calcul des pertes de puissance des valves d'une installation STATCOM.

Les pertes de puissance dans d'autres parties de l'équipement du poste CCHT, outre les valves à convertisseur, sont exclues du domaine d'application de la présente norme. Dans la plupart des équipements d'un poste à VSC, les pertes de puissance peuvent être calculées à l'aide des mêmes procédures que celles indiquées pour les systèmes CCHT munis de convertisseurs commutés par le réseau (CCR) de l'IEC 61803. L'Annexe A présente les principales différences entre les postes CCHT à CCR et à VSC, pour autant qu'elles influencent la méthode de détermination des pertes de puissance d'autres équipements.

La présente norme ne s'applique pas aux valves à convertisseur des systèmes CCHT munis de convertisseurs commutés par le réseau.

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 60633, *Terminologie pour le transport d'énergie en courant continu à haute tension (CCHT)*

IEC 60747-2, *Dispositifs à semiconducteurs – Dispositifs discrets et circuits intégrés – Partie 2: Diodes de redressement*

IEC 60747-9:2007, *Dispositifs à semiconducteurs – Dispositifs discrets – Partie 9: Transistors bipolaires à grille isolée (IGBT)*

IEC 62747:2014, *Terminologie relative aux convertisseurs de source de tension (VSC) des systèmes en courant continu à haute tension (CCHT)*

Guide ISO/IEC 98-3, *Incertitude de mesure – Partie 3: Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM:1995)*

¹ Voltage sourced converter en anglais.

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions de l'IEC 60633, IEC 62747, IEC 60747-2, IEC 60747-9 ainsi que les suivants s'appliquent.

NOTE 1 D'autres termes et définitions associés peuvent aussi être trouvés dans l'IEC TR 62543, IEC 62751-2 et dans les autres parties correspondantes de l'IEC 60747.

NOTE 2 Tout au long de la présente norme, le terme «transistor bipolaire à grille isolée (IGBT)» est utilisé pour indiquer un dispositif à semiconducteurs blocable; toutefois, la norme s'applique également aux autres types de dispositifs à semiconducteurs blocables tels que GTO, IGCT, ETO, IEGT, etc.

3.1 Types de convertisseurs

3.1.1

convertisseur à deux niveaux

convertisseur dans lequel la tension entre les bornes c.a. de l'unité VSC et le point médian de l'unité VSC est commutée entre deux niveaux de tension c.c. discrets

Note 1 à l'article: Le point médian de l'unité VSC est défini en 3.5.9.

3.1.2

convertisseur multi-niveaux

convertisseur dans lequel la tension entre les bornes c.a. de l'unité VSC et le point médian de l'unité VSC est commutée entre plus de trois niveaux de tension c.c. discrets

Note 1 à l'article: Le point médian de l'unité VSC est défini en 3.5.9.

3.1.3

convertisseur multi-niveaux modulaire MMC

convertisseur multi-niveaux dans lequel chaque valve à VSC est composée d'un certain nombre de blocs modules MMC connectés en série

Note 1 à l'article: Le bloc module MMC est défini en 3.5.4.

Note 2 à l'article: L'abréviation «MMC» est dérivée du terme anglais développé correspondant "modular multi-level converter".

3.1.4

convertisseur à deux niveaux monté en cascade CTL

convertisseur multi-niveaux modulaire dans lequel chaque position de commutation est composée de plusieurs paires IGBT-diode connectées en série

Note 1 à l'article: La paire IGBT-diode est définie en 3.2.4.

Note 2 à l'article: L'abréviation «CTL» est dérivée du terme anglais développé correspondant "cascaded two-level converter".

3.2 Dispositifs à semiconducteurs

3.2.1

dispositif à semiconducteurs blocable

dispositif à semiconducteurs commandable qui peut être réactivé et coupé par un signal de commande (IGBT, par exemple)

3.2.2

transistor bipolaire à grille isolée IGBT

dispositif à semiconducteurs blocable possédant trois bornes: une borne de grille (G) et deux bornes de charge: émetteur (E) et collecteur (C)

Note 1 à l'article: En appliquant la grille appropriée aux tensions de l'émetteur, le courant dans une direction peut être commandé, c'est-à-dire être coupé ou réactivé.

Note 2 à l'article: L'abréviation "IGBT" est dérivée du terme anglais développé correspondant "insulated gate bipolar transistor".

3.2.3

diode de roue libre

FWD

dispositif à semiconducteurs de puissance ayant les caractéristiques d'une diode

Note 1 à l'article: Une FWD possède deux bornes: une anode (A) et une cathode (K). Le courant dans les FWD circule en sens opposé au courant de l'IGBT. Les FWD sont caractérisées par leur capacité à faire face à des chutes brutales de courant dues au comportement de commutation de l'IGBT.

Note 2 à l'article: L'abréviation «FWD» est dérivée du terme anglais développé correspondant «free-wheeling diode».

3.2.4

paire IGBT-diode

combinaison de l'IGBT et de la FWD connectés en parallèle en sens inverse

Note 1 à l'article: Une paire IGBT-diode est généralement assemblée dans un boîtier commun. Toutefois, elle peut inclure des boîtiers d'IGBT et/ou de diodes individuels connectés en parallèle.

3.3 Etats de fonctionnement du convertisseur

3.3.1

état de fonctionnement à vide

condition dans laquelle le poste à VSC est sous tension, mais les IGBT sont bloqués, et où toutes les charges de service et tous les équipements auxiliaires du poste sont connectés

3.3.2

état de fonctionnement en veille

condition dans laquelle le poste à VSC est sous tension et les IGBT sont débloqués mais ne disposent pas d'une sortie de puissance active ou réactive à l'endroit de la connexion commune au réseau c.a.

Note 1 à l'article: Les conditions de "fonctionnement en veille" et «à vide» sont similaires, mais du point de vue de l'état à vide plusieurs secondes peuvent être nécessaires avant la transmission de la puissance, alors que du point de vue du fonctionnement en veille, la transmission de la puissance peut commencer presque immédiatement (moins de 3 cycles de fréquence industrielle).

Note 2 à l'article: A l'état de fonctionnement en veille, le convertisseur est en mesure de contrôler activement la tension c.c., contrairement à l'état à vide, dans lequel le convertisseur est essentiellement "passif".

Note 3 à l'article: A l'état à vide, les pertes sont en général légèrement inférieures à celles de l'état de fonctionnement en veille. Ce mode de fonctionnement est donc préférable lorsque la disposition du système à VSC le permet.

3.3.3

état de fonctionnement

condition dans laquelle le poste à VSC est alimenté et où les convertisseurs sont débloqués

Note 1 à l'article: A l'inverse du convertisseur commuté par le réseau, le convertisseur de source de tension (VSC) peut fonctionner avec une sortie de puissance active/réactive nulle.

3.3.4

pertes de puissance à vide

pertes de puissance dans la valve à VSC à l'état à vide

Note 1 à l'article: Dans certaines conceptions de convertisseur, il peut s'avérer nécessaire de réaliser des opérations occasionnelles de commutation afin d'équilibrer les tensions entre les différentes parties du convertisseur. Dans ce type de convertisseur, le calcul des pertes à vide doit tenir compte de la fréquence de commutation de ce type de mode de fonctionnement.

3.3.5

pertes en fonctionnement en veille

pertes dans la valve à VSC à l'état de fonctionnement en veille

3.3.6

pertes en fonctionnement

pertes dans la valve à VSC à l'état de fonctionnement

3.4 Caractéristiques du dispositif

3.4.1

tension de saturation collecteur-émetteur IGBT

$V_{CE(sat)}$

tension collecteur-émetteur dans les conditions de tension grille-émetteur à laquelle le courant du collecteur est essentiellement indépendant de la tension grille-émetteur

3.4.2

énergie d'activation IGBT

E_{on}

énergie dissipée à l'intérieur de l'IGBT lors de l'activation d'une seule impulsion de courant du collecteur

3.4.3

énergie de désactivation IGBT

E_{off}

énergie dissipée à l'intérieur de l'IGBT lors de la procédure de désactivation d'une seule impulsion de courant du collecteur

3.4.4

tension directe de la diode

V_F

tension entre les bornes d'une diode, résultant du débit de courant vers l'avant

3.4.5

énergie de rétablissement inverse de la diode

E_{rec}

énergie dissipée à l'intérieur de la diode lors de la procédure de désactivation

3.5 Autres définitions

3.5.1

niveau de valve à VSC

plus petite unité fonctionnelle indivisible d'une valve à VSC

Note 1 à l'article: Pour toute valve à VSC dans laquelle les IGBT sont connectés en série et manœuvrés simultanément, un niveau de valve à VSC correspond à une paire IGBT-diode, y compris ses auxiliaires. Pour une valve de type MMC, un niveau de valve correspond à un sous-module associé à ses auxiliaires.

3.5.2

niveaux redondants

nombre maximal de niveaux de valve à VSC ou de niveaux de valve à diode connectés en série dans une valve, qui peut supporter un court-circuit externe ou interne au cours de l'utilisation sans que le fonctionnement sécurisé de la valve n'en soit altéré, comme il est démontré par les essais de type, et qui, en cas de dépassement, nécessite l'arrêt de la valve pour permettre le remplacement des niveaux défaillants ou l'acceptation d'un risque accru de dysfonctionnements

Note 1 à l'article: Dans les conceptions de valve telles que le convertisseur à deux niveaux monté en cascade, qui contiennent deux chemins de conduction ou plus dans chaque cellule et comportent des niveaux de valve à VSC connectés en série dans chaque chemin, les niveaux redondants doivent être comptés uniquement dans un chemin de conduction de chaque cellule.

3.5.3

électronique de valve

circuits électroniques au(x) potentiel(s) de la (des) valve(s) qui remplissent des fonctions de commande et de protection d'un ou de plusieurs niveaux de valve

3.5.4

bloc module MMC

source de tension indépendante commandable à deux bornes, dotée de condensateur(s) c.c. et d'auxiliaires immédiats, faisant partie d'un MMC

3.5.5

position de commutation

fonction d'un semiconducteur qui se comporte comme un seul commutateur indivisible

Note 1 à l'article: Une position de commutation peut être composée d'une seule paire IGBT-diode ou, dans le cas du convertisseur à deux niveaux monté en cascade, d'une connexion en série de plusieurs paires IGBT-diode.

3.5.6

sous-module

bloc module MMC dans lequel chaque position de commutation est composée d'une seule cellule de paire IGBT-diode

3.5.7

cellule

bloc module MMC dans lequel chaque position de commutation est composée de plusieurs paires IGBT-diode connectées en série

3.5.8

unité VSC

trois unités de phase VSC, associées à un équipement de commande de l'unité VSC, des dispositifs essentiels de protection et de commutation, des condensateurs de stockage c.c., des bobines d'inductance de phase et des auxiliaires, le cas échéant, utilisés pour la conversion

3.5.9

point médian de l'unité VSC

point d'une unité VSC dont le potentiel électrique est égal à la moyenne des potentiels des bornes c.c. positives et négatives de l'unité VSC

Note 1 à l'article: Dans certaines applications, le point médian d'unité VSC peut exister uniquement en tant que point virtuel, lequel ne correspond pas au nœud physique dans le circuit.

4 Conditions générales

4.1 Généralités

Il est nécessaire que les fournisseurs connaissent en détails comment et où sont générées les pertes, cela affectant les caractéristiques assignées du composant et de l'équipement. Les clients ont intérêt à disposer de chiffres de perte vérifiables permettant une comparaison équitable des offres et, dans le cadre d'une procédure après livraison, permettant de vérifier objectivement les exigences de performances garanties du fournisseur.

L'incertitude globale de la valeur des pertes constitue un paramètre important pour un convertisseur et pour un poste de conversion, étant donné que la valeur des pertes est utilisée pour comparer le coût d'investissement au coût capitalisé sur la durée de vie des postes de conversion. Pour s'assurer que les prévisions sont indiscutables, l'adhésion aux dispositions de la présente norme et aux dispositions du Guide ISO/IEC 98-3 sont indispensables. Toutes les mesures doivent, de plus, être traçables par rapport aux normes nationales et/ou internationales de mesure.

En principe, il est souhaitable de déterminer l'efficacité d'un poste de conversion CCHT en mesurant directement ses pertes d'énergie. Toutefois, il convient que les tentatives de détermination des pertes du poste, obtenue en soustrayant la puissance de sortie mesurée de la puissance d'entrée mesurée, permettent de reconnaître que ces mesures se caractérisent par une inexactitude inhérente, plus particulièrement si elles sont réalisées à haute tension. Les pertes d'un poste de conversion CCHT à pleine charge sont en général de l'ordre de 1 % de la puissance transmise. Il y a donc peu de chances que la perte mesurée comme étant une petite différence entre deux grandeurs élevées représente une indication de précision suffisante des pertes réelles.

Dans certains cas particuliers, il peut être possible, par exemple, de prévoir une connexion d'essai provisoire dans laquelle deux convertisseurs fonctionnent à partir de la même source c.a. et sont également connectés entre eux par l'intermédiaire de leurs bornes c.c. Dans cette connexion, la puissance délivrée à partir de la source c.a. équivaut aux pertes dans le circuit. Toutefois, la source c.a. fournit également un support de puissance réactive (var) et une tension de commutation aux deux convertisseurs. Une fois encore, la mesure présente des difficultés pratiques. Pour éviter les problèmes décrits ci-dessus, la présente norme présente une méthode normalisée de calcul des pertes du poste de conversion CCHT en faisant la somme des pertes calculées pour chaque élément de l'équipement. La méthode de calcul normalisée permet au client de comparer valablement les offres concurrentes. Elle permet également de générer aisément les courbes de performances pour une large plage de conditions de fonctionnement dont il est nécessaire de connaître les performances. En l'absence de méthode expérimentale bon marché pouvant être utilisée dans le cadre d'une vérification objective des pertes pendant les essais de type, la méthode de calcul est la meilleure alternative puisqu'elle utilise, dans la mesure du possible, les données expérimentales obtenues suite à des mesures réalisées sur un équipement individuel et des composants dans des conditions équivalentes à celles rencontrées en fonctionnement réel.

De ce fait, dans la plupart des cas, les pertes sont évaluées à partir des caractéristiques des composants, à l'aide de modèles mathématiques appropriés des convertisseurs. Il est toutefois important que toutes ces estimations reposent sur des mesures réelles dont l'incertitude est suffisamment faible. Il convient également de veiller à représenter la propagation des incertitudes des mesures et leur mode d'interaction avec le modèle. Il convient de prendre également en considération les estimations des contributions à l'incertitude liées aux imperfections des modèles eux-mêmes.

Il est important de noter que la perte de puissance de chaque élément d'équipement dépend des conditions ambiantes dans lesquelles il fonctionne, ainsi que des conditions de fonctionnement ou des cycles de service dont il fait l'objet. Par conséquent, les conditions ambiantes et les conditions de fonctionnement doivent être définies pour chaque élément, en fonction de celles de l'ensemble du poste de conversion CCHT.

4.2 Causes des pertes de puissance

Selon la topologie du convertisseur, une valve à VSC peut soit faire office de commutateur commandable ou de source de tension commandable.

Pour le convertisseur de type source de tension commandable, la valve à VSC est un assemblage complet de sources de tension commandable, en général connectée entre une borne c.a. et une borne c.c.

Pour le convertisseur de type commutateur, la valve à VSC est une disposition de paires IGBT-diode connectées en série et disposées de manière à être commutées simultanément comme une seule unité fonctionnelle.

La plupart des pertes de puissance des valves à VSC ont lieu dans les IGBT et les diodes. Dans chaque cas, deux mécanismes sont concernés :

- pertes de conduction;

- pertes de commutation.

De plus, de petites pertes peuvent apparaître dans les condensateurs de sous-module ou de cellule c.c., le diviseur de tension continue et les circuits d'amortissement, l'électronique de la valve etc.

La technologie de la transmission VSC se développant rapidement avec plusieurs topologies VSC assez différentes, une procédure détaillée de calcul des pertes de puissance n'a pas encore été élaborée pour toutes les topologies de convertisseur possibles. Il en résulte que le fabricant de l'équipement VSC doit présenter un rapport détaillé concernant le calcul des pertes de la valve à VSC, en expliquant la méthode utilisée et en justifiant toutes les hypothèses retenues. La présente norme donne les principes généraux à suivre pour le calcul des pertes de la valve et donne les lignes directrices pour la préparation et l'interprétation de ce type de rapport.

Compte tenu de l'exactitude des systèmes de mesure c.c. (plus particulièrement en raison de la faible exactitude de mesure de la tension c.c.), la démarche de la norme s'appuie sur des calculs reposant sur la réalisation d'essais individuels de série des dispositifs (fiche technique) avec certaines mesures de caractérisation.

4.3 Catégories de pertes de la valve

Les différents composants des pertes de la valve sont subdivisés en termes désignés P_{V1} à P_{V9} :

- P_{V1} : pertes de conduction de l'IGBT
- P_{V2} : pertes de conduction de la diode
- P_{V3} : autres pertes de conduction de la valve
- P_{V4} : pertes dépendant de la tension c.c.
- P_{V5} : pertes dans les condensateurs c.c. de la valve
- P_{V6} : pertes de commutation de l'IGBT
- P_{V7} : pertes de désactivation de la diode
- P_{V8} : pertes du circuit d'amortissement
- P_{V9} : consommation de puissance de l'électronique de valve

4.4 Conditions de fonctionnement

4.4.1 Généralités

Les clients des systèmes CCHT peuvent spécifier leurs propres conditions de référence normalisées en matière de pression atmosphérique, de température ambiante, d'humidité, de température de l'agent de refroidissement, de niveau de transmission de la puissance etc., pour lesquelles les pertes de puissance doivent être déterminées. Si le client ne précise pas ces conditions de référence, les pertes doivent être déterminées dans les conditions par défaut ci-dessous.

4.4.2 Conditions ambiantes de référence

Les conditions ambiantes de référence par défaut suivantes sont appliquées:

- température ambiante sèche = 20 °C
- température ambiante humide = 14 °C
- pression atmosphérique = 101,3 kPa.

4.4.3 Conditions du système c.a. de référence

Les conditions du système c.a. de référence par défaut suivantes sont appliquées:

- fréquence nominale du système c.a.
- tension nominale du réseau c.a.
- conditions c.a. équilibrées (c'est-à-dire pas de séquence de phase négative).

4.4.4 Etats de fonctionnement du convertisseur

Les pertes de la valve à VSC doivent au moins être déterminées pour les états de fonctionnement suivants:

- fonctionnement à vide;
- fonctionnement en veille;
- fonctionnement avec une puissance assignée de 100 % dans toutes les directions pertinentes de la transmission de puissance, avec un échange de puissance réactive nette nulle avec le système c.a., et avec la tension c.c. à la valeur par rapport à la puissance transmise.

Dans certains systèmes à VSC, le transformateur d'interface comprend un changeur de prise, dont l'objet est de régler la tension c.a. côté valve, en régime permanent, à une valeur permettant d'optimiser les pertes de puissance. La position de la prise a un impact important sur les pertes de puissance du transformateur et du convertisseur. Il convient donc de la représenter correctement dans tous les calculs. La position de la prise du changeur de prise du transformateur (le cas échéant) est importante pour la détermination des pertes. Les calculs des pertes doivent tenir compte de la position de la prise correspondant au point de fonctionnement auquel les pertes doivent être déterminées et des stratégies de commande et de protection utilisées pour le système à VSC, y compris, par exemple, les exigences d'alimentation sans panne. Le fabricant est chargé de définir et de justifier la position de la prise pour le calcul des pertes.

4.4.5 Traitement des redondances

Pour calculer les pertes de la valve, tous les niveaux VSC redondants doivent être supposés en fonctionnement.

NOTE Cette approche donne les pertes totales les plus élevées dans la valve, même si elle ne donne pas les pertes les plus élevées par niveau de valve à VSC, ce qui est le cas lorsque les niveaux redondants sont court-circuités.

4.5 Utilisation des données mesurées réelles

4.5.1 Généralités

Les caractéristiques des IGBT et des diodes utilisés dans la valve doivent être déterminées par une combinaison d'essais individuels de série, réalisés dans des conditions normalisées sur 100 % de la production, et d'essais de caractérisation plus exhaustifs réalisés sur des échantillons plus petits et dans des conditions plus représentatives de celles rencontrées dans les valves à convertisseur réelles.

Les essais individuels de série doivent permettre de déduire une moyenne de population de tous les IGBT et de toutes les diodes fournis pour le projet, mais dans des conditions de fonctionnement normalisées qui peuvent ne pas être nécessairement applicables au projet (température de jonction, par exemple). Les essais de caractérisation doivent alors permettre de déduire les facteurs de correction applicables aux conditions de fonctionnement exactes du projet.

4.5.2 Essais individuels de série

Les essais suivants doivent au moins être réalisés conformément aux Publications de l'IEC par le fabricant du dispositif sur tous les IGBT (IEC 60747-9) et diodes (IEC 60747-2) utilisés pour la valve:

- tension à l'état passant $V_{CE(sat)}$ de l'IGBT et tension directe V_F de la diode à une valeur type de courant et de température;
- énergie d'activation E_{on} de l'IGBT et énergie de désactivation E_{off} à une condition de commutation type;
- énergie de rétablissement E_{rec} de la diode à une condition de commutation type.

Ces données doivent être utilisées pour calculer les propriétés moyennes du dispositif pour le calcul des pertes de l'ensemble du convertisseur.

Les conditions de réalisation des essais individuels de série peuvent ne pas être totalement représentatives de celles rencontrées dans la valve à VSC quant à la température, à l'inductance parasite, au comportement de la commande de grille, etc.

4.5.3 Essais de caractérisation

4.5.3.1 Essais de caractérisation des dispositifs à semiconducteurs

Au moins 10 dispositifs issus d'au moins 2 lots de production différents doivent faire l'objet d'un programme plus exhaustif d'essais de caractérisation. Il s'agit d'adapter les données d'essai individuel de série obtenues en 4.4.1 ci-dessus aux conditions de fonctionnement correctes de la valve à VSC. Les conditions suivantes doivent être reproduites de manière adéquate.

Les valeurs fixes d'une conception donnée de valve à VSC sont les suivantes:

- inductance parasite de la boucle de commutation;
- autres dispositifs à semiconducteurs affectés par le processus de commutation;
- caractéristiques de la commande de grille;
- circuits d'amortissement (le cas échéant).

Les variables de fonctionnement sont les suivantes:

- tension de condensateur c.c. ou de condensateur de sous-module c.c., échelonnée en fonction d'un niveau VSC;
- courant de dispositif (dans la plage comprise entre la veille et le fonctionnement à pleine puissance en mode redresseur ou onduleur);
- température de jonction (dans la plage comprise entre la veille et le fonctionnement à pleine puissance en mode redresseur ou onduleur).

Les essais de caractérisation doivent être réalisés conformément à l'IEC 60747-2 et à l'IEC 60747-9.

4.5.3.2 Essais de caractérisation d'autres composants

Les essais de caractérisation des composants sont les suivants:

- essai R_{ESR} ;
- essais d'activation et de désactivation du circuit d'amortissement.

5 Pertes de conduction

5.1 Généralités

Lorsqu'un IGBT ou une diode est à l'état conducteur, il/elle génère une légère tension à l'état passant de quelques volts. Cette tension à l'état passant, lorsqu'elle est multipliée par le courant qui traverse le dispositif, donne lieu à des "pertes de conduction". La tension à l'état passant est appelée V_F dans les diodes et $V_{CE(sat)}$ dans les IGBT.

La tension à l'état passant dépend du courant de manière non linéaire et de la "température de jonction" du dispositif (voir Figure 1).

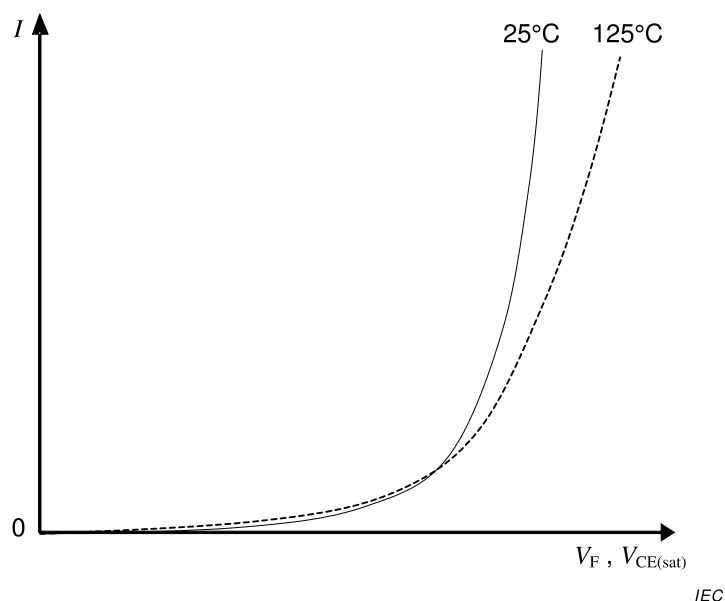


Figure 1 – Tension à l'état passant d'un IGBT ou d'une diode

NOTE 1 La tension à l'état passant V_{CE} d'un IGBT dépend également de la tension grille-émetteur V_{GE} . Pour les valeurs basses de V_{GE} , l'augmentation de V_{GE} diminue la valeur de V_{CE} . Toutefois, au-dessus d'une certaine valeur de V_{GE} , V_{CE} diminue légèrement et l'IGBT est dit "saturé". Dans le cas présent, V_{GE} est supposée suffisamment élevée pour garantir la totale saturation de l'IGBT. Par conséquent, $V_{CE(sat)}$ (la valeur saturée de V_{CE}) peut être utilisée pour le calcul des pertes.

NOTE 2 Sur certains types de dispositifs à semiconducteurs, le courant «de transition» peut être très faible, si bien que pour la plupart des valeurs pratiques de courant, la tension à l'état passant augmente toujours avec la température.

Le calcul des pertes de puissance implique de représenter la tension à l'état passant sous forme mathématique, de manière à pouvoir évaluer les pertes de conduction moyennes au cours d'un cycle complet de la façon suivante:

$$P_{\text{cond}_T} = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} I_T(\omega t) \cdot V_{CE(sat)}(I_T) \cdot d(\omega t) \quad (1)$$

pour un IGBT, ou

$$P_{\text{cond}_D} = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} I_D(\omega t) \cdot V_F(I_D) \cdot d(\omega t) \quad (2)$$

pour une diode.

Les pertes de conduction des semiconducteurs d'une valve complète sont ensuite déterminées en faisant la somme des pertes de conduction calculées de la manière ci-dessus pour chaque IGBT et chaque diode de la valve.

Pour simplifier ce processus, la tension à l'état passant illustrée à la Figure 1 est en général représentée sous la forme d'une approximation linéaire segmentée, avec une tension de seuil V_0 et une résistance de pente R_0 (voir Figure 2).

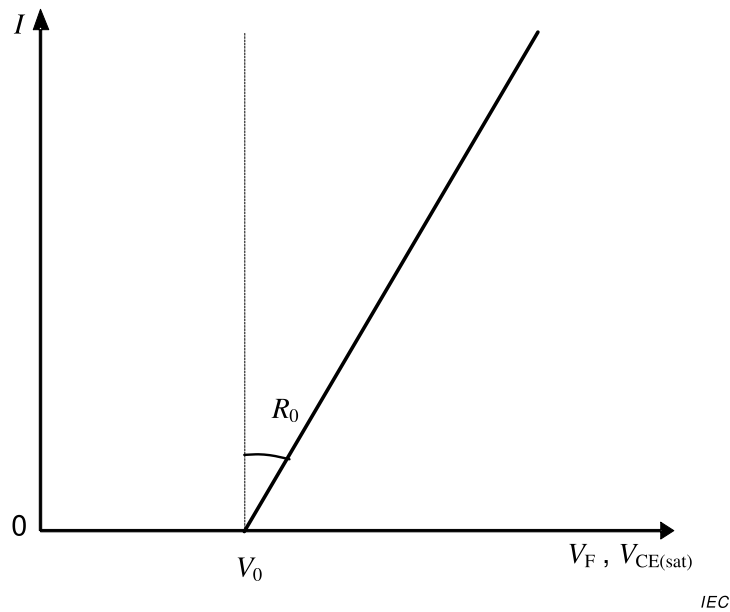


Figure 2 – Représentation linéaire segmentée de la tension à l'état passant de l'IGBT ou de la diode

Suite à cette approximation, les pertes de conduction de chaque dispositif à semiconducteurs sont déterminées à l'aide des courants moyens et efficaces qui traversent le dispositif:

$$P_{\text{cond}} = V_0 \cdot I_{\text{av}} + R_0 \cdot I_{\text{rms}}^2 \tag{3}$$

où

V_0, R_0 sont la tension de seuil et la résistance de pente du dispositif;

I_{av} est le courant moyen dans le dispositif, moyenné sur un cycle de fréquence industrielle.

$$I_{\text{av}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} I(\omega t) \cdot d(\omega t) \tag{4}$$

I_{rms} est le courant efficace dans le dispositif, moyenné sur un cycle de fréquence industrielle.

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} I(\omega t)^2 \cdot d(\omega t)} \tag{5}$$

En général, le mode redresseur donne des pertes de conduction de diode plus importantes, le fonctionnement en mode onduleur donnant des pertes de conduction de l'IGBT plus élevées.

Il est possible d'obtenir une plus grande précision à l'aide d'un modèle plus exact de la tension à l'état passant du dispositif (comme dans la Figure 1) plutôt que d'une approximation linéaire segmentée, puis en procédant à une intégration numérique directe. Toutefois, l'approximation linéaire segmentée est préférable car elle simplifie le processus de calcul, assure une plus grande transparence et permet toujours d'obtenir une plus grande précision, à condition que les mesures utilisées pour la déduire soient réalisées à des valeurs appropriées de courant. Par conséquent, il est recommandé de déterminer V_0 et R_0 en mesurant la tension à l'état passant à 100 % et 33 % du courant assigné du dispositif et en procédant à une extrapolation linéaire.

5.2 Pertes de conduction de l'IGBT

Dans le convertisseur à 2 niveaux, tous les IGBT utilisent le même courant. Par conséquent, les pertes totales de conduction de l'IGBT par valve peuvent être calculées en multipliant la perte de conduction par IGBT par le nombre de niveaux VSC par valve:

$$P_{V1} = N_t \cdot [V_{0T} \cdot I_{Tav} + R_{0T} \cdot I_{Trms}^2] \quad (6)$$

où

N_t est le nombre de niveaux de valve à VSC par valve;

V_{0T} est la tension de seuil de l'IGBT;

R_{0T} est la résistance de pente de l'IGBT;

I_{Tav} est le courant moyen dans l'IGBT;

I_{Trms} est le courant efficace dans l'IGBT.

Les pertes de conduction de l'IGBT dans les convertisseurs multi-niveaux peuvent être évaluées par des principes analogues à ceux présentés ci-dessus pour les convertisseurs à 2 niveaux. Toutefois, la procédure est plus complexe, tous les IGBT d'une même unité de phase n'utilisant pas le même courant.

En général, il est nécessaire de calculer les courants moyen et efficace séparément pour chaque cycle de fonctionnement de l'IGBT, et de multiplier les résultats par le nombre de ces dispositifs dans chaque valve.

5.3 Pertes de conduction de la diode

Dans le convertisseur à 2 niveaux, toutes les diodes utilisent le même courant. Par conséquent, les pertes totales de conduction de la diode par valve peuvent être calculées en multipliant la perte de conduction par diode par le nombre de niveaux VSC par valve:

$$P_{V2} = N_t \cdot [V_{0D} \cdot I_{Dav} + R_{0D} \cdot I_{Drms}^2] \quad (7)$$

où

V_{0D} est la tension de seuil de la diode;

R_{0D} est la résistance de pente de la diode;

I_{Dav} est le courant moyen dans la diode;

I_{Drms} est le courant efficace dans la diode.

Les pertes de la diode dans les convertisseurs multi-niveaux peuvent être calculées par des principes analogues mais, comme indiqué pour les pertes de l'IGBT dans le paragraphe précédent, la procédure est plus complexe, et il est nécessaire de calculer les pertes séparément pour chaque cycle de fonctionnement de la diode.

5.4 Autres pertes de conduction

Les pertes de conduction dans les composants autres que les semiconducteurs et le condensateur de sous-module c.c. (les barres omnibus, par exemple) sont en général limitées. Toutefois, elles peuvent ne pas être négligeables et il convient de les inclure dans le calcul des pertes de la valve. Certaines conceptions de valve requièrent une inductance en série avec chaque valve (inductance de valve), soit sous la forme d'un composant discret, soit répartie dans la valve. Les pertes dans les inductances de valve de ces valves doivent être prises en compte dans les pertes de la valve.

Le calcul de ces pertes est relativement simple et dépend uniquement de la résistance de chaque élément conducteur et du courant efficace qui le traverse.

Si le même courant circule dans tous les éléments conducteurs d'une valve, la valeur de ces pertes par valve est donnée par l'équation suivante:

$$P_{V3} = I_{\text{vrms}}^2 \cdot R_s \quad (8)$$

où

I_{vrms} est le courant efficace dans la valve;

R_s est la résistance totale de tous les éléments conducteurs de la valve, autres que les IGBT et les diodes.

Si tous les éléments conducteurs de la valve ne transportent pas le même courant, il convient d'évaluer les principes ci-dessus séparément pour chaque élément.

6 Pertes dépendant de la tension c.c.

Les pertes dépendant de la tension c.c. sont générées par les courants de fuite à l'état bloqué passant par les IGBT et les diodes, et les composants résistifs de shunt parallèlement aux IGBT et aux diodes. Les composants résistifs de shunt parallèlement aux IGBT et aux diodes peuvent inclure:

- des circuits de répartition des potentiels résistifs (circuits de répartition c.c.);
- des diviseurs de tension résistifs pour mesure de la tension;
- des conduits de refroidissement d'eau;
- des pertes résistives de shunt dans le matériau diélectrique du condensateur;
- des résistances de décharge dans les condensateurs c.c.

Ces pertes sont calculées comme suit:

$$P_{V4} = V_{\text{vrms}}^2 / R_{CC} \quad (9)$$

où

V_{vrms} est la valeur efficace de la tension entre les bornes de la valve;

R_{CC} est la résistance c.c. efficace d'une valve complète.

NOTE Les courants de fuite dans les IGBT et les diodes sont en général très faibles lorsque la valve est à l'état de fonctionnement à vide ou en veille. Toutefois, à l'état de fonctionnement, les courants de fuite peuvent être significatifs en raison des températures de jonction élevées.

7 Pertes dans les condensateurs c.c.

Certains types de valves à VSC comportent des condensateurs c.c. intégrés transportant une composante de courant notable aux fréquences d'harmonique fondamentales ou de rang inférieur. Les pertes de puissance dans les condensateurs des valves de ce type ne sont donc pas négligeables.

En règle générale, les pertes dans les condensateurs c.c. peuvent être divisées en pertes ohmiques et en pertes diélectriques.

Les pertes ohmiques représentent les pertes $I^2 \times R$ dans les composants métalliques du condensateur, notamment les câbles de métallisation de film et les câbles internes.

Les pertes diélectriques d'un condensateur sont liées à la perte énergétique du matériau diélectrique dans chaque cycle de tension. Les pertes diélectriques sont générées par le réalignement périodique des molécules dans l'élément diélectrique au fur et à mesure de la variation de la contrainte de tension pendant le cycle, et s'apparentent à des pertes d'hystérésis dans les matériaux ferromagnétiques.

Les effets des pertes ohmiques et diélectriques sont fréquemment regroupés en un seul terme appelé "résistance-série équivalente" R_{ESR} du condensateur. R_{ESR} dépend de la fréquence, et est associée à la résistance-série interne réelle, mais sans lui être totalement équivalente.

Les pertes totales de condensateur c.c. par valve sont alors calculées comme suit:

$$P_{V5} = \sum_{j=1}^{N_c} I_{\text{crms}_j}^2 \cdot R_{ESR_j} \quad (10)$$

où

N_c est le nombre de condensateurs dans la valve;

I_{crms_j} est le courant efficace qui circule dans le $j^{\text{ème}}$ condensateur c.c. de la valve;

R_{ESR_j} est la résistance-série équivalente du $j^{\text{ème}}$ condensateur c.c. de la valve.

NOTE 1 En règle générale, les pertes diélectriques sont plus significatives dans les applications c.a. pour lesquelles la polarité de tension du condensateur s'inverse deux fois par cycle. Pour les condensateurs c.c., la tension est en général non inversée, et les pertes diélectriques sont donc limitées, mais peuvent ne pas être négligeables selon la technologie de condensateur utilisée.

NOTE 2 Il peut également exister une troisième composante de perte générée par la résistance d'isolement fini du matériau diélectrique, mais elle est généralement très limitée. Elle est couverte par les pertes dépendant de la tension c.c., comme indiqué au paragraphe précédent.

NOTE 3 L'ESR (résistance-série équivalente)² est une grandeur non linéaire dépendant de la fréquence. Pour obtenir des résultats précis, il est important de déterminer l'ESR par des mesures réelles réalisées sur un condensateur du même type que celui utilisé dans la valve, dans les conditions réalistes de tension, de courant et de fréquence.

8 Pertes de commutation

8.1 Généralités

A chaque fois qu'un IGBT est activé ou désactivé ou qu'une diode est désactivée, cela induit une légère énergie de commutation de quelques Joules. Dans la plupart des topologies VSC, ces événements de commutation se produisent plusieurs fois par cycle de fréquence fondamentale. Pour les convertisseurs utilisant la modulation de largeur d'impulsion (PWM)³, en particulier, la perte de commutation qui en résulte (énergie de commutation multipliée par la fréquence de commutation) peut représenter une large proportion des pertes totales de la valve.

Etant donné que différentes topologies de convertisseur utilisent des stratégies de commutation différentes, et que le comportement de commutation dépend des méthodes de commande globales utilisées, seules des lignes directrices générales sur le calcul des pertes de commutation peuvent être données ici. Toutefois, le rapport de calcul des pertes du fabricant doit présenter une justification détaillée de la méthode utilisée.

² *Equivalent series resistance* en anglais.

³ *Pulse-width modulation* en anglais.

8.2 Pertes de commutation de l'IGBT

Lors de l'activation ou de la désactivation d'un IGBT, le dispositif est soumis simultanément à un courant élevé et à une tension élevée dans le cadre du processus de commutation. Il en résulte que l'IGBT induit une dissipation de puissance de crête élevée, dont l'intégrale de temps est connue comme étant l'énergie de commutation. Les énergies de commutation de l'IGBT sont appelées énergie d'activation E_{on} et énergie de désactivation E_{off} . Les pertes de commutation de l'IGBT E_{on} et E_{off} doivent être précisées conformément à l'IEC 60747-9:2007 (6.3.11 et 6.3.12).

Les énergies E_{on} et E_{off} dépendent de manière presque linéaire de la valeur instantanée du courant du collecteur I_C au moment de la commutation (voir Figure 3).

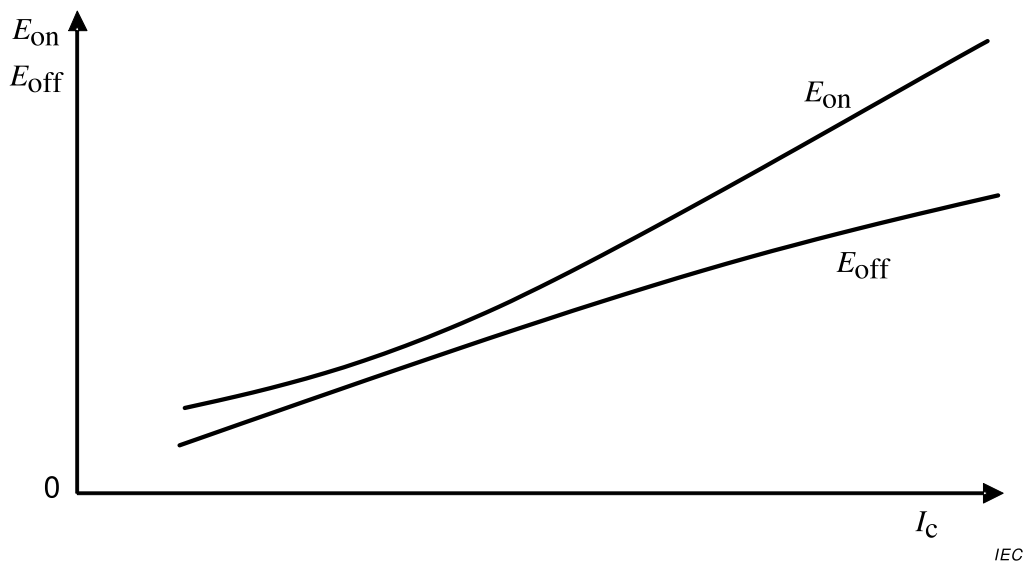


Figure 3 – Energie de commutation de l'IGBT en fonction du courant du collecteur

Les énergies E_{on} et E_{off} sont en général indiquées par le fabricant de l'IGBT comme étant fonction du courant, dans certaines conditions de fonctionnement idéalisées avec une simple conception de la commande de grille et d'une valeur fixe de résistance de grille. La valeur de la résistance de grille influence les pertes de commutation, car elle a un effet sur les temps de charge et de décharge de la capacité de grille, et donc sur la vitesse de commutation.

Par ailleurs, certaines conceptions de VSC, et plus particulièrement les valves de type "commutateur", peuvent utiliser plusieurs conceptions avancées de commande de grille qui intègrent des algorithmes de partage de tension actifs ou circuits "d'amortissement actif". Le circuit de commande de grille de l'IGBT peut également inclure un algorithme de calage de surtension actif permettant de supprimer la surtension transitoire qui apparaît dans l'IGBT après la désactivation. Ces algorithmes ajustent la vitesse de commutation de chaque IGBT afin d'éviter qu'un IGBT de la valve ne fasse l'objet d'une surtension potentiellement nuisible, mais ils peuvent en conséquence donner lieu à des pertes de commutation plus élevées que celles établies par le fabricant de l'IGBT.

Il convient que le fabricant du VSC justifie donc en détail les valeurs de E_{on} et E_{off} utilisées pour le calcul des pertes, en fonction de la conception du circuit de commande de grille, du choix de la résistance de grille (le cas échéant) et de la philosophie adoptée en matière de répartition des potentiels lorsque des IGBT connectés en série sont utilisés.

Les pertes de commutation dépendent également de la tension de liaison c.c. (par IGBT) au moment de la commutation et de la température de jonction. Dans les convertisseurs à 2 et 3 niveaux, la tension de liaison c.c. moyenne par IGBT varie très peu par rapport à la valeur de

conception nominale. Toutefois, pour les convertisseurs multi-niveaux modulaires, la tension de liaison c.c. (fournie ici par le condensateur de sous-module c.c.) peut varier considérablement d'un moment de commutation à l'autre. Par conséquent, il convient d'évaluer les pertes de commutation de l'IGBT avec soin dans ces types de conception, et de calculer la moyenne des pertes de commutation sur plusieurs cycles afin d'obtenir un résultat significatif. Une période de moyennage d'une seconde est proposée pour simplifier l'équation.

Les pertes de commutation totales de l'IGBT par valve sont calculées en faisant la somme de toutes les énergies d'activation E_{on} et de désactivation E_{off} pour tous les niveaux de valve à VSC dans la valve sur une période d'échantillonnage t_s , dont la valeur recommandée est d'une seconde:

$$P_{V6} = \frac{1}{t_s} \cdot \sum_{j=1}^{N_t} \sum_{k=1}^{N_s} (E_{on_j,k}(V,I) + E_{off_j,k}(V,I)) \quad (11)$$

où

t_s est la durée d'échantillonnage;

N_s est le nombre moyen de cycles de commutation (actif + inactif) dont fait l'objet chaque niveau de valve à VSC pendant la durée d'échantillonnage t_s ;

$E_{on_j,k}$ est l'énergie d'activation dissipée dans le ou les IGBT du $j^{\text{ème}}$ niveau de valve à VSC pour le $k^{\text{ème}}$ événement d'activation pendant la durée d'échantillonnage t_s ;

$E_{off_j,k}$ est l'énergie de désactivation dissipée dans le ou les IGBT du $j^{\text{ème}}$ niveau de valve à VSC pour le $k^{\text{ème}}$ événement de désactivation pendant la durée d'échantillonnage t_s .

8.3 Pertes de commutation de la diode

Pour les diodes, l'énergie d'activation est généralement négligeable, la diode assurant la conduction dès sa polarisation dans le sens direct. Toutefois, l'énergie de désactivation (rétablissement) E_{rec} n'est pas négligeable. L'énergie de rétablissement provient de la charge rétablie inverse Q_{rr} qui passe par la diode peu de temps après le passage du courant à zéro. L'énergie de rétablissement augmente avec le courant qui circulait dans la diode avant l'événement de désactivation, même si la relation entre E_{rec} et le courant (voir Figure 4) n'est pas linéaire. E_{rec} peut être exprimée sous la forme d'une fonction linéaire segmentée du courant (comme pour la tension à l'état passant) ou d'une relation de loi exponentielle. Les pertes de commutation de la diode E_{rec} doivent être indiquées conformément à l'IEC 60747-2.

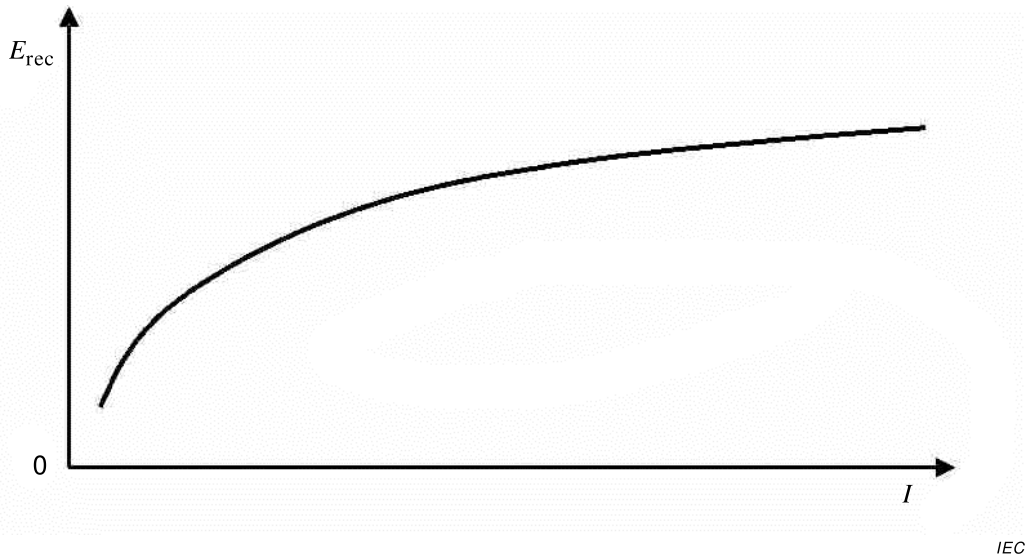


Figure 4 – Energie de rétablissement de la diode en fonction du courant

Les pertes de commutation totales de la diode par valve sont alors calculées en faisant la somme de toutes les énergies de rétablissement E_{rec} pour tous les niveaux de valve de la valve sur une période d'échantillonnage définie t_s :

$$P_{V7} = \frac{1}{t_s} \cdot \sum_{j=1}^{N_t} \sum_{k=1}^{N_s} E_{rec_j,k}(V,I) \tag{12}$$

où

$E_{rec_j,k}$ est l'énergie de rétablissement dissipée de la diode dans la ou les diodes du $j^{\text{ème}}$ niveau de valve à VSC pour le $k^{\text{ème}}$ événement de désactivation de diode pendant la durée d'échantillonnage t_s .

9 Autres pertes

9.1 Pertes du circuit d'amortissement

Certaines conceptions de valve à VSC peuvent utiliser des circuits d'amortissement passif afin de réduire les contraintes d'activation et de désactivation exercées sur les IGBT ou, pour les valves du type «commutateur», pour faciliter le partage de tension.

NOTE 1 Les circuits de partage de tension résistifs ne sont pas considérés comme des "circuits d'amortissement", même s'ils peuvent contribuer au partage de tension. Les pertes dans les circuits de partage de tension résistifs entrent dans la catégorie des pertes dépendant de la tension c.c. (voir l'Article 6).

NOTE 2 Les circuits «d'amortissement actif», dans lesquels la commande de grille de l'IGBT ajuste la vitesse de commutation de chaque IGBT afin de limiter les erreurs de répartition de tension, sont abordés dans "Pertes de commutation de l'IGBT" de 8.2.

Les circuits d'amortissement peuvent être conçus pour faciliter l'activation et/ou la désactivation. A chaque événement de commutation, le circuit d'amortissement dissipe une énergie E_{sn_on} (pour un circuit d'amortissement d'activation) ou E_{sn_off} (pour un circuit d'amortissement de désactivation). Un circuit d'amortissement peut être conçu de plusieurs façons, mais en principe, les pertes du circuit d'amortissement sont calculées en multipliant l'énergie dissipée dans le circuit d'amortissement par la fréquence d'occurrence des événements de dissipation dans la valve de manière analogue à celle utilisée pour les pertes de commutation de l'IGBT et de la diode:

$$P_{V8} = \frac{1}{t_s} \cdot \sum_{j=1}^{N_t} \sum_{k=1}^{N_s} (E_{sn_on_j,k}(V,I) + E_{sn_off_j,k}(V,I)) \quad (13)$$

où

$E_{sn_on_j,k}$ est l'énergie dissipée dans le ou les circuits d'amortissement du $j^{\text{ème}}$ niveau de valve à VSC pour le $k^{\text{ème}}$ événement d'activation de l'IGBT associé pendant la durée d'échantillonnage t_s ;

$E_{sn_off_j,k}$ est l'énergie dissipée dans le ou les circuits d'amortissement du $j^{\text{ème}}$ niveau de valve à VSC pour le $k^{\text{ème}}$ événement de désactivation de l'IGBT associé pendant la durée d'échantillonnage t_s .

Dans l'idéal, il convient de déterminer les valeurs de E_{sn_on} et E_{sn_off} par des mesures directes réalisées sur un circuit d'amortissement réel, dans le cadre d'un essai de caractérisation. Toutefois, étant donné que les performances du circuit d'amortissement sont affectées par les caractéristiques de commutation des dispositifs à semiconducteurs, et inversement, il est également nécessaire que l'essai représente les dispositifs à semiconducteurs. Il convient de noter que cette approche ne permet pas de faire la distinction entre les mesures des énergies d'amortissement et des énergies de commutation du semiconducteur. Par conséquent, lorsque les pertes du circuit d'amortissement sont déterminées par des mesures, il peut s'avérer nécessaire de considérer l'essai comme étant un essai combiné de l'énergie d'amortissement et de l'énergie de commutation, et donc de combiner le calcul de P_{V8} à celui de P_{V6} et de P_{V7} .

9.2 Consommation de puissance de l'électronique de valve

La consommation de puissance totale de l'électronique de valve par valve est calculée en multipliant la perte de puissance par niveau de valve par le nombre de niveaux de valve par valve:

$$P_{V9} = P_{GU} \cdot N_t \quad (14)$$

où:

P_{GU} est la consommation de puissance totale des unités de grille, des circuits d'alimentation électrique et des autres circuits auxiliaires dans un niveau de valve à VSC.

NOTE Si l'électronique de valve déduit sa puissance d'un circuit d'amortissement passif, la consommation de puissance de l'électronique de valve peut déjà être prise en compte dans les pertes du circuit d'amortissement (voir le paragraphe précédent).

10 Pertes totales de la valve par poste de convertisseur

Les pertes totales par valve sont calculées en faisant la somme des contributions P_{V1} à P_{V9} :

$$P_{VT} = \sum_{i=1}^9 P_{Vi} \quad (15)$$

Les pertes totales de la valve à VSC par poste de convertisseur sont égales aux pertes par valve, P_{VT} multipliées par le nombre de valves du poste de convertisseur.

NOTE Certaines topologies de convertisseur multi-niveaux contiennent plusieurs types de valves ou des valves présentant des cycles de fonctionnement différents. Dans ces cas, la procédure ci-dessus est évaluée séparément pour chaque type de valve ou de cycle de fonctionnement.

Le Tableau 1 comporte une matrice indiquant les sources des données nécessaires au calcul des différents types de pertes de la valve.

Tableau 1 – Matrice indiquant la relation des données nécessaires au calcul des pertes et le type de pertes de la valve (1 sur 2)

Données nécessaires au calcul des pertes	Source			Type de pertes de la valve								
	Essais individuels de série	Essais de caractérisation	Spécifié par le fabricant du VSC	Pertes de conduction de l'IGBT (P_{V1})	Pertes de conduction de la diode (P_{V2})	Autres pertes de conduction (P_{V3})	Pertes dépendant de la tension c.c. (P_{V4})	Pertes dans les condensateurs c.c. (P_{V5})	Pertes de commutation de l'IGBT (P_{V6})	Pertes de commutation de la diode (P_{V7})	Pertes du circuit d'amortissement (P_{V8})	Consommation de puissance de l'électronique de valve (P_{V9})
Tension à l'état passant $V_{CE(sat)}$ de l'IGBT dans les conditions de référence normalisées.	x			x								
Tension à l'état passant $V_{CE(sat)}$ de l'IGBT en fonction du courant et de la température.		x		x								
Tension directe V_F de la diode dans les conditions de référence normalisées.	x				x							
Tension directe V_F de la diode en fonction du courant et de la température		x			x							
Résistance totale de tous les éléments conducteurs de la valve R_s			x			x						
Résistance c.c. efficace d'une valve R_{CC} complète			x				x					
ESR du condensateur c.c. en fonction de la fréquence		x						x				
Energie d'activation E_{on} de l'IGBT dans les conditions de référence normalisées.	x								x			
Energie d'activation E_{on} de l'IGBT en fonction du courant, de la tension, de la température, de l'inductance de commutation et des paramètres de la commande de grille		x							x			

Annexe A (informative)

Détermination des pertes de puissance dans d'autres équipements du poste CCHT

A.1 Généralités

Pour la majorité des équipements d'un poste CCHT à VSC, à l'exception des valves du convertisseur, il est possible de déterminer les pertes de puissance de manière analogue à celle spécifiée dans l'IEC 61803 pour un poste CCHT muni de convertisseurs commutés par le réseau (LCC⁴). Il existe néanmoins quelques différences. Comme il n'existe actuellement aucune norme de calcul des pertes de puissance de ces équipements pour un poste CCHT à VSC, la présente annexe a pour objet de décrire les principales différences qui existent entre la pratique adoptée dans l'IEC 61803 pour un poste CCHT à LCC et la méthode adoptée pour un poste CCHT à VSC. De manière générale, les principales différences proviennent du spectre d'harmonique différent émis par les postes CCHT à LCC et à VSC. Les convertisseurs commutés par le réseau génèrent des amplitudes très élevées de courants d'harmonique de caractéristique de rang relativement inférieur du côté c.a. (11^{ème}, 13^{ème}, 23^{ème}, 25^{ème}...) et des tensions d'harmonique du côté c.c. (12^{ème}, 24^{ème}, 36^{ème}...). Les convertisseurs de source de tension produisent en général de beaucoup plus petites quantités de ces harmoniques de rang inférieur, mais ils peuvent générer des niveaux plus élevés d'harmoniques de rang supérieur.

Si la valve du convertisseur est de type «commutateur» (convertisseurs à 2 et 3 niveaux à modulation de largeur d'impulsion, par exemple), le convertisseur produit en général de grandes quantités d'harmoniques à la fréquence PWM, et leurs multiples et bandes latérales. Dans ces convertisseurs, la plage d'harmoniques considérée dans l'IEC 61803 (de l'harmonique fondamentale à la 49^{ème} du côté c.a. et de la 12^{ème} à la 48^{ème} harmonique du côté c.c.) peut ne pas être suffisamment large, et il peut s'avérer nécessaire d'étendre la limite supérieure (jusqu'à la 100^{ème} harmonique, par exemple).

Les convertisseurs de source de tension dont les valves sont du type «source de tension commandable» (convertisseur multi-niveaux modulaire et convertisseur à deux niveaux monté en cascade, par exemple) ne produisent en général que de faibles quantités de distorsion harmonique ce qui, dans la plupart des cas, ne nécessite aucun filtrage.

La Figure A.1 présente un schéma monophasé type d'un poste CCHT à VSC. Il convient de souligner que tous les postes ne sont pas nécessairement dotés de tous les composants présentés à la Figure A.1, et qu'inversement, certains postes à VSC peuvent devoir satisfaire à l'exigence de disposer d'équipements supplémentaires qui ne sont pas représentés à la Figure A.1.

A.2 Lignes directrices pour le calcul des pertes dans chaque équipement

A.2.1 Disjoncteur

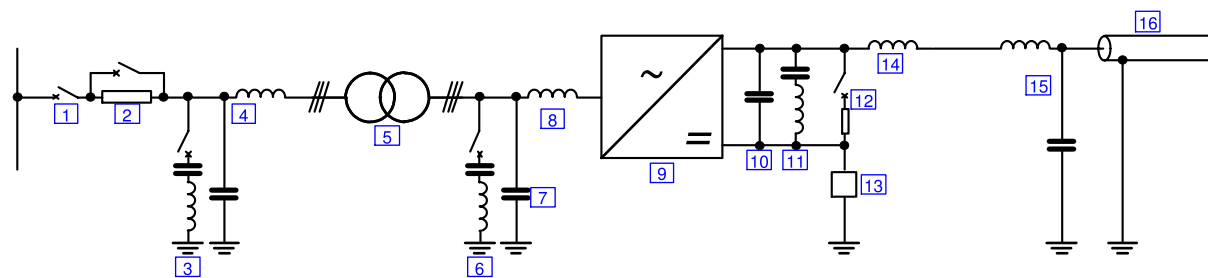
Les pertes de puissance dans le disjoncteur sont en principe ignorées.

A.2.2 Résistance de pré-insertion

Certains systèmes à VSC contiennent une résistance de pré-insertion dans la connexion c.a. au convertisseur, qui est shuntée par un disjoncteur ou un sectionneur après avoir totalement chargé les condensateurs c.c. à VSC et les condensateurs c.c. de sous-module/de cellule.

⁴ *Line-commutated converters* en anglais.

Toutefois, ce système ne contribue pas aux pertes en régime permanent et n'est pas à prendre en compte pour l'évaluation des pertes.



IEC

Légende

1	disjoncteur	10	condensateur c.c. à VSC ^c
2	résistance de pré-insertion	11	filtre d'harmonique c.c.
3	filtre d'harmonique côté réseau	12	système à freinage dynamique
4	filtre haute fréquence côté réseau	13	branche de mise à la terre du point neutre ^d
5	transformateur d'interface	14	inductance c.c.
6	filtre d'harmonique côté convertisseur	15	filtre haute fréquence côté c.c.
7	filtre haute fréquence côté convertisseur ^a	16	câble c.c. ou ligne de transport aérienne
8	inductance de phase ^a		
9	unité VSC ^b		

^a Dans certaines conceptions de VSC, l'inductance de phase peut remplir une partie des fonctions du filtre haute fréquence côté convertisseur.

^b Dans certaines topologies VSC, chaque valve de l'unité VSC peut comprendre une «inductance de valve» qui peut être intégrée dans la valve ou fournie comme un composant séparé.

^c Dans certaines conceptions de VSC, le condensateur c.c. à VSC peut être en partie ou en totalité réparti entre les trois unités de phase de l'unité VSC, auquel cas il est appelé condensateur de sous-module c.c.

^d La philosophie et l'emplacement de la branche de mise à la terre du point neutre peuvent être différents selon la conception de l'unité VSC.

Figure A.1 – Principaux composants susceptibles de composer un poste à VSC

A.2.3 Filtre d'harmonique côté réseau

Les pertes dans le filtre d'harmonique côté réseau, lorsqu'il est installé, peuvent être calculées selon une méthode analogue au calcul des pertes dans les filtres c.a. d'un poste CCHT à LCC (voir 5.3 de l'IEC 61803:1999 et l'IEC 61803:1999/AMD1:2010). Toutefois, il convient de noter que, comparés aux filtres d'harmonique c.a. d'un poste CCHT à LCC, les filtres c.a. d'un poste à VSC présentent généralement un MVar beaucoup plus faible et, par conséquent, un condensateur plus petit par rapport aux inductances de réglage et aux résistances d'amortissement.

A.2.4 Filtre haute fréquence côté réseau

Les pertes dans le filtre haute fréquence côté réseau, lorsqu'il est installé, peuvent être calculées selon une méthode analogue au calcul des pertes dans les filtres série c.a. d'un poste CCHT à LCC (voir 5.9 de l'IEC 61803:1999 et l'IEC 61803:1999/AMD1:2010), mais en notant la possible nécessité d'étendre la plage des rangs d'harmonique considérée.

A.2.5 Transformateur d'interface

Le transformateur d'interface s'apparente au transformateur de convertisseur d'un poste CCHT à LCC, et est généralement le deuxième plus grand contributeur aux pertes de l'ensemble du poste, après les valves à VSC.

Les pertes de puissance dans le transformateur d'interface peuvent être calculées de manière analogue à la méthode donnée au 5.2 de l'IEC 61803:1999, l'IEC 61803:1999/AMD1:2010 et

l'IEC 61803:1999/AMD2:2016, mais en notant la possible nécessité d'étendre la plage des rangs d'harmonique considérée.

A.2.6 Filtre d'harmonique côté convertisseur

Les pertes dans le filtre d'harmonique côté convertisseur, lorsqu'il est installé, peuvent être calculées selon une méthode analogue à celle indiquée pour le filtre d'harmonique côté réseau (A.2.3 ci-dessus).

A.2.7 Filtre haute fréquence côté convertisseur

Les pertes dans le filtre haute fréquence côté convertisseur, lorsqu'il est installé, peuvent être calculées selon une méthode analogue à celle indiquée pour le filtre haute fréquence côté réseau (A.2.4 ci-dessus).

A.2.8 Inductance de phase

L'inductance de phase utilisée dans certains postes à VSC n'a aucun équivalent direct dans un poste CCHT à LCC. Elle transporte essentiellement le courant de fréquence fondamentale, mais dans les convertisseurs dotés de valves de type «commutateur», elle est exposée à des niveaux élevés de courants et de tensions harmoniques provenant du convertisseur. Dans de tels cas, l'inductance peut nécessiter une conception particulière visant à éliminer les problèmes d'interférence électromagnétique ou de réchauffement provoqués par les effets pelliculaires et de proximité. Les principes généraux présentés dans l'IEC 61803:1999, l'IEC 61803:1999/AMD1:2010 et l'IEC 61803:1999/AMD2:2016 (5.2, 5.3.3 et 5.6 étant les plus pertinents) peuvent faire office de lignes directrices, mais il convient de déterminer les pertes dans ces inductances avec beaucoup de précaution.

Si le convertisseur est doté de valves de type "source de tension commandable", la conception de l'inductance de phase peut être plus conventionnelle (en général dans l'air) ou peut être ignorée. Dans de tels cas, les pertes dans l'inductance de phase peuvent être calculées selon une méthode analogue au calcul des pertes dans les inductances de filtre c.a. d'un poste CCHT à LCC (voir 5.3.3 de l'IEC 61803:1999 et l'IEC 61803:1999/AMD1:2010). Dans ce type de conception, le contenu harmonique du courant d'inductance est en principe très faible.

A.2.9 Unité VSC

L'unité VSC est composée des valves à VSC couvertes par la présente norme et, dans certaines topologies, l'unité VSC comprend également des inductances de valve. Les pertes dans les inductances de valve, lorsqu'elles sont installées, peuvent être calculées selon une méthode analogue à celle indiquée pour les inductances de filtre c.a. (5.3.3 de l'IEC 61803:1999/AMD1:2010).

A.2.10 Condensateur c.c. à VSC

Le condensateur c.c. à VSC utilisé dans certains postes à VSC n'a pas d'équivalent direct dans un poste CCHT à LCC, même s'il s'apparente à la partie capacitive du filtre c.c. Ses pertes de puissance peuvent être calculées selon une méthode analogue au calcul des pertes dans le condensateur de filtre c.c. d'un poste CCHT à LCC (voir 5.7.2 de l'IEC 61803:1999).

NOTE Les condensateurs c.c. de sous-module qui équipent certaines conceptions de valve sont considérés comme faisant partie intégrante de la valve et sont couverts par la présente norme.

A.2.11 Filtre d'harmonique c.c.

Les pertes de puissance dans le filtre d'harmonique c.c., lorsqu'il est installé, peuvent être calculées de manière analogue à la méthode donnée au 5.7 de l'IEC 61803:1999/AMD1:2010, mais en notant la possible nécessité d'étendre la plage des rangs d'harmonique considérée.

A.2.12 Système à freinage dynamique

Certains systèmes à VSC peuvent inclure un système à freinage dynamique pour la commande active de la surtension c.c., particulièrement lors d'événements de rejet de charge se produisant lors de l'importation de puissance depuis un système de génération c.a. isolé. En règle générale, le système à freinage dynamique est composé d'une valve d'électronique de puissance (valve à freinage dynamique) dont la construction est analogue à celle des valves principales du convertisseur, et d'une grande résistance de freinage. Dans certaines conceptions, la résistance de freinage peut être intégrée à la valve à freinage dynamique, par opposition aux éléments séparés de l'équipement.

Il n'est pas nécessaire de tenir compte des pertes dans le système à freinage dynamique, lorsqu'il fonctionne pour réduire la tension c.c., pour la détermination globale des pertes, ces événements étant rares et de très courte durée. Toutefois, il convient de tenir compte des pertes en régime permanent du système à freinage dynamique.

En régime permanent, les pertes dans la partie résistive du système à freinage dynamique peuvent en général être ignorées. De même, les pertes de conduction et les pertes de condensateur c.c. de la valve à freinage dynamique peuvent être ignorées. Toutefois, la valve à freinage dynamique induit en général des pertes dépendant de la tension c.c. (Article 6) et la consommation de puissance de l'électronique de valve (9.2). Certains types de valve peuvent également induire des pertes du circuit d'amortissement (9.1) et des pertes de commutation (Article 8).

Il convient de calculer les pertes dans la valve à freinage dynamique en régime permanent en s'appuyant sur les articles correspondants de la présente norme.

A.2.13 Branche de mise à la terre du point neutre

La branche de mise à la terre du point neutre utilisée dans certains postes à VSC n'a aucun équivalent direct dans un poste CCHT à LCC. Elle est utilisée dans certains systèmes à VSC monopolaires symétriques pour fournir une référence de terre du côté valve du transformateur d'interface. Elle est en général composée d'une inductance shunt triphasée d'impédance relativement élevée. Ses pertes peuvent être calculées selon la même méthode que celle donnée pour les inductances shunt du 5.5 de l'IEC 61803:1999 et l'IEC 61803:1999/AMD1:2010.

A.2.14 Inductance c.c.

Les pertes de puissance dans l'inductance c.c., lorsqu'elle est installée, peuvent être calculées de manière analogue à la méthode donnée au 5.6 de l'IEC 61803:1999 et l'IEC 61803:1999/AMD1:2010, mais en notant la possible nécessité d'étendre la plage des rangs d'harmonique considérée.

Toutefois, il convient de noter que l'inductance c.c. du poste à VSC est en général légèrement inférieure à celle de son homologue du poste à LCC, et en principe de construction dans l'air.

A.2.15

A.2.16 Filtre haute fréquence côté c.c.

Les pertes dans le filtre haute fréquence côté c.c., lorsqu'il est installé, peuvent être calculées selon une méthode analogue au calcul des pertes dans les filtres série c.c. d'un poste CCHT à LCC (voir 5.9 de l'IEC 61803:1999, l'IEC 61803:1999/AMD1:2010 et l'IEC 61803:1999/AMD2:2016), mais en notant la possible nécessité d'étendre la plage des rangs d'harmonique considérée.

A.2.17 Câble c.c. ou ligne de transport aérienne

Les pertes de puissance du câble c.c. ou de la ligne de transport aérienne n'entrent pas dans le domaine d'application de la présente norme.

A.3 Pertes des équipements auxiliaires et du poste en service

Les pertes de puissance dans les équipements auxiliaires et le poste en service peuvent être calculées selon la même méthode que le calcul des pertes dans les équipements auxiliaires et le poste en service d'un poste CCHT à LCC (voir 5.8 de l'IEC 61803:1999 et l'IEC 61803:1999/AMD1:2010). Il n'existe aucune différence significative entre les technologies VSC et LCC à cet égard.

Bibliographie

IEC 60747-1, *Dispositifs à semiconducteurs – Partie 1: Généralités*

IEC 61803:1999, *Détermination des pertes en puissance dans les postes de conversion en courant continu à haute tension (CCHT)*

IEC 61803:1999/AMD1:2010

IEC 61803:1999/AMD2:2016

IEC TR 62543, *High-voltage direct current (HVDC) power transmission using voltage sourced converters (VSC)* (disponible en anglais seulement)

VSC Transmission, CIGRÉ Technical Brochure No. 269

Component Testing of VSC System for HVDC Applications, CIGRÉ Technical Brochure No. 447

Voltage Source Converter (VSC) HVDC for Power Transmission – Economic Aspects and Comparison with other AC and DC Technologies, CIGRÉ Technical Brochure No. 492

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