

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

**Superconductivity –
Part 8: AC loss measurements – Total AC loss measurement of round
superconducting wires exposed to a transverse alternating magnetic field
at liquid helium temperature by a pickup coil method**

**Supraconductivité –
Partie 8 : Mesure des pertes en courant alternatif – Mesure de la perte totale en
courant alternatif des fils supraconducteurs ronds exposés à un champ
magnétique alternatif transverse par une méthode par bobines de détection**



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2014 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
Fax: +41 22 919 03 00
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 - www.iec.ch/searchpub

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 more than 30 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in 14 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

IEC Glossary - std.iec.ch/glossary

More than 55 000 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: csc@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 - www.iec.ch/searchpub

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 plus de 30 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 14 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

Glossaire IEC - std.iec.ch/glossary

Plus de 55 000 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: csc@iec.ch.

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Superconductivity –

Part 8: AC loss measurements – Total AC loss measurement of round superconducting wires exposed to a transverse alternating magnetic field at liquid helium temperature by a pickup coil method

Supraconductivité –

Partie 8 : Mesure des pertes en courant alternatif – Mesure de la perte totale en courant alternatif des fils supraconducteurs ronds exposés à un champ magnétique alternatif transverse par une méthode par bobines de détection

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX



ICS 17.220

ISBN 978-2-8322-1467-1

**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.**

CONTENTS

FOREWORD.....	4
INTRODUCTION.....	6
1 Scope.....	7
2 Normative references	7
3 Terms and definitions	7
4 Principle	9
5 Apparatus.....	10
5.1 Testing apparatus	10
5.2 Pickup coils	10
5.3 Compensation circuit.....	10
6 Specimen preparation.....	11
6.1 Coiled specimen.....	11
6.1.1 Winding of specimen	11
6.1.2 Configuration of coiled specimen	11
6.1.3 Maximum bending strain.....	11
6.1.4 Treatment of terminal cross section of specimen	11
6.2 Specimen coil form.....	11
7 Testing conditions	11
7.1 External applied magnetic field.....	11
7.1.1 Amplitude of applied field	11
7.1.2 Direction of applied field	11
7.1.3 Waveform of applied field	12
7.1.4 Frequency of applied field	12
7.1.5 Uniformity of applied field	12
7.2 Setting of the specimen	12
7.3 Measurement temperature.....	12
7.4 Test procedure	12
7.4.1 Compensation	12
7.4.2 Measurement of background loss	12
7.4.3 Loss measurement	13
7.4.4 Calibration.....	13
8 Calculation of results	13
8.1 Amplitude of applied magnetic field	13
8.2 Magnetization.....	13
8.3 Magnetization curve	14
8.4 AC loss	14
8.5 Hysteresis loss.....	14
8.6 Coupling loss and coupling time constant [5,6]	14
9 Uncertainty.....	14
9.1 General.....	14
9.2 Uncertainty of measurement apparatus	15
9.3 Uncertainty of applied field	15
9.4 Uncertainty of measurement temperature	15
10 Test report.....	15
10.1 Identification of specimen.....	15
10.2 Configuration of coiled specimen.....	15

10.3	Testing conditions	16
10.4	Results	16
10.5	Measurement apparatus	16
10.5.1	Pickup coils	16
10.5.2	Measurement system.....	17
Annex A (informative)	Additional information relating to Clauses 1 to 10	19
Annex B (informative)	Explanation of AC loss measurement with Poynting's vector [10]	21
Annex C (informative)	Estimation of geometrical error in the pickup coil method	22
Annex D (informative)	Recommended method for calibration of magnetization and AC loss.....	23
Annex E (informative)	Coupling loss for various types of applied magnetic field.....	25
Annex F (informative)	Uncertainty considerations	26
Annex G (informative)	Evaluation of uncertainty in AC loss measurement by pickup coil method [13]	31
Bibliography.....		34
Figure 1	– Standard arrangement of the specimen and pickup coils	17
Figure 2	– A typical electrical circuit for AC loss measurement by pickup coils.....	18
Figure C.1	– Examples of calculated contour line map of the coefficient G	22
Figure D.1	– Evaluation of critical field from magnetization curves	24
Figure E.1	– Waveforms of applied magnetic field with a period $T = 1/f$	25
Table F.1	– Output signals from two nominally identical extensometers	27
Table F.2	– Mean values of two output signals.....	27
Table F.3	– Experimental standard deviations of two output signals.....	27
Table F.4	– Standard uncertainties of two output signals	28
Table F.5	– Coefficient of variations of two output signals.....	28
Table G.1	– Propagation of relative uncertainty in the pickup coil method ($\alpha = 0,5$).....	33

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

SUPERCONDUCTIVITY –

**Part 8: AC loss measurements –
Total AC loss measurement of round
superconducting wires exposed to a transverse alternating
magnetic field at liquid helium temperature by a pickup coil method**

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.

International Standard IEC 61788-8 has been prepared by IEC technical committee 90: Superconductivity.

This bilingual version (2014-03) corresponds to the monolingual English version, published in 2010-06.

This second edition cancels and replaces the first edition published in 2003. This edition constitutes a technical revision.

The main changes with respect to the previous edition are listed below:

- extending the applications of the pickup coil method to the a.c. loss measurements in metallic and oxide superconducting wires with a round cross section at liquid helium temperature,
- u1 in accordance with the decision at the June 2006 IEC/TC90 meeting in Kyoto.

The text of this standard is based on the following documents:

FDIS	Report on voting
90/243/FDIS	90/249/RVD

Full information on the voting for the approval of this standard can be found in the report on voting indicated in the above table.

The French version of this standard has not been voted upon.

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

A list of all parts of the IEC 61788 series, under the general title: *Superconductivity*, can be found on the IEC website.

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

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

INTRODUCTION

Magnetometer and pickup coil methods are proposed for measuring the AC losses of composite superconducting wires in transverse time-varying magnetic fields. These represent initial steps in standardization of methods for measuring the various contributions to AC loss in transverse fields, the most frequently encountered configuration.

It was decided to split the initial proposal mentioned above into two documents covering two standard methods. One of them describes the magnetometer method for hysteresis loss and low frequency (or sweep rate) total AC loss measurement, and the other describes the pickup coil method for total AC loss measurement in higher frequency (or sweep rate) magnetic fields. The frequency range is 0 Hz to 0,06 Hz for the magnetometer method and 0,005 Hz to 60 Hz for the pickup coil method. The overlap between 0,005 Hz and 0,06 Hz is a complementary frequency range for the two methods.

This standard covers the pickup coil method. The test method for standardization of AC loss covered in this standard is partly based on the Versailles Project on Advanced Materials and Standards (VAMAS) pre-standardization work on the AC loss of Nb-Ti composite superconductors [1]¹⁾.

1) Numbers in square brackets refer to the bibliography.

SUPERCONDUCTIVITY –

Part 8: AC loss measurements – Total AC loss measurement of round superconducting wires exposed to a transverse alternating magnetic field at liquid helium temperature by a pickup coil method

1 Scope

This part of IEC 61788 specifies the measurement method of total AC losses by the pickup coil method in composite superconducting wires exposed to a transverse alternating magnetic field. The losses may contain hysteresis, coupling and eddy current losses. The standard method to measure only the hysteresis loss in DC or low-sweep-rate magnetic field is specified in IEC 61788-13 [2].

In metallic and oxide round superconducting wires expected to be mainly used for pulsed coil and AC coil applications, AC loss is generated by the application of time-varying magnetic field and/or current. The contribution of the magnetic field to the AC loss is predominant in usual electromagnetic configurations of the coil applications. For the superconducting wires exposed to a transverse alternating magnetic field, the present method can be generally used in measurements of the total AC loss in a wide range of frequency up to the commercial level, 50/60 Hz, at liquid helium temperature. For the superconducting wires with fine filaments, the AC loss measured with the present method can be divided into the hysteresis loss in the individual filaments, the coupling loss among the filaments and the eddy current loss in the normal conducting parts. In cases where the wires do not have a thick outer normal conducting sheath, the main components are the hysteresis loss and the coupling loss by estimating the former part as an extrapolated level of the AC loss per cycle to zero frequency in the region of lower frequency, where the coupling loss per cycle is proportional to the frequency.

2 Normative references

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

IEC 60050-815:2000, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Part 815: Superconductivity*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the following terms and definitions, as well as those of IEC 60050-815, apply.

3.1

AC loss

P

power dissipated in a composite superconductor due to application of time-varying magnetic field or electric current

[IEC 60050-815:2000, 815-04-54]

3.2 hysteresis loss

P_h

loss of the type whose value per cycle is independent of frequency arising in a superconductor under a varying magnetic field

NOTE This loss is caused by the irreversible magnetic properties of the superconducting material due to pinning of flux lines.

[IEC 60050-815:2000, 815-04-55]

3.3 eddy current loss

P_e

loss arising in the normal conducting matrix of a composite superconductor or the structural material when exposed to a varying magnetic field, either from an applied field or from a self-field

[IEC 60050-815:2000, 815-04-56, modified]

3.4 (filament) coupling (current) loss

P_c

loss arising in multi-filamentary superconducting wires with a normal matrix due to coupling current

[IEC 60050-815:2000, 815-04-59]

3.5 (filament)coupling time constant

τ

characteristic time constant of coupling current directed perpendicularly to filaments within a strand for low frequencies

[IEC 60050-815:2000, 815-04-60]

3.6 shielding current

current induced by an external magnetic field applied to a superconductor and which includes coupling current and eddy current after a field change in composite superconductors

3.7 critical (magnetic) field strength

H_c

magnetic field strength corresponding to the superconducting condensation energy at zero magnetic field strength

[IEC 60050-815:2000, 815-01-21]

3.8 magnetization (of a superconductor)

magnetic moment divided by the volume of the superconductor

NOTE The macroscopic magnetic moment is also equal to the product of the shielding current and the area of the closed path in a composite superconductor together with the magnetic moment of any penetrated trapped flux.

3.9 magnetization method for AC loss

method to determine the AC loss of materials from the area of the loop of the magnetization curve

NOTE When pickup coils are used to measure the change in flux, which is then integrated to get the magnetization of stationary coiled specimens, the method is called the pickup coil method.

[IEC 60050-815:2000, 815-08-15, modified]

3.10 pickup coil method

method to determine the AC loss of materials by evaluating electromagnetic power flow into the materials by pickup coils

NOTE The pickup coil arrangement consists essentially of a primary winding (a superconducting magnet supplied with a time varying current) and a pair of secondary windings (pickup coils), one of which (the main pickup coil) contains the specimen to be measured and the other (the compensation coil) plays two roles: 1) it compensates the signal from the main pickup coil when empty; 2) it supplies the field sweep information.

Here the coaxial and concentric arrangement of the pickup coils as shown in Figure 1 is used as the standard one for the AC loss measurement. In order to obtain sufficient volume of the wire specimen to be measured and at the same time to expose it to a transverse magnetic field, it must be wound into a coil. The specimen so prepared is also referred to as the "coiled specimen".

3.11 background loss

apparent loss obtained by the pickup coil method in the case where no specimen is located inside the pickup coils

NOTE The background loss gives the experimental error in the system of the AC loss measurement by the pickup coil method. It results from phase shift of electrical signal in the compensation process, an additional magnetic moment induced in many components of experimental hardware, and external noise. The background loss can be reduced by adjusting the experimental setup and compensated by subtracting it from measured AC loss as shown in 7.4.2.

3.12 effective cross-sectional area of the coiled specimen

total specimen volume divided by the larger of the specimen coil height or the pickup coil height

3.13 bending strain

ε_b

strain in percent arising from pure bending defined as $\varepsilon_b = 100 r / R$, where r is a half of the specimen thickness and R is the bending radius

[IEC 60050-815:2000, 815-08-03]

NOTE In the pickup coil method, the coiled specimen by react and wind technique is prepared with an attention to the permissive level of bending strain.

3.14 n -value (of a superconductor)

n

exponent obtained in a specific range of electric field strength or resistivity when the voltage current $U(I)$ curve is approximated by the equation $U \propto I^n$

[IEC 60050-815:2000, 815-03-10]

4 Principle

The test consists of applying an alternating transverse magnetic field to a specimen and detecting the magnetic moment of shielding currents induced in the specimen by means of pickup coils for the purpose of estimating the AC losses defined in 3.1.

5 Apparatus

5.1 Testing apparatus

The testing apparatus shall be constructed such that the pickup coils and a coiled specimen are arranged in a uniform alternating magnetic field applied by a superconducting magnet.

The coils of the testing apparatus are arranged as described below. Typically, the main pickup and compensation coils are coaxially positioned on the outside and inside of the coiled specimen, respectively.

The applied alternating magnetic field shall have a high uniformity as shown in 7.1.5.

The testing apparatus has a sub-system that calculates the magnetization and the AC loss of the specimen by integrating the signal of the pickup coils. A typical electrical circuit for the AC loss measurement is given in Figure 2.

5.2 Pickup coils

Pickup coils shall be made of very fine insulated wire, such as insulated copper wire with a diameter of 0,1 mm, to avoid eddy currents at low temperatures.

The pickup coil formers shall be made of non-metallic and non-magnetic material such as glass fiber reinforced plastic, phenol resin, etc.

The main pickup coil shall be arranged coaxially and adjusted concentrically outside the compensation coil. The standard arrangement is shown schematically in Figure 1, where the height of the compensation coil is the same as that of the main pickup coil. The number of turns in the compensation coil shall be usually adjusted to be a little larger than the balance level in which the total interlinkage flux of the applied magnetic field into the compensation coil is equal to that into the main pickup coil.

The pickup coil system shall be constructed so that the coiled specimen can be taken in and out easily from the system.

The pickup coil method has geometrical errors in relation with the arrangement of the coiled specimen and the pickup coils. The geometrical error is mentioned briefly in Annex C. To achieve a low uncertainty due to geometrical effects of less than 1 %, the following arrangement for the coiled specimen and the two pickup coils shall be the standard one; a height of 30 mm for the coiled specimen, a height of 10 mm for the pickup coils, a coil radius of 18 mm for the specimen, and a 2 mm difference between the radii of the specimen and each pickup coil. In the case where the arrangement of the specimen and pickup coils are a little different from the above standard one, the geometrical error in the arrangement shall be estimated, as shown in Annex C. If the geometrical error cannot be estimated quantitatively, the calibration indicated in Annex D may need to be performed.

5.3 Compensation circuit

The total interlinkage flux of the applied field in the compensation coil is usually a little larger than that in the main pickup coil by adjusting the number of turns. The signal from the main pickup coil is counterbalanced against a reduced signal of the compensation coil by means of the compensation circuit. For delicate adjustment of the reduction ratio, called the compensation coefficient, the compensation circuit usually has the structure of a resistive potential divider with a wide adjustable range of four or five digits, namely minimum adjustable unit of 1 part in 10^4 or 1 part in 10^5 . The delicate adjustment using the wide range of the circuit results in a full compensation to almost remove the tilt in the magnetization loop in accordance with the procedures in 7.4.1. The number of digits for the compensation circuit is designed with the condition that the minimum adjustable unit is sufficiently fine in comparison with the ratio of the moment-related component to the field-related one in the signal from the main pickup coil.

6 Specimen preparation

6.1 Coiled specimen

6.1.1 Winding of specimen

A coil former shall be used to wind the specimen into a single-layer solenoidal coil. When the specimen has an insulation layer, the turns of the coil shall be tightly wound right next to adjacent turns. When the specimen surface is not coated with an insulating material, the specimen shall be wound with an equal space between turns by inserting a non-metallic and non-magnetic spacer such as a fishing line to achieve turn-to-turn insulation of the specimen. The diameter of the spacer shall be approximately half the specimen diameter. In the cases where demagnetization effects due to the adjacent turns ought to be reduced, the specimen shall be also wound by inserting an appropriate spacer between the turns.

6.1.2 Configuration of coiled specimen

The coil height of the specimen shall be more than three times as high as that of the pickup coil in order to reduce geometrical error coming from the end effects of the coiled specimen.

6.1.3 Maximum bending strain

The coiled specimen of each superconducting wire shall be prepared and arranged between the two concentric pickup coils with considering permissive tolerance of bending strain. For specimens of Nb-Ti wires, the maximum bending strain shall not exceed a permissive level for the DC critical current measurement.

NOTE For the DC critical current measurement of Nb-Ti composite superconductors, the permissive level of 3 % is given in IEC 61788-1 (2006) [3].

6.1.4 Treatment of terminal cross section of specimen

Both ends of a specimen shall be opened and ground by emery paper of 12 μm (800 mesh) to 7 μm (1 000 mesh) to prevent filaments from contacting each other.

6.2 Specimen coil form

The former upon which the specimen is wound shall be made of non-metallic and non-magnetic material such as glass fiber reinforced plastic and phenol resin. An adhesive, such as cyanoacrylate or epoxy resin, shall be used as a bonding material to bond the specimen to the coil former to keep the cylindrical coil shape.

7 Testing conditions

7.1 External applied magnetic field

7.1.1 Amplitude of applied field

The standard condition for the amplitude of applied field shall be ranged from around 0,1 T to 1 T by considering the frequency range to evaluate the coupling time constant.

NOTE In the past round-robin tests, the measurement amplitude of applied field was 1 T in the range from 0,005 Hz to 1 Hz for Cu/Nb-Ti multifilamentary wires and 0,5 T from 0,005 Hz to 10 Hz for three-component superconducting wires, as represented in A.2.

7.1.2 Direction of applied field

In a coiled specimen, the external field shall be applied along the coil axis.

7.1.3 Waveform of applied field

The standard waveform of the applied field shall be a sine waveform or a triangular waveform.

7.1.4 Frequency of applied field

The present method shall be used in the range of frequency up to the commercial levels of 50 Hz and 60 Hz to measure the total AC loss. In the region of higher frequency, attentions shall be paid to reduce electromagnetic noise from metallic parts in the vicinity of the pickup coils as shown in Annex A.

For the superconducting wires with fine filaments, the number of measurement points shall be more than five in an extensive range of frequency on a logarithmic scale so as to calculate the coupling time constant from linear frequency dependence of the coupling loss as shown in 8.6. In the measurement of frequency dependence of AC losses, the amplitude of the applied field shall be fixed.

NOTE The linear frequency dependence of the coupling loss is observed in the range of lower frequency and smaller amplitude of applied magnetic field [4]. In cases where the coupling loss is not linearly dependent upon the frequency at a level of fixed amplitude, the range of measurement frequency shall be shifted to the lower side to obtain the linearity. Recommended ranges of the frequency are given in A.2 for Cu/Nb-Ti multifilamentary wires and three-component superconducting wires.

7.1.5 Uniformity of applied field

The applied field shall have uniformity within 5 % over the coil length of the specimen and within 1 % over the length of the pickup coils.

7.2 Setting of the specimen

The coiled specimen shall be arranged coaxially and concentrically between a main pickup coil and a compensation coil.

7.3 Measurement temperature

The specimen and the pickup coils shall be immersed in liquid helium. The measurement temperature shall be determined using a calibrated thermometer or an atmospheric pressure measurement.

7.4 Test procedure

7.4.1 Compensation

The first step of the compensation is to measure a hysteresis loop of magnetization of the specimen for a fixed amplitude of applied field by subtracting the signal of the compensation coil from that of the main pickup coil as they are. Since the total interlinkage flux of the applied field into the compensation coil is a little larger than that into the main pickup coil, the obtained magnetization loop is usually tilted against the horizontal axis of applied magnetic field.

In the second step of the compensation, the signal from the compensation coil is loosely modified by multiplying by a compensation coefficient slightly less than unity through the compensation circuit to reduce the tilt of magnetization loop.

In the final step, the compensation coefficient is delicately adjusted to get the condition that both branches of the magnetization curve in increasing and decreasing processes are symmetric with respect to the horizontal axis in the regions around the extreme values of applied field.

7.4.2 Measurement of background loss

In order to estimate background loss in the pickup coil system including pickup coils, compensation circuit, amplifiers, etc., apparent loss shall be measured when no specimen is

located inside the pickup coils. The measurement procedure is the same as that for usual specimens mentioned in 7.4.3.

7.4.3 Loss measurement

In the pickup coil method, the AC loss shall be calculated by integrating the product between the compensated signal from the main pickup coil (moment related) and the signal from the compensation coil (field related), following Equation (3). If the apparent background loss cannot be neglected in the system of loss measurement, the AC loss for the specimen shall be obtained by subtracting the background loss from the apparent, measured one. In the correction by the background loss, attention shall be paid to the sign of the background loss.

The AC loss can be also estimated by integrating the magnetization for the applied field over a period, as shown in Annex B.

7.4.4 Calibration

In general, calibration is a basic procedure in the AC loss measurement with imperfect detection of signals. A recommended method of the calibration is given in Annex D. On the other hand, if the conditions for the configuration of the pickup coils and the coiled specimen, indicated in Clauses 5 and 6 and Annex C are satisfied, the AC loss and magnetization measurements with an error due to the geometrical configuration less than a few percent can be performed without calibration. However, when the configuration of the pickup coil system is outside the given conditions, the calibration indicated in Annex D may need to be performed.

8 Calculation of results

8.1 Amplitude of applied magnetic field

The applied field $H_e(t)$ shall be calculated by substituting the measured voltage $U_c(t)$ from the compensation coil into Equation (1):

$$H_e(t) = \frac{1}{\mu_0 N_c S_c} \int_0^t U_c(t') dt' \quad (1)$$

where N_c and S_c are the number of turns and the interlinkage area per turn of the compensation coil, respectively. The initial time of integration is a zero-crossing point of $U_c(t)$. The zero level of the magnetic field is equal to the midpoint between the maximum and minimum levels of $H_e(t)$ in Equation (1). The amplitude shall be obtained as a half of difference between the maximum and minimum values of $H_e(t)$.

8.2 Magnetization

The magnetization shall be calculated by substituting the compensated voltage $U_{p-c}(t)$ from the pickup coils into Equation (2):

$$M(t) = \frac{1}{\mu_0 N_p S_s} \int_0^t U_{p-c}(t') dt' \quad (2)$$

where N_p is the number of turns for the main pickup coil and S_s is an effective cross-sectional area of the coiled specimen obtained from dividing the total specimen volume by the height of coiled specimen. The initial time of integration is also the zero-crossing point of $U_c(t)$. The zero level of the magnetization is equal to the midpoint between the maximum and minimum levels of $M(t)$ in Equation (2).

8.3 Magnetization curve

Over a period of the applied magnetic field from the initial time, the hysteretic magnetization curve can be obtained by plotting the magnetization versus the applied field. The zero levels of the magnetization and the applied field can be obtained as shown in 8.1 and 8.2.

8.4 AC loss

As shown in Annex B, the AC loss per cycle in a superconducting wire can be estimated by integrating Poynting's vector $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ on a closed surface surrounding the wire over a period T of alternating electromagnetic environment. In this case, the AC loss per unit volume P [W/m³] shall be calculated by substituting the compensated voltage U_{p-c} from the main pickup coil and the applied magnetic field H_e into Equation (3),

$$P = -\frac{f}{N_p S_s} \int_0^T U_{p-c}(t) H_e(t) dt \quad (3)$$

where f is the frequency of the applied magnetic field and equal to $1/T$. Under steady periodic conditions, Equation (3) is equivalent to the alternative expression of integrating the magnetization defined by Equation (2) over a cycle of the applied field, as shown in Annex B.

In cases where eddy current loss in normal metal of the specimen is a minor component, the AC loss can be classified into two main components, hysteresis loss P_h and coupling loss P_c , by measuring the frequency dependence for a fixed amplitude of the applied magnetic field.

If the background loss cannot be neglected in the loss measurement system, the AC loss shall be obtained by subtracting the background loss from the measured value.

8.5 Hysteresis loss

The hysteresis loss in unit volume of the individual filaments, P_h , shall be obtained as an extrapolated level of the AC loss in unit volume at $f = 0$. The level can be extrapolated in the frequency dependence of AC loss per cycle by using linear regression.

NOTE In the measurements where the AC losses are not divided into the hysteresis loss and the coupling loss, for example in cases of specimens with low n -values, the results only of the total AC losses are reported.

8.6 Coupling loss and coupling time constant [5,6]

The coupling loss among the filaments shall be obtained by subtracting the hysteresis loss from the total AC loss in the region of lower frequency where the coupling loss per cycle estimated is proportional to the frequency. For isotropic superconducting round wires with fine filaments in a sine waveform of the applied magnetic field, the coupling loss in unit volume, P_c , is theoretically predicted by

$$P_c = 4 \pi^2 \tau \mu_0 H_m^2 f^2 \quad (4)$$

where τ is the coupling time constant and H_m is the amplitude of applied magnetic field. The coupling time constant can be calculated from the proportional coefficient of the coupling loss per cycle to the frequency. The expressions of the coupling loss in the round wire for various types of waveforms of the applied field are given in Annex E.

9 Uncertainty

9.1 General

Background for introducing uncertainty, the definition and the application to the pickup coil method are summarized in Annex F and Annex G. The results of the relative combined standard

uncertainties evaluated in Annex G are 3,8 % for the hysteresis loss and 5,4 % (5,5 %) for the coupling loss (the coupling time constant) as a typical example for NbTi conductors under the condition that the ratio of the hysteresis loss to the total AC loss is 0,5 on an average at the upper limit in the measurement frequency region. The target relative combined standard uncertainty of this method is defined as an expanded uncertainty with a coverage factor k of 2, which does not exceed 7,6 % and 10,8 % (11,0 %) respectively in the above example.

9.2 Uncertainty of measurement apparatus

Measurement apparatus with relative standard uncertainty not to exceed 0,5 % shall be used. The dimension measuring apparatus shall have a relative standard uncertainty not to exceed 0,5 %.

9.3 Uncertainty of applied field

An applied magnetic field system shall provide the magnetic field with a relative standard uncertainty not to exceed 0,5 %. The applied field shall have a uniformity given in 7.1.5.

9.4 Uncertainty of measurement temperature

A cryostat shall provide the necessary environment for measuring AC loss and the specimen shall be measured while immersed in liquid helium. The specimen temperature is assumed to be the same as the temperature of the liquid. The liquid temperature shall be reported with a standard uncertainty not to exceed 0,05 K. For converting the observed atmospheric pressure in the cryostat to a temperature value, the phase diagram of helium shall be used. The atmospheric pressure measurement shall have low enough uncertainty to obtain the required uncertainty of the temperature measurement. For liquid helium depths greater than 1 m, a head correction may be necessary.

10 Test report

10.1 Identification of specimen

The specimen shall be identified, if possible, by the following:

- a) name of manufacturer;
- b) classification;
- c) lot number;
- d) matrix material;
- e) dimension of the wire;
- f) filament diameter;
- g) number of filaments;
- h) interfilamentary spacing;
- i) copper / non-Cu ratio;
- j) twist pitch;
- k) residual resistance ratio (RRR);
- l) thickness of insulation layer.

10.2 Configuration of coiled specimen

The following configuration of the coiled specimen shall be reported:

- a) inner diameter;
- b) outer diameter;

- c) height;
- d) number of turns;
- e) effective cross-sectional area of coiled specimen;
- f) volume ratio of coiled specimen volume within the height of the pickup coils to the volume of the space between the pickup coils.

10.3 Testing conditions

The following testing conditions shall be reported:

- a) amplitude of applied field;
- b) waveform of applied field;
- c) frequency of applied field;
- d) uniformities of applied field over the coil length of the specimen and the length of pickup coils;
- e) measurement temperature;
- f) measurement method of temperature;
- g) sampling time of induced voltage of pickup coils;
- h) magnitude of background loss.

10.4 Results

The following results shall be reported. In repeated measurements of the total AC loss, the hysteresis loss and the coupling loss (the coupling time constant), the average value and the relative expanded uncertainty for the coverage factor k of 2 shall be reported with the repeated number of times n :

- a) total AC loss including a hysteresis loss and a coupling loss;
- b) hysteresis loss;
- c) coupling time constant or coupling loss;
- d) magnetization curve.

In the measurements where the AC losses are not divided into the hysteresis loss and the coupling loss, the results only of a) and d) shall be reported.

It is recommended that the following results be reported, even in the case where controllable errors, such as the geometrical error of the pickup coil system mentioned in 5.2 and Annex C, can be reduced:

- e) hysteresis loss and magnetization curve of the Pb standard specimen;
- f) maximum and minimum values of magnetization value in Pb standard specimen under external magnetic field with the amplitude of 0,1 T;
- g) critical field strength of Pb standard specimen.

10.5 Measurement apparatus

The test report shall contain the following information.

10.5.1 Pickup coils

- a) Relation of the position between pickup coils and a coiled specimen
- b) Parameters of main pickup coil (inner diameter, outer diameter, height, number of turns, wire material and diameter, material of coil form)

- c) Parameters of compensation coil (inner diameter, outer diameter, height, number of turns, wire material and diameter, material of coil form)

10.5.2 Measurement system

- a) Electrical circuit of measurement system
b) Material of cryostat

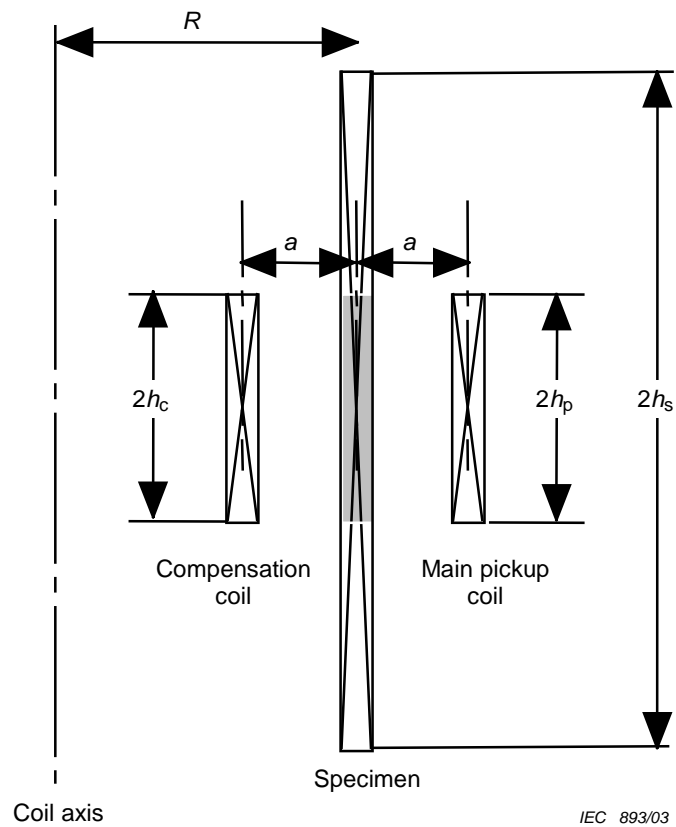
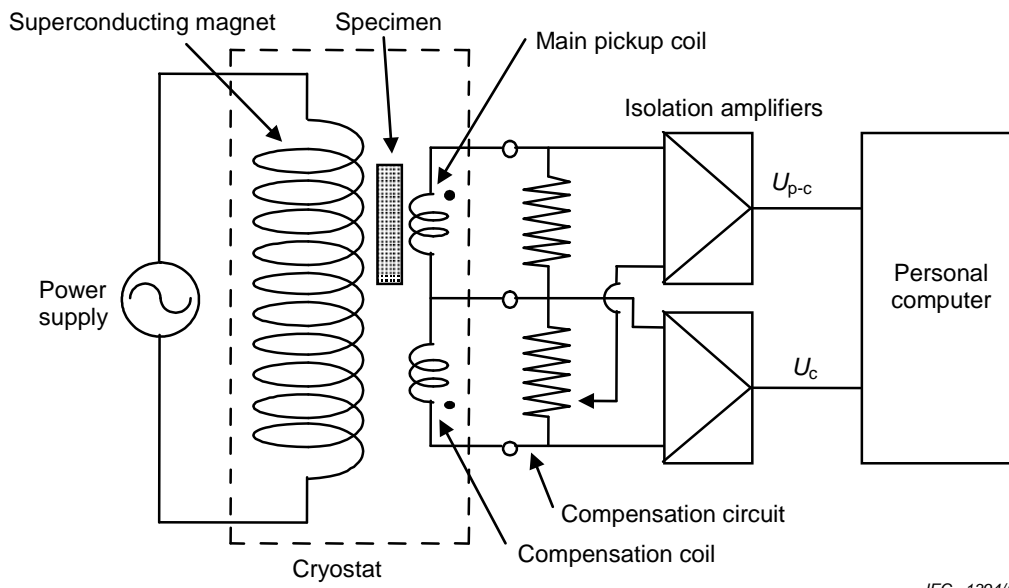


Figure 1 – Standard arrangement of the specimen and pickup coils



IEC 1394/10

Figure 2 – A typical electrical circuit for AC loss measurement by pickup coils

Annex A (informative)

Additional information relating to Clauses 1 to 10

A.1 Concerning the Scope

In general, the present pickup coil method is applicable to measure the total AC loss of the superconducting wires in the form of the coiled specimen indicated in 6.1 in wide ranges of the frequency and the amplitude of the applied magnetic field at liquid helium temperature. The upper limit of the frequency given in 7.1.4 is the maximum frequency that was used in the round-robin tests for the measurement of AC losses in Cu/Nb-Ti multifilamentary wires and three-component superconducting wires. The AC losses in the superconducting wires can be also measured with this method in a range of higher frequency with further attention to be paid to reduce electromagnetic noise due to eddy current generated in metallic parts in the vicinity of the pickup coils including super-insulation layers in the non-metallic cryostat and shielding current induced in the winding of the magnet for the applied magnetic field.

The present pickup coil method is applicable not only to the Cu/Nb-Ti multifilamentary wires and the three-component superconducting wires, but also extended in principle to other round superconducting wires indicated in the following under the condition that the method of calibration for the AC loss measurement in 7.4.4 and Annex D can be used:

- a) the low-temperature compound superconducting wires of Nb_3Sn , Nb_3Al and so on;
- b) the intermediate-temperature superconducting wires such as MgB_2 ;
- c) the high-temperature superconducting wires of Bi-2212 and so on.

A.2 Coupling time constant

In the multifilamentary superconducting wires, the filaments are twisted to reduce the coupling loss in a transverse AC magnetic field. For the commercial metallic superconducting wires, the twist pitch is designed to restrict the coupling loss to a comparable level to the hysteresis loss of the individual filaments within the mechanical tolerance to the twisting in practical ranges of the frequency and the amplitude of applied magnetic field.

In the region of linear frequency dependence of the coupling loss per cycle, the coupling time constant can be calculated from the proportional coefficient of the coupling loss per cycle to the frequency at the fixed amplitude as shown in 8.6. In order to reduce an uncertainty in the evaluation of the coupling time constant, the measurement points shall be extended in a wide range of frequency on a logarithmic scale, where the hysteresis loss is predominant in the AC loss at the measurement point with the lowest frequency and the hysteresis loss and the coupling loss are comparable to each other at the measurement point with the highest. In the past round-robin tests, for example, the measurement frequency was in the range from 0,005 Hz to 1 Hz at the amplitude of magnetic field, 1 T, for Cu/Nb-Ti multifilamentary wires [7] and from 0,005 Hz to 10 Hz at 0,5 T for three-component superconducting wires [8].

A.3 Preparation of coiled specimen

The coiled specimen of each superconducting wire shall be prepared and arranged between the two concentric pickup coils while paying attention to permissive tolerance of bending strain. The permissive level shall be estimated from the conditions for the mechanical strain in the critical current measurement. For thicker wires, the conditions for the bending strain results in a larger radius of the coiled specimen. The geometrical error for the large specimens can be also estimated by considering the coefficient G indicated in Annex C. In the case where the permissive radius of the coiled specimen is out of the range given in Figure C.1, a similar set of

sizes for the coiled specimen and pickup coils to the given examples shall be used. For a coiled specimen prepared by a wind-and-react method, on the other hand, the radius can be adjusted before the reaction heat treatment in the same manner as indicated in IEC 61788-2 [9] for the critical current measurement of Nb₃Sn superconducting wires. Electrical insulation between neighbouring turns in the coiled specimen shall be also ensured.

A.4 Cryogenic compensation method

An alternative for the compensation of the inductive voltage of the pickup coil as shown in Figure 2, is a compensation inside the cryostat. In this compensation scheme, the pickup coil and compensation coil are connected in anti-series directly in the cold without bringing the full signals out of the cryostat to room temperature and feed them to amplifiers.

The winding numbers of the pickup and compensation coils should be matched so that the remaining inductive signal of the coils connected in anti-series is minimised. Because the compensation will never be 'perfect', some fine tuning is necessary. Fine tuning can be performed with an inductive signal that is derived from the magnet current or with the signal from a small compensation coil inside the magnet. This fine tuning is performed at room temperature with amplifiers, similar to the compensation method described in 7.4 and shown in Figure 2.

The advantage of the cryogenic compensation method is that not the full voltage of the pick-up and compensation coils is brought up to room temperature and fed through the amplifiers. A difference in phase shift of the signal in the two amplifiers leads to an increase of the background loss (loss without sample in the pick-up coils) because a part of the inductive signal will appear as (in-phase) AC loss signal. Also disturbances of the signals in the wiring between the pickup and compensation coils and the amplifiers at room temperature which are not identical in both the pickup coil and compensation coil circuit can lead to an increase of the background loss. With the cryogenic compensation method the largest part of the compensation is performed in the cold. No large inductive signals are fed to amplifiers with possible difference in phase shift and the risk of disturbances of the signals between cryogenic temperature and room temperature is minimised. With the cryogenic compensation method the empty coil effect can be minimised and the sensitivity of the measurement can be improved.

Annex B (informative)

Explanation of AC loss measurement with Poynting's vector [10]

In general, AC loss per cycle in a superconducting wire can be estimated by integrating Poynting's vector $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ on a closed surface A surrounding the wire over a periodic electro-magnetic environment. The AC loss in unit volume of the specimen is given by

$$P = -\frac{f}{V_s} \int_0^T dt \int_A d\mathbf{A} \cdot \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (\text{B.1})$$

where E and H are electric field and magnetic field on the surface A and V_s is a volume of the specimen surrounded by the surface A . When the specimen is exposed to a uniform alternating magnetic field H_e , the AC loss can be measured by pickup coils in the following way. In arrangements of the specimen and the pickup coils shown in Figure 1, for example, Equation (B.1) is changed into

$$P = -\frac{f d_p}{V_s} \int_0^T dt H_e \int_{\Gamma} ds E = -\frac{f}{n_p V_s} \int_0^T dt H_e U_{p-c} \quad (\text{B.2})$$

where d_p is an average pitch of the pickup coil winding, n_p is the number of turns per unit length for the main pickup coil, and Γ is a path along the winding in a layer. In this way, the AC loss can be estimated by integrating the product between the applied magnetic field H_e and the compensated terminal voltage U_{p-c} from pickup coils over the period. In Figure 1, the portion of the specimen surrounded by the closed surface is indicated by shadow. By substituting the magnetization M defined by Equation (2), Equation (B.2) leads to

$$P = \mu_0 f \int_0^T H_e \frac{\partial M}{\partial t} dt = \mu_0 f \oint H_e dM \quad (\text{B.3})$$

Under steadily periodic condition in which the magnetization curve per period is closed, Equation (B.3) can be changed into

$$P = -\mu_0 f \oint M dH_e \quad (\text{B.4})$$

Geometrical error from the configuration of the specimen and pickup coils results from an approximation of the surface A by means of a side surface of the pickup coil. The quantitative consideration is presented in Annex C.

Annex C (informative)

Estimation of geometrical error in the pickup coil method

The pickup coil method has geometrical error, as suggested in Annex B, due to imperfect detection by means of the pickup coils. If an apparent magnetization M obtained from Equation (2) is equal to $G(h_p, h_c, h_s, R, a) M_0$, Equation (B.4) leads to the following expression

$$P = -\mu_0 f G(h_p, h_c, h_s, R, a) \oint M_0 dH_e \tag{C.1}$$

where M_0 is an actual magnetization induced in the specimen. A coefficient G gives the geometrical error and is dependent only upon a height $2h_p$ of the main pickup coil, a height $2h_c$ of the compensation coil and a coil height $2h_s$ of the coiled specimen, a radius R of the coiled specimen and a difference a between the radii of the specimen and each pickup coil [11]. It is possible to measure AC losses fairly accurately when the coefficient G approaches unity.

According to this estimation of the geometrical error, we obtain the condition $|G - 1,00| < 0,01$ in the standard arrangement of the coiled specimen and pickup coils given in 5.2. Figure C.1 also shows the geometrical error for the case where the arrangement is a little different from the standard one.

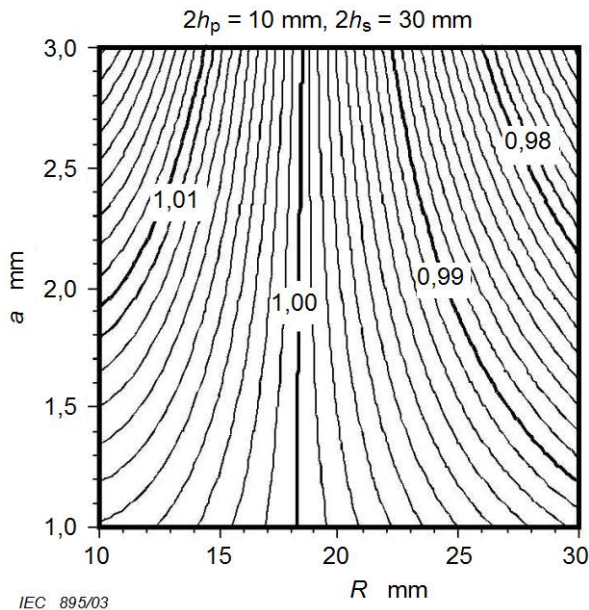


Figure C.1a – Example 1

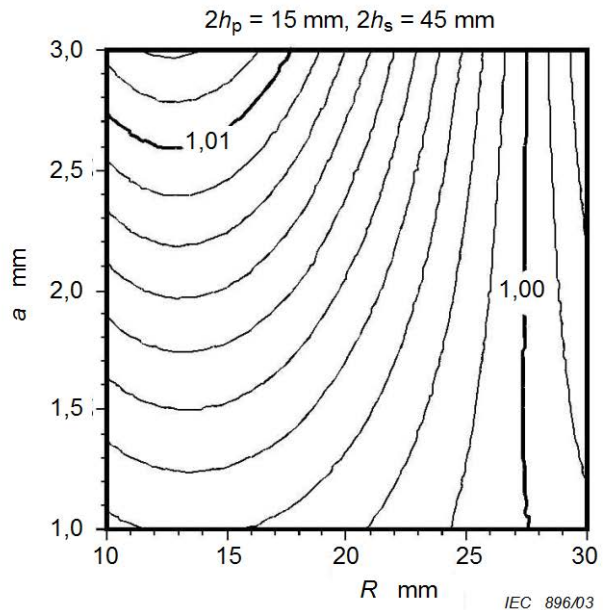


Figure C.1b – Example 2

Figure C.1 – Examples of calculated contour line map of the coefficient G

Annex D (informative)

Recommended method for calibration of magnetization and AC loss

D.1 Outline of calibration

Calibration of magnetization is recommended to compensate for an incomplete measurement of time variation in induced magnetic moment in the specimen even in the case where controllable errors such as geometrical error of the pickup coil system mentioned in Annex C can be reduced. A standard specimen of a type I superconductor such as a high purity Pb wire shall be used for the calibration of magnetization. The magnetization can be calibrated by using the peak value of the reversible $M - H_e$ curve as shown in D.4. The procedure of the magnetization measurement for the standard specimen is in principle the same as that for the usual specimen wire except for the coil configuration and testing condition in the following.

D.2 Coil configuration of standard specimen

The standard specimen shall be co-wound loosely with a non-metallic and non-magnetic wire such as a fishing line for turn-to-turn insulation in a single layer coil. It is recommended that the diameter of the spacer be approximately one half of the specimen wire diameter.

Both ends of the standard specimen shall be opened. The condition of the coil height for the standard specimen is the same as that for the usual specimen.

D.3 Testing conditions of standard specimen

When the standard specimen is Pb, the amplitude of the applied field shall be 0,1 T. The waveform of the applied field shall be sine waveform and the frequency is in the range from 0,006 Hz to 0,06 Hz. A triangular waveform may be also used as the waveform of the applied field.

D.4 Calibration with magnetization of standard specimen

It is well known that the slope of the magnetization curve measured on a type-I superconductor with finite demagnetization depends on the magnitude of the demagnetization factor, but that the maximum magnetization is always the same and equal to the critical magnetic field strength H_C . This is confirmed by the experimental results obtained by SQUID magnetometry as shown in Figure D.1a. If the rounding of the curves is approximated by linear extrapolation, the experimental peak values are always the same and equal to the critical field strength of 39,8 kA/m with an error of 5 %, in excellent agreement with the directly measured field strength where the magnetization disappears.

Two sets of experimental results for the pure Pb wire using the pickup coil method are also given in Figure D.1b. In this figure, the solid and dashed lines indicate the results for frequencies of 0,006 Hz and 0,06 Hz, respectively. The pickup coils and the specimen were set under the conditions given in this standard. The magnetization curves have hysteresis dependent upon frequency. In the above range of frequency, the increasing-field branch is reproducible, whereas the decreasing-field branch is very sensitive to frequency [12]. As indicated by an arrow in the figure, if the peak level of magnetization is estimated in the increasing process, the level of 43,8 kA/m is equal to the critical field strength 42,2 kA/m plus or minus a few percent. The ratio of the predicted level of the peak to the measured one is a calibration coefficient for the measurements of magnetization and AC loss by the pickup coil system. Under the conditions for

the pickup coil system indicated in the present standard, the AC loss measurement with an error less than a few percent can be performed without calibration.

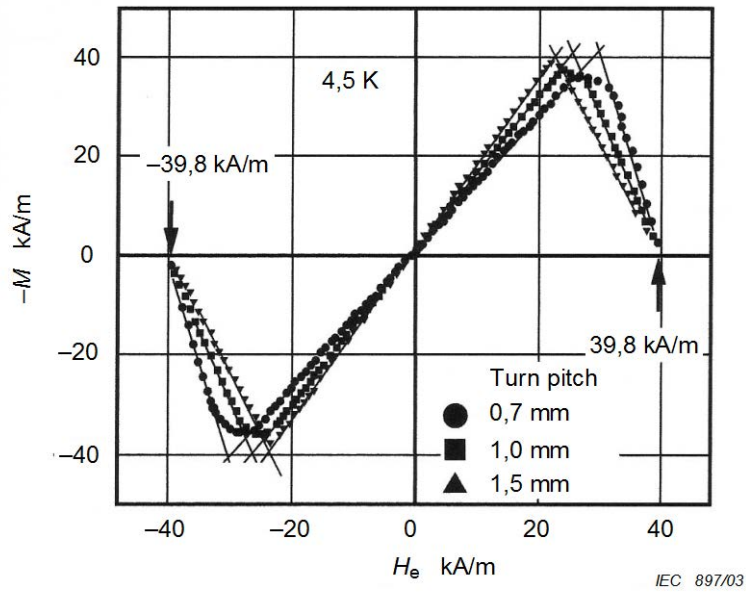


Figure D.1a – Magnetization curves of standard specimen of pure Pb (SQUID magnetometer)

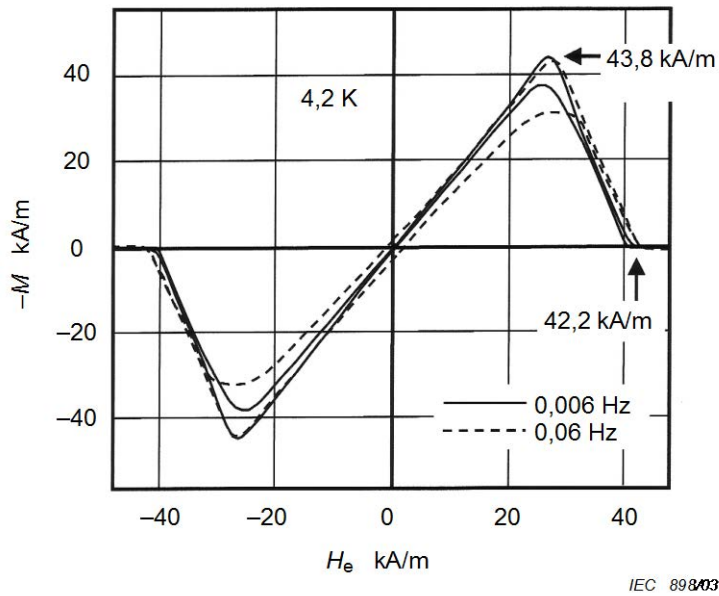


Figure D.1b – Magnetization curve of standard specimen of pure Pb (pickup coil)

Figure D.1 – Evaluation of critical field from magnetization curves

Annex E (informative)

Coupling loss for various types of applied magnetic field

Under the electromagnetic conditions mentioned in 8.6 for isotropic superconducting wires with fine filaments, the expressions of the coupling loss for two types of applied field are given in the following:

$$P_c = 4 \pi^2 \tau \mu_0 H_m^2 f^2 \quad \text{for sine waves} \quad (\text{E.1})$$

$$P_c = 64 \tau \mu_0 H_m^2 f^2 \quad \text{for triangle waves} \quad (\text{E.2})$$

Specific parameters for each type of waveform are indicated in Figure E.1.

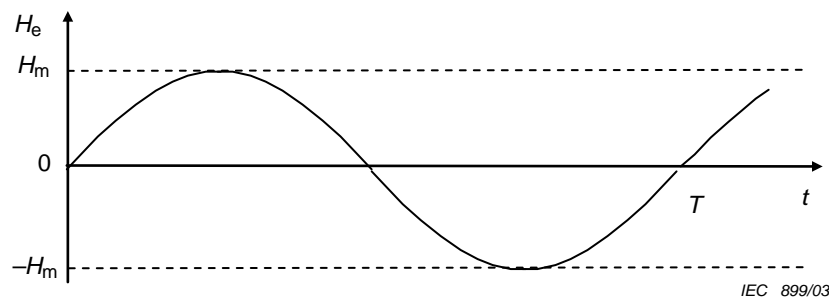


Figure E.1a – Sine waveform with a period $T = 1/f$

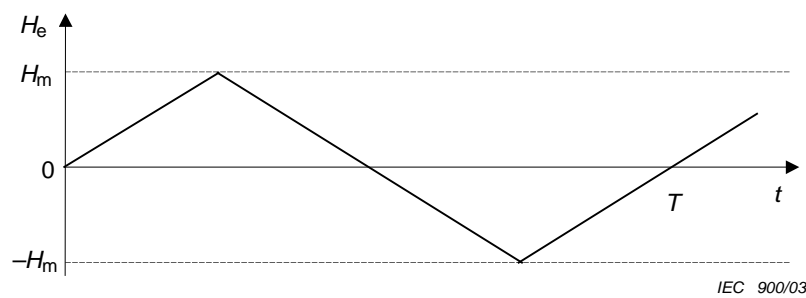


Figure E.1b – Triangular waveform

Figure E.1 – Waveforms of applied magnetic field with a period $T = 1/f$

Annex F (informative)

Uncertainty considerations

F.1 Overview

In 1995, a number of international standards organizations, including IEC, decided to unify the use of statistical terms in their standards. It was decided to use the word “uncertainty” for all quantitative (associated with a number) statistical expressions and eliminate the quantitative use of “precision” and “accuracy.” The words “accuracy” and “precision” could still be used qualitatively. The terminology and methods of uncertainty evaluation are standardized in the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) [1] ²⁾.

It was left to each TC to decide if they were going to change existing and future standards to be consistent with the new unified approach. Such change is not easy and creates additional confusion especially for those who are not familiar with statistics and the term uncertainty. At the June 2006 TC 90 meeting in Kyoto, it was decided to implement these changes in future standards.

Converting “accuracy” and “precision” numbers to the equivalent “uncertainty” numbers requires knowledge about the origins of the numbers. The coverage factor of the original number may have been 1, 2, 3, or some other number. A manufacturer’s specification that can sometimes be described by a rectangular distribution will lead to a conversion number of $1/\sqrt{3}$. The appropriate coverage factor was used when converting the original number to the equivalent standard uncertainty. The conversion process is not something that the user of the standard needs to address for compliance to TC 90 standards, it is only explained here to inform the user about how the numbers were changed in this process. The process of converting to uncertainty terminology does not alter the user’s need to evaluate their measurement uncertainty to determine if the criteria of the standard are met.

The procedures outlined in TC 90 measurement standards were designed to limit the uncertainty of any quantity that could influence the measurement, based on the Convener’s engineering judgment and propagation of error analysis. Where possible, the standards have simple limits for the influence of some quantities so that the user is not required to evaluate the uncertainty of such quantities. The overall uncertainty of a standard was then confirmed by an interlaboratory comparison.

F.2 Terms and definitions

Statistical terms and definitions can be found in three sources: the GUM, the International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology (VIM)[2], and the NIST Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results (NIST)[3]. Not all statistical terms and definitions used in this standard are explicitly defined in the GUM. For example, the terms “relative standard uncertainty” and “relative combined standard uncertainty” are used in the GUM (5.1.6, Annex J), but they are not formally defined in the GUM (see [3]).

F.3 Consideration of the uncertainty concept

Statistical evaluations in the past frequently used the Coefficient of Variation (COV) which is the ratio of the standard deviation and the mean (N.B. the COV is often called the relative standard deviation). Such evaluations have been used to assess the precision of the measurements and

²⁾ Figures in square brackets refer to the reference documents in Clause F.5 of this Annex.

give the closeness of repeated tests. The standard uncertainty (SU) depends more on the number of repeated tests and less on the mean than the COV and therefore in some cases gives a more realistic picture of the data scatter and test judgment. The example below shows a set of electronic drift and creep voltage measurements from two nominally identical extensometers using same signal conditioner and data acquisition system. The $n = 10$ data pairs are taken randomly from the spreadsheet of 32 000 cells. Here, extensometer number one (E_1) is at zero offset position whilst extensometer number two (E_2) is deflected to 1 mm. The output signals are in Volts.

Table F.1 – Output signals from two nominally identical extensometers

Output signal [V]	
E_1	E_2
0,001 220 70	2,334 594 73
0,000 610 35	2,334 289 55
0,001 525 88	2,334 289 55
0,001 220 70	2,334 594 73
0,001 525 88	2,334 594 73
0,001 220 70	2,333 984 38
0,001 52 588	2,334 289 55
0,000 915 53	2,334 289 55
0,000 915 53	2,334 594 73
0,001 220 70	2,334 594 73

Table F.2 – Mean values of two output signals

Mean (\bar{X}) [V]	
E_1	E_2
0,001 190 19	2,334 411 62

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad [\text{V}] \quad (\text{F.1})$$

Table F.3 – Experimental standard deviations of two output signals

Experimental standard deviation (s) [V]	
E_1	E_2
0,000 303 48	0,000 213 381

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad [\text{V}] \quad (\text{F.2})$$

Table F.4 – Standard uncertainties of two output signals

Standard uncertainty (<i>u</i>) [V]	
<i>E</i> ₁	<i>E</i> ₂
0,000 095 97	0,000 067 48

$$u = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad [V] \tag{F.3}$$

Table F.5 – Coefficient of variations of two output signals

Coefficient of Variation (<i>COV</i>) [%]	
<i>E</i> ₁	<i>E</i> ₂
25,498 2	0,009 1

$$COV = \frac{s}{X} \tag{F.4}$$

The standard uncertainty is very similar for the two extensometer deflections. In contrast the coefficient of variation *COV* is nearly a factor of 2 800 different between the two data sets. This shows the advantage of using the standard uncertainty which is independent of the mean value.

F.4 Uncertainty evaluation example for TC 90 standards

The observed value of a measurement does not usually coincide with the true value of the measurand. The observed value may be considered as an estimate of the true value. The uncertainty is part of the "measurement error" which is an intrinsic part of any measurement. The magnitude of the uncertainty is both a measure of the metrological quality of the measurements and improves the knowledge about the measurement procedure. The result of any physical measurement consists of two parts: an estimate of the true value of the measurand and the uncertainty of this "best" estimate. The GUM, within this context, is a guide for a transparent, standardized documentation of the measurement procedure. One can attempt to measure the true value by measuring "the best estimate" and using uncertainty evaluations which can be considered as two types: type A uncertainties (repeated measurements in the laboratory in general expressed in the form of Gaussian distributions) and type B uncertainties (previous experiments, literature data, manufacturer's information, etc. often provided in the form of rectangular distributions).

The calculation of uncertainty using the GUM procedure is illustrated in the following example:

- a) The user must derive in a first step a mathematical measurement model in form of identified measurand as a function of all input quantities. A simple example of such a model is given for the uncertainty of a force measurement using a load cell:

Force as measurand = *W* (weight of standard as expected) + *d_W* (manufacturer's data) + *d_R* (repeated checks of standard weight/day) + *d_{Re}* (reproducibility of checks at different days).

Here the input quantities are: the measured weight of standard weights using different balances (type A), manufacturer's data (type B), repeated test results using the digital electronic system (type B), and reproducibility of the final values measured on different days (type B).

b) The user should identify the type of distribution for each input quantity (e.g. Gaussian distributions for type A measurements and rectangular distributions for type B measurements).

c) Evaluate the standard uncertainty of the type A measurements,

$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}}$ where, s is the experimental standard deviation and n is the total number of measured data points.

d) Evaluate the standard uncertainties of the type B measurements:

$u_B = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot d_W^2 + \dots}$ where, d_W is the range of rectangular distributed values

e) Calculate the combined standard uncertainty for the measurand by combining all the standard uncertainties using the expression:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

In this case, it has been assumed that there is no correlation between input quantities. If the model equation has terms with products or quotients, the combined standard uncertainty is evaluated using partial derivatives and the relationship becomes more complex due to the sensitivity coefficients [4, 5].

f) Optional - the combined standard uncertainty of the estimate of the referred measurand can be multiplied by a coverage factor (e. g. 1 for 68 % or 2 for 95 % or 3 for 99 %) to increase the probability that the measurand can be expected to lie within the interval.

g) Report the result as the estimate of the measurand \pm the expanded uncertainty, together with the unit of measurement, and, at a minimum, state the coverage factor used to compute the expanded uncertainty and the estimated coverage probability.

To facilitate the computation and standardize the procedure, use of appropriate certified commercial software is a straightforward method that reduces the amount of routine work [6, 7]. In particular, the indicated partial derivatives can be easily obtained when such a software tool is used. Further references for the guidelines of measurement uncertainties are given in [3, 8, and 9].

F.5 Reference documents of this annex F

- [1] ISO/IEC Guide 98-3:2008, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*
- [2] ISO/IEC Guide 99:2007, *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)*
- [3] TAYLOR, B.N. and KUYATT, C.E., *Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results*. NIST Technical Note 1297 (1994) (Available at <<http://physics.nist.gov/Pubs/pdf.html>>)
- [4] KRAGTEN, J., Calculating standard deviations and confidence intervals with a universally applicable spreadsheet technique. *Analyst*, **119**, 2161-2166 (1994)
- [5] EURACHEM / CITAC Guide CG 4 Second edition:2000, *Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement*
- [6] Available at <http://www.gum.dk/e-wb-home/gw_home.html>
- [7] Available at <<http://www.isgmax.com/>>

- [8] CHURCHILL, E., HARRY, H.K., and COLLE, R., *Expression of the Uncertainties of Final Measurement Results*. NBS Special Publication 644 (1983)
- [9] JAB NOTE4 Edition 1:2003, *Estimation of Measurement Uncertainty (Electrical Testing / High Power Testing)*. (Available at <<http://www.jab.or.jp>>).

Annex G (informative)

Evaluation of uncertainty in AC loss measurement by pickup coil method [13]

Uncertainty in AC loss measurement by the pickup coil method is mainly attributed to effects of measurement conditions, signal processing and division of the AC loss into the components. The effect of the measurement conditions is evaluated with theoretical expressions of two main components in the AC loss, the hysteresis loss P_h and the coupling loss P_c . The signal processing is an essential step to calculate the AC loss with experimental outputs by Equations (1) and (2). The third is an additional one to divide the AC loss into the two components by following the procedures in 8.5 and 8.6. Main results of the relative combined standard uncertainties for the two loss components in these evaluations are summarized in Table G1 as a typical example for NbTi conductors.

The uncertainty evaluation for the effect of the measurement conditions starts from basic standard uncertainties for temperature and magnetic field, where the specimen is set, in addition to those of measurement apparatuses. These initial data are given in the text and Table G1. The propagation of the initial standard uncertainties to those of P_h and P_c can be estimated by the following theoretical expressions

$$P_h = \frac{4}{3} \mu_0 H_p^2 \left(2 \frac{H_m}{H_p} - 1 \right) f \cong \frac{8}{3} \mu_0 H_p H_m f \quad (\text{G.1})$$

$$P_c = 4\pi^2 \tau \mu_0 H_m^2 f^2 \quad (\text{G.2})$$

through the penetration field H_p and the coupling time constant τ . We shall consider that the AC loss is almost corresponding to the hysteresis loss at a lower frequency limit in the measurement and equivalently divided into the two components at an upper one. The relative combined standard uncertainties of the AC loss are expressed as

$$u_{c,r1}(P_{\text{lower}}) = u_{c,r1}(P_h) \quad \text{at the lower frequency limit} \quad (\text{G.3})$$

$$u_{c,r1}(P_{\text{upper}}) = \sqrt{\alpha^2 u_{c,r1}^2(P_h) + (1-\alpha)^2 u_{c,r1}^2(P_c)} \quad \text{at the upper frequency limit} \quad (\text{G.4})$$

where $u_{c,r1}(P_h)$ and $u_{c,r1}(P_c)$ are the relative combined standard uncertainties of P_h and P_c , respectively, obtained from Equations (G.1) and (G.2). The coefficient α is the ratio of the hysteresis loss to the total AC loss at the upper frequency limit, where it is assumed that $u_{c,r1}(P_h)$ and $u_{c,r1}(P_c)$ are independent. It is recommended that the α value be set in a range from 0,3 to 0,5. Table G.1 gives the results of the uncertainty evaluation for $\alpha = 0,5$ as a typical example.

In the signal processing, Equations (1) and (2) are used to evaluate the uncertainty. The basic standard uncertainties for this step are also listed in Table G.1. Only the relative combined standard uncertainty of the total AC loss, $u_{c,r2}(P)$ is evaluated in this stage. The uncertainty of U_{p-c} in (2) almost equivalent to that of the original signal from the pickup coil is assumed in the evaluation under the condition of a full compensation. The results in these two steps shall be integrated for the relative combined standard uncertainty $u_{c,r}(P)$ of the AC loss as

$$u_{c,r}(P) = u_{c,r}(P_{\text{lower}}) = \sqrt{u_{c,r1}^2(P_{\text{lower}}) + u_{c,r2}^2(P)} \quad \text{at the lower frequency limit} \quad (\text{G.5})$$

$$= u_{c,r}(P_{\text{upper}}) = \sqrt{u_{c,r1}^2(P_{\text{upper}}) + u_{c,r2}^2(P)} \quad \text{at the upper frequency limit.} \quad (\text{G.6})$$

Finally, the relative combined standard uncertainties of the components P_h and P_c are evaluated from that of the total AC loss at the lower and upper frequency limits. The relative combined standard uncertainty $u_{c,r}(P_h)$ of P_h is considered to be that of the AC loss at the lower frequency limit. In this way, the relative combined standard uncertainty $u_{c,r}(P_c)$ of P_c is estimated from the AC loss at the upper frequency limit in the following,

$$u_{u,r}(P_h) = u_{u,r}(P_{lower}) \tag{G.7}$$

$$u_{c,r}(P_c) = \sqrt{\left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right)^2 u_{c,r}^2(P_h) + \left(\frac{1}{1-\alpha}\right)^2 u_{c,r}^2(P_{upper})} = \sqrt{\left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right)^2 u_{c,r}^2(P_{lower}) + \left(\frac{1}{1-\alpha}\right)^2 u_{c,r}^2(P_{upper})} \tag{G.8}$$

where the condition that the averages of P_h and P_c are equivalent to each other at the upper limit is used. The relative combined standard uncertainty of the coupling time constant is also evaluated with Equation (G.2).

In the whole processes of the evaluation, the uncertainties are affected mainly by the temperature for the hysteresis loss, and the temperature and the final step of loss division for the coupling loss and the coupling time constant.

The target relative combined standard uncertainty of this method is defined as an expanded uncertainty U_r with a coverage factor k of 2 as

$$U_r = 2 u_{c,r} \tag{G.9}$$

for the relative combined standard uncertainty $u_{c,r}$ of the hysteresis loss and the coupling loss (the coupling time constant).

In the past round robin tests [7], [8], COV was used to summarize the international comparison. The relationship between COV and the uncertainty of each AC loss component calculated in accordance with the procedure in Annex G is discussed in the bibliography [10].

Table G.1 – Propagation of relative uncertainty in the pickup coil method ($\alpha = 0,5$)

Effect of measurement conditions		Effect of signal processing in measurement	
Measurement apparatus	$5,0 \times 10^{-3}$	Turn number of pickup coil	$1,5 \times 10^{-3}$
Magnetic field	$5,0 \times 10^{-3}$	Cross sectional area of pickup coil	$1,0 \times 10^{-2}$
Temperature	$1,2 \times 10^{-2}$	Sampling interval of measurement	$1,4 \times 10^{-6}$
Penetration magnetic field H_p	$3,6 \times 10^{-2}$	Terminal voltage of pickup coil	$3,2 \times 10^{-6}$
Coupling time constant τ	$1,4 \times 10^{-2}$	Processing magnetic field	$1,0 \times 10^{-2}$
Hysteresis loss	$3,7 \times 10^{-2}$	Processing total AC loss	$1,0 \times 10^{-2}$
Coupling loss	$2,0 \times 10^{-2}$	Integrating two effects	
AC loss in lower frequency limit	$3,7 \times 10^{-2}$	AC loss in lower frequency limit	$3,8 \times 10^{-2}$
AC loss in upper frequency limit	$2,1 \times 10^{-2}$	AC loss in upper frequency limit	$2,3 \times 10^{-2}$
Division of AC loss into components			
Hysteresis loss		$3,8 \times 10^{-2}$	
Coupling loss		$5,4 \times 10^{-2}$	
Coupling time constant		$5,5 \times 10^{-2}$	
Relative expanded uncertainty with $k = 2$			
Hysteresis loss		$7,6 \times 10^{-2}$	
Coupling loss		$10,8 \times 10^{-2}$	
Coupling time constant		$11,0 \times 10^{-2}$	

Bibliography

- [1] SCHMIDT, C., ITOH, K., WADA, H. AC magnetization measurement of hysteresis and coupling losses in NbTi multifilamentary strands. *Cryogenics*, 1997, Vol.37, No.2, p.77-89.
- [2] IEC 61788-13 (2003), *Superconductivity – Part 13: AC loss measurements – Magnetometer methods for hysteresis loss in Cu/Nb-Ti multifilamentary composites*.
- [3] IEC 61788-1 (2006), *Superconductivity – Part 1: Critical current measurement – DC critical current of Nb-Ti composite superconductors*.
- [4] SUMIYOSHI, F., IRIE, F., YOSHIDA, K., FUNAKOSHI, H. AC loss of a multifilamentary superconducting composite in a transverse ac magnetic field with large amplitude. *J. Appl. Phys.*, 1979, Vol.50, No.11, p.7044-7050.
- [5] CARR Jr., W. J. AC loss in a twisted filamentary superconducting wire. *I. J. Appl. Phys.*, 1974, Vol.45, No.2, p.929-934
- [6] CAMPBELL, A. M. A general treatment of losses in multifilamentary superconductors. *Cryogenics*, 1982, Vol.22, No.1, p.3-16
- [7] FUNAKI, K., YUMURA, H., KAWABATA, A., SUGIMOTO, M., ITO, K., OSAMURA, K.: "Standardization of AC loss measurement of Cu/Nb-Ti composites exposed to alternating transverse magnetic field by pickup coil method." *Advances in Superconductivity XII* (Springer-Verlag, Tokyo), 2000, pp.706-708
- [8] KAWABATA, S., TSUZURA, H., FUKUDA, Y., FUNAKI, K., OSAMURA, K. Standardization of the pickup coil method for AC loss measurement of three-component superconducting wires. *PHYSICA C: Superconductivity*, 2003, Vol. 392-396, p.1129-1133.
- [9] IEC 61788-2, *Superconductivity – Part 2: Critical current measurement – DC critical current of Nb₃Sn composite superconductors*
- [10] KAJIKAWA, K., NAKAMURA, M., IWAKUMA, M., FUNAKI, K. Theoretical evaluation of geometrical errors in AC loss measurements using pickup coil methods. *Advances in Superconductivity X* (Springer-Verlag, Tokyo), 1998, p.1413-1416.
- [11] KAJIKAWA, K., IWAKUMA, M., FUNAKI, K., WADA, M., TAKENAKA, A. Influences of geometrical configuration on AC loss measurement with pickup coil method. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 1999, Vol.9, No.2, p.746-749.
- [12] MENDELSSOHN, K., PONTIUS, R.B. Time effects in supra-conductors. *Nature*, 1936, July 4, p.29-30.
- [13] FUNAKI, K., FUJIKAMI, J., IWAKUMA, M., KASAHARA, H., KAWABATA, S., TANAKA, Y., EHARA, K Uncertainty consideration in AC loss measurement of multi filamentary superconducting wires performed via a pickup coil method. *Cryogenics*, 2010, Vol.50, p.111-117.

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	38
INTRODUCTION.....	40
1 Domaine d'application	41
2 Références normatives.....	41
3 Termes et définitions	41
4 Principe	44
5 Appareillage	44
5.1 Appareil d'essai	44
5.2 Bobines de détection	44
5.3 Circuit de compensation.....	45
6 Préparation de l'échantillon	45
6.1 Éprouvette enroulée.....	45
6.1.1 Enroulement de l'échantillon	45
6.1.2 Configuration de l'échantillon enroulé	45
6.1.3 Flexion maximale.....	45
6.1.4 Traitement de la section d'extrémité de l'échantillon	45
6.2 Structure d'enroulement de l'échantillon.....	45
7 Conditions d'essai	46
7.1 Champ magnétique appliqué externe	46
7.1.1 Amplitude du champ appliqué	46
7.1.2 Direction du champ appliqué.....	46
7.1.3 Forme d'onde du champ appliqué	46
7.1.4 Fréquence du champ appliqué	46
7.1.5 Uniformité du champ appliqué.....	46
7.2 Montage de l'échantillon	46
7.3 Température de mesure.....	47
7.4 Procédure d'essai	47
7.4.1 Compensation.....	47
7.4.2 Mesure des pertes de fond	47
7.4.3 Mesure des pertes	47
7.4.4 Étalonnage	47
8 Calcul des résultats	48
8.1 Amplitude du champ magnétique appliqué	48
8.2 Aimantation.....	48
8.3 Courbe d'aimantation	48
8.4 Pertes en courant alternatif.....	48
8.5 Pertes par hystérésis	49
8.6 Pertes par couplage et constante de temps de couplage [5, 6].....	49
9 Incertitude	49
9.1 Généralités	49
9.2 Incertitude des instruments de mesure.....	49
9.3 Incertitude du champ appliqué	50
9.4 Incertitude de la température de mesure	50
10 Rapport d'essai	50
10.1 Identification de l'échantillon.....	50
10.2 Configuration de l'échantillon enroulé	50

10.3	Conditions d'essai.....	50
10.4	Résultats	51
10.5	Instruments de mesure	51
10.5.1	Bobines de détection	51
10.5.2	Système de mesure	51
Annexe A (informative) Informations complémentaires concernant les Articles 1 à 10.....		53
Annexe B (informative) Explication de la mesure des pertes en courant alternatif avec le vecteur de Poynting [10]		55
Annexe C (informative) Estimation de l'erreur géométrique dans la méthode par bobines de détection.....		56
Annexe D (informative) Méthode recommandée pour l'étalonnage de l'aimantation et des pertes en courant alternatif		57
Annexe E (informative) Pertes par couplage pour différents types de champ magnétique appliqué.....		59
Annexe F (informative) Considérations relative à l'incertitude		60
Annexe G (informative) Évaluation de l'incertitude dans les mesures de pertes en courant alternatif par la méthode par bobines de détection [13]		65
Bibliographie.....		68
Figure 1 – Disposition normalisée de l'échantillon et des bobines de détection		52
Figure 2 – Circuit électrique type pour la mesure des pertes en courant alternatif par des bobines de détection		52
Figure C.1 – Exemples de courbe de niveau pour le coefficient G.....		56
Figure D.1 – Évaluation du champ critique à partir des courbes d'aimantation		58
Figure E.1 – Formes d'onde de champ magnétique appliqué dans une période $T = 1/f$		59
Tableau F.1 – signaux de sortie de deux extensomètres nominalement identiques		61
Tableau F.2 – Valeurs moyennes de deux signaux de sortie		61
Tableau F.3 – Écarts types expérimentaux de deux signaux de sortie.....		61
Tableau F.4 – Incertitudes type de deux signaux de sortie.....		62
Tableau F.5 – Coefficient de variation de deux signaux de sortie		62
Tableau G.1 – Propagation de l'incertitude relative dans la méthode par bobines de détection ($\alpha = 0,5$)		67

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

SUPRACONDUCTIVITÉ –

Partie 8 : Mesure des pertes en courant alternatif – Mesure de la perte totale en courant alternatif des fils supraconducteurs ronds exposés à un champ magnétique alternatif transverse par une méthode par bobines de détection

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI 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, la CEI – 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 la CEI"). 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 la CEI, participent également aux travaux. La CEI 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 la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de la CEI intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de la CEI se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de la CEI. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que la CEI s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; la CEI 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 la CEI s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de la CEI dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de la CEI et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) La CEI 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 la CEI. La CEI 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 la CEI, 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 la CEI, 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 la CEI ou de toute autre Publication de la CEI, 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 la CEI peuvent faire l'objet de droits de brevet. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 61788-8 a été établie par le comité d'études 90 de la CEI :Supraconductivité.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition parue en 2003, dont elle constitue une révision technique.

Les principales modifications par rapport à l'édition précédente sont énumérées ci-dessous:

- extension des applications de la méthode par bobines de détection aux mesures des pertes en courant alternatif dans les fils supraconducteurs métalliques et en oxyde avec une section transversale ronde à la température de l'hélium liquide,

– u1 conformément à la décision prise en juin 2006 à la réunion CEI/TC90 à Kyoto.

La présente version bilingue (2014-03) correspond à la version anglaise monolingue publiée en 2010-06.

Le texte anglais de cette norme est issu des documents 90/243/FDIS et 90/249/RVD.

Le rapport de vote 90/249/RVD donne toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de cette norme.

La version française de cette norme n'a pas été soumise au vote.

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

Une liste de toutes les parties de la série CEI 61788, sous le titre général: *Supraconductivité*, peut être consultée sur le site Web de la CEI.

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

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

INTRODUCTION

Il est proposé des méthodes de mesure par magnétomètre et bobines de détection concernant les pertes en courant alternatif des composites filamentaires supraconducteurs dans les champs magnétiques transverses variables dans le temps. Celles-ci représentent les premières étapes de normalisation des méthodes de mesure des différentes causes de pertes en courant alternatif dans les champs transverses, configuration la plus fréquemment observée.

Il a été décidé de diviser la proposition initiale susmentionnée en deux documents couvrant deux méthodes normalisées. L'une d'elles décrit la méthode de mesure par magnétomètre des pertes par hystérésis et des pertes totales en courant alternatif à basse fréquence (ou vitesse de balayage). La seconde décrit la méthode de mesure par bobines de détection des pertes totales en courant alternatif dans les champs magnétiques à plus haute fréquence (ou vitesse de balayage). La gamme de fréquences est de 0 Hz à 0,06 Hz pour la méthode par magnétomètre et de 0,005 Hz à 60 Hz pour la méthode par bobines de détection. Le chevauchement entre 0,005 Hz et 0,06 Hz correspond à une gamme de fréquences complémentaire pour les deux méthodes.

La présente norme décrit la méthode par bobines de détection. La méthode d'essai pour la normalisation de la mesure des pertes en courant alternatif décrite dans la présente norme s'appuie en partie sur les travaux de pré-normalisation du VAMAS (Versailles Project on Advanced Materials and Standards) sur les pertes en courant alternatif des supraconducteurs composites de Nb-Ti [1]¹⁾.

1) Les chiffres entre crochets se réfèrent à la bibliographie

SUPRACONDUCTIVITÉ –

Partie 8 : Mesure des pertes en courant alternatif – Mesure de la perte totale en courant alternatif des fils supraconducteurs ronds exposés à un champ magnétique alternatif transverse par une méthode par bobines de détection

1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 61788 spécifie la méthode de mesure par bobines de détection des pertes totales en courant alternatif des fils supraconducteurs composites exposés à un champ magnétique alternatif transverse. Les pertes peuvent contenir des pertes par hystérésis et des pertes par courants de Foucault. La méthode normalisée permettant de mesurer uniquement les pertes par hystérésis en courant continu ou en champ magnétique à faible vitesse de balayage est spécifiée dans la CEI 61788-13 [2].

Dans les fils supraconducteurs ronds métalliques et en oxyde dont la principale utilisation attendue concerne les applications avec bobines pulsées et bobines en courant alternatif, les pertes en courant alternatif sont générées par application d'un champ magnétique et/ou d'un courant variables dans le temps. La contribution du champ magnétique aux pertes en courant alternatif est prédominante dans les configurations électromagnétiques habituelles des applications avec bobines. Pour les fils supraconducteurs exposés à un champ magnétique alternatif transverse, la présente méthode peut généralement être utilisée dans les mesures des pertes totales en courant alternatif dans une large gamme de fréquences allant jusqu'aux fréquences de distribution à 50/60 Hz, à la température de l'hélium liquide. Pour les fils supraconducteurs avec des filaments fins, les pertes en courant alternatif mesurées avec la présente méthode peuvent être divisées en pertes par hystérésis dans chacun des filaments, pertes par couplage entre les filaments et pertes par courants de Foucault dans les parties conductrices normales. Lorsque les fils ne comportent pas de gaine conductrice normale externe épaisse, les principales composantes sont les pertes par hystérésis et les pertes par couplage en estimant la première partie comme un niveau extrapolé des pertes en courant alternatif par cycle jusqu'à la fréquence nulle dans la région des fréquences inférieures, les pertes par couplage par cycle étant proportionnelles à la fréquence.

2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application du présent document. 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).

CEI 60050-815 :2000, *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) – Partie 815: Supraconductivité*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions suivants, ainsi que ceux donnés dans la CEI 60050-815, s'appliquent.

3.1**pertes en courant alternatif** **P**

dans un supraconducteur composite, puissance dissipée par suite de l'application d'un champ magnétique ou d'un courant électrique variable avec le temps

[CEI 60050-815:2000, 815-04-54]

3.2**pertes par hystérésis** **P_h**

pertes indépendantes de la fréquence, se produisant dans un supraconducteur sous l'effet des variations d'un champ magnétique

NOTE Les pertes par hystérésis sont dues aux propriétés magnétiques irréversibles de la substance supraconductrice liées à l'ancrage des lignes de flux.

[CEI 60050-815:2000, 815-04-55]

3.3**pertes par courant de Foucault** **P_e**

pertes survenant dans la matrice conductrice normale d'un composite supraconducteur ou dans le matériau de structure lorsque le composite supraconducteur est exposé à un champ magnétique variable, qu'il s'agisse d'un champ extérieur ou d'un champ propre

[CEI 60050-815:2000, 815-04-56, modifié]

3.4**pertes par (courant de) couplage** **P_c**

pertes dues au courant de couplage, survenant dans des fils supraconducteurs multifilamentaires ayant une matrice normale

[CEI 60050-815:2000, 815-04-59]

3.5**constante de temps de couplage (des filaments)** **τ**

constante de temps caractéristique d'un courant de couplage perpendiculaire aux filaments dans un brin destiné aux basses fréquences

[CEI 60050-815:2000, 815-04-60]

3.6**courants de protection**

courants induits par un champ magnétique externe appliqué à un supraconducteur et qui inclut des courants de couplage et des courants de Foucault après une variation de champ dans les supraconducteurs composites

3.7**champ (magnétique) critique** **H_c**

champ magnétique correspondant à l'énergie de condensation supraconductrice à champ magnétique nul

[CEI 60050-815:2000, 815-01-21]

3.8**aimantation (d'un supraconducteur)**

moment magnétique divisé par le volume du supraconducteur

NOTE Le moment magnétique macroscopique est aussi égal au produit du courant de protection et de la surface délimitée par sa ligne de courant fermée dans un supraconducteur composite en plus du moment magnétique induit par tout flux magnétique piégé.

3.9

méthode de mesure des pertes en courant alternatif par aimantation

méthode permettant de déterminer les pertes dues au courant alternatif, dans un matériau, à partir de la surface de la boucle de la courbe d'aimantation

NOTE Lorsque des bobines de détection sont utilisées pour mesurer la variation du flux magnétique afin de déduire l'aimantation de l'échantillon, la méthode est appelée méthode par bobines de détection.

[CEI 60050-815:2000, 815-08-15, modifié]

3.10

méthode par bobines de détection

méthode permettant de déterminer les pertes dues au courant alternatif, dans un matériau, par évaluation de l'énergie électromagnétique dissipée dans ce matériau au moyen des bobines de détection

NOTE Le système de bobines de détection se compose principalement d'un enroulement primaire (aimant supraconducteur alimenté par un courant variable dans le temps) et d'une paire d'enroulements secondaires (bobines de détection), dont l'un (la bobine de détection principale) contient l'échantillon à mesurer et l'autre (la bobine de compensation) a deux fonctions: 1) compenser le signal provenant de la bobine de détection principale lorsqu'elle est vide, 2) fournir des informations sur le balayage du champ.

Ici, la disposition coaxiale et concentrique des bobines de détection illustrée à la Figure 1 est considérée comme la disposition normalisée pour la mesure des pertes en courant alternatif. Pour obtenir un volume suffisant d'éprouvette filamenteuse à mesurer et pour l'exposer à un champ magnétique transverse, il faut enrouler l'échantillon dans une bobine. L'échantillon ainsi préparé est également appelé « éprouvette enroulée ».

3.11

pertes de fond

pertes apparentes générées par la méthode par bobines de détection lorsqu'il n'y a pas d'éprouvette dans les bobines de détection

NOTE Les pertes de fond indiquent l'erreur expérimentale du système de mesure des pertes en courant alternatif utilisant la méthode par bobines de détection. Elles résultent d'un déplacement de phase du signal électrique dans le processus de compensation, d'un moment magnétique supplémentaire induit dans de nombreux composants de matériel d'expérience et du bruit externe. Les pertes de fond peuvent être réduites en réglant le montage expérimental et elles peuvent être compensées en les soustrayant des pertes en courant alternatif mesurées, comme indiqué en 7.4.2.

3.12

section utile de l'échantillon enroulé

volume total de l'échantillon divisé par la hauteur d'enroulement de l'échantillon ou par la hauteur de la bobine de détection

3.13

flexion

ϵ_b

déformation mécanique résultant d'une flexion pure, définie par $\epsilon_b = 100 r/R$, où r est la demi- épaisseur du spécimen et R est le rayon de courbure de flexion

[CEI 60050-815:2000, 815-08-03]

NOTE Dans la méthode par bobines de détection, l'échantillon enroulé par une technique de réaction et d'enroulement est préparé en se préoccupant du niveau de flexion admissible.

3.14

valeur n (d'un supraconducteur)

n

exposant obtenu dans une gamme spécifique de champs électriques ou de résistivités lorsque la courbe tension-courant $U(I)$ est approchée par l'Equation $U \propto I^n$

[CEI 60050-815:2000, 815-03-10]

4 Principe

L'essai consiste à appliquer un champ magnétique alternatif transverse sur une éprouvette et à détecter le moment magnétique des courants de protection induits dans l'échantillon au moyen de bobines de détection afin d'estimer les pertes en courant alternatif définies en 3.1.

5 Appareillage

5.1 Appareil d'essai

L'appareil d'essai doit être construit de manière à exposer les bobines de détection et l'échantillon enroulé à un champ magnétique alternatif uniforme appliqué par un aimant supraconducteur.

Les bobines de l'appareil d'essai sont disposées comme décrit ci-dessous. Généralement, la bobine de détection principale et la bobine de compensation sont placées de manière coaxiale, respectivement à l'extérieur et à l'intérieur de l'échantillon enroulé.

Le champ magnétique alternatif appliqué doit présenter une uniformité élevée, comme indiqué en 7.1.5.

L'appareil d'essai comprend un sous-système qui calcule l'aimantation et les pertes en courant alternatif de l'échantillon en intégrant le signal des bobines de détection. Un circuit électrique type pour la mesure des pertes en courant alternatif est illustré à la Figure 2.

5.2 Bobines de détection

Les bobines de détection doivent être composées de fils isolés très fins, tels que des fils en cuivre de 0,1 mm de diamètre, afin d'éviter les courants de Foucault à basses températures.

Les supports de bobinage des bobines de détection doivent être composés d'un matériau non métallique et non magnétique, tel que du plastique renforcé en fibre de verre, de la résine phénolique, etc.

La bobine de détection principale doit être placée de manière coaxiale et concentrique à l'extérieur de la bobine de compensation. La disposition normalisée est illustrée à la Figure 1. Elle montre que la longueur de la bobine de compensation est identique à celle de la bobine de détection principale. Le nombre de spires de la bobine de compensation doit être en général légèrement supérieur au niveau d'équilibre dans lequel le flux de liaison total du champ magnétique appliqué dans la bobine de compensation est égal à celui de la bobine de détection principale.

Le système de bobines de détection doit être construit de manière à pouvoir facilement placer et retirer l'échantillon enroulé dans et hors du système.

La méthode par bobines de détection comporte des erreurs géométriques en fonction de la disposition de l'échantillon enroulé et des bobines de détection. L'erreur géométrique est mentionnée brièvement dans l'Annexe C. Pour obtenir une faible incertitude due aux effets géométriques inférieurs à 1 %, la disposition suivante pour l'échantillon enroulé et les deux bobines de détection doit être la disposition normalisée: une éprouvette enroulée de 30 mm de hauteur et de 18 mm de rayon, des bobines de détection de 10 mm de haut, et 2 mm de différence entre le rayon de l'échantillon et celui de chaque bobine de détection. Lorsque la disposition de l'échantillon et des bobines de détection varie légèrement par rapport à la disposition normalisée ci-dessus, son erreur géométrique doit être estimée comme indiqué à

l'Annexe C. Si l'erreur géométrique ne peut pas être estimée quantitativement, il pourrait être nécessaire d'effectuer l'étalonnage indiqué à l'Annexe D.

5.3 Circuit de compensation

Le flux de liaison total du champ appliqué dans la bobine de compensation est généralement légèrement supérieur à celui de la bobine de détection principale de par le nombre de spires choisi. Le signal provenant de la bobine de détection principale est contrebalancé par un signal réduit de la bobine de compensation au moyen d'un circuit de compensation. Pour un réglage précis du coefficient de réduction, appelé coefficient de compensation, le circuit de compensation a habituellement la structure d'un diviseur de potentiel résistif avec une large plage de réglage de quatre ou cinq chiffres, à savoir une unité réglable minimale d'une partie sur 10^4 ou une partie sur 10^5 . Le réglage précis utilisant la large gamme du circuit produit une compensation complète jusqu'à pratiquement éliminer l'inclinaison de la boucle magnétique selon les procédures de 7.4.1. Le nombre de chiffres du circuit de compensation est conçu à condition que l'unité de réglage minimal soit suffisamment précise comparée au rapport de la composante associée au moment sur celle qui est associée au champ dans le signal provenant de la bobine de détection principale.

6 Préparation de l'échantillon

6.1 Éprouvette enroulée

6.1.1 Enroulement de l'échantillon

Un support de bobinage doit être utilisé pour enrouler l'échantillon afin de réaliser un solénoïde monocouche. Lorsque l'échantillon de fil supraconducteur est électriquement isolé, les spires enroulées du solénoïde doivent être jointivement enroulées. Si l'échantillon est nu, les spires doivent être séparées par une entretoise non métallique et non magnétique telle qu'une ligne de pêche pour assurer l'isolation des spires de l'échantillon. Le diamètre de l'entretoise doit correspondre environ à la moitié du diamètre de l'échantillon. Si les effets de la désaimantation due aux spires adjacentes doivent être atténués, l'échantillon doit également être enroulé en insérant une entretoise appropriée entre les spires.

6.1.2 Configuration de l'échantillon enroulé

La hauteur d'enroulement de l'échantillon doit être supérieure à trois fois celle de la bobine de détection afin de réduire l'erreur géométrique résultant des effets d'extrémité de l'échantillon enroulé.

6.1.3 Flexion maximale

L'échantillon enroulé de chaque fil supraconducteur doit être préparé et agencé entre deux bobines de détection concentriques en tenant compte de la tolérance admissible de la flexion. Pour les échantillons en fils de Nb-Ti, la flexion maximale ne doit pas dépasser un niveau admissible pour la mesure de courant continu critique.

NOTE Pour la mesure de courant continu critique des supraconducteurs composites en Nb-Ti, le niveau admissible de 3 % est indiqué dans la CEI 61788-1 (2006) [3].

6.1.4 Traitement de la section d'extrémité de l'échantillon

Les deux extrémités d'un échantillon doivent être ouvertes et polies avec du papier émeri de $14 \mu\text{m}$ (800 mesh) à $7 \mu\text{m}$ (1 000 mesh) pour empêcher les filaments d'entrer en contact.

6.2 Structure d'enroulement de l'échantillon

La structure sur laquelle l'échantillon est enroulé doit être composée d'un matériau non métallique et non magnétique tel que du plastique renforcé en fibre de verre et de la résine phénolique. Un adhésif, par exemple du cyanoacrylate ou de la résine époxy, doit être utilisé

pour fixer l'échantillon sur la structure d'enroulement et conserver ainsi la structure d'enroulement cylindrique.

7 Conditions d'essai

7.1 Champ magnétique appliqué externe

7.1.1 Amplitude du champ appliqué

La condition normale relative à l'amplitude du champ appliqué doit être comprise entre environ 0,1 T et 1 T en tenant compte de la plage de fréquences pour évaluer la constante de temps de couplage.

NOTE Dans les essais antérieurs à tour de rôle, la mesure de l'amplitude du champ appliqué était de 1 T dans la plage de 0,005 Hz à 1 Hz pour les fils multifilamentaires en Cu/Nb-Ti et 0,5 T de 0,005 Hz à 10 Hz pour les fils supraconducteurs à trois composants, comme représenté à l'Article A.2.

7.1.2 Direction du champ appliqué

Dans l'échantillon enroulé, le champ externe doit être appliqué le long de l'axe de la bobine.

7.1.3 Forme d'onde du champ appliqué

La forme d'onde normalisée du champ appliqué doit être sinusoïdale ou triangulaire.

7.1.4 Fréquence du champ appliqué

La présente méthode doit être utilisée dans la gamme de fréquences allant jusqu'aux fréquences de distribution à 50 Hz et 60 Hz pour mesurer la perte totale en courant alternatif. Dans la région des fréquences supérieures, on doit prêter attention à diminuer le bruit électromagnétique provenant des parties métalliques au voisinage des bobines de détection, comme indiqué à l'Annexe A.

Pour les fils supraconducteurs avec des filaments fins, le nombre de points de mesure doit être supérieur à cinq dans une plage de fréquences importante sur une échelle logarithmique de façon à calculer la constante de temps de couplage d'après la dépendance linéaire des pertes par couplage par rapport à la fréquence, comme indiqué en 8.6. Pour mesurer la dépendance à la fréquence des pertes en courant alternatif, l'amplitude du champ appliqué doit être fixe.

NOTE La dépendance linéaire des pertes par couplage par rapport à la fréquence est observée dans la gamme des fréquences inférieures et des amplitudes plus faibles du champ magnétique appliqué [4]. Si les pertes par couplage ne dépendent pas linéairement de la fréquence à un niveau d'amplitude fixe, la plage des fréquences de mesure doit être décalée vers le bas afin d'obtenir la linéarité. Des plages de fréquences recommandées sont indiquées à l'Article A.2 pour les fils multifilamentaires en Cu/Nb-Ti et les fils supraconducteurs à trois composants.

7.1.5 Uniformité du champ appliqué

Le champ appliqué doit être uniforme à 5 % près sur la longueur d'enroulement de l'échantillon et à 1 % près sur la longueur des bobines de détection.

7.2 Montage de l'échantillon

L'échantillon enroulé doit être disposé de manière coaxiale et concentrique entre une bobine de détection principale et une bobine de compensation.

7.3 Température de mesure

L'échantillon et les bobines de détection doivent être immergées dans de l'hélium liquide. La température de mesure doit être déterminée à l'aide d'un thermomètre étalonné ou d'une mesure de pression atmosphérique.

7.4 Procédure d'essai

7.4.1 Compensation

La première étape de la compensation consiste à mesurer un cycle d'hystérésis d'aimantation de l'échantillon pour une amplitude fixe du champ appliqué en soustrayant le signal de la bobine de compensation de celui de la bobine de détection principale tels qu'ils apparaissent. Dans la mesure où le flux de liaison totale du champ appliqué dans la bobine de compensation est légèrement supérieur à celui de la bobine de détection principale, la boucle d'aimantation obtenue est généralement inclinée par rapport à l'axe horizontal du champ magnétique appliqué.

Lors de la seconde étape de la compensation, le signal provenant de la bobine de compensation est légèrement modifié en multipliant par un coefficient de compensation légèrement inférieur à 1 au moyen du circuit de compensation afin de réduire l'inclinaison de la boucle d'aimantation.

Lors de l'étape finale, le coefficient de compensation est minutieusement déterminé afin que les deux branches de la courbe d'aimantation dans les phases ascendante et descendante soient symétriques par rapport à l'axe horizontal dans les zones entourant les valeurs extrêmes du champ appliqué.

7.4.2 Mesure des pertes de fond

Pour estimer les pertes de fond dans le système des bobines de détection, qui comprend les bobines de détection, le circuit de compensation, les amplificateurs, etc., les pertes apparentes doivent être mesurées lorsqu'il n'y a pas d'échantillon dans les bobines de détection. La procédure de mesure est la même que pour les échantillons réels mentionnés en 7.4.3.

7.4.3 Mesure des pertes

Dans la méthode par bobines de détection, les pertes en courant alternatif doivent être calculées en intégrant le produit du signal compensé provenant de la bobine de détection principale (relatif au moment) et du signal provenant de la bobine de compensation (relatif au champ), selon l'Equation (3). Si les pertes de fond apparentes ne peuvent être négligées dans le système de mesure de pertes, les pertes en courant alternatif pour l'échantillon doivent être calculées en soustrayant les pertes de fond des pertes apparentes mesurées. Lors de la correction par les pertes de fond, on doit tenir compte du signe de la valeur des pertes de fond.

Les pertes en courant alternatif peuvent également être estimées en intégrant l'aimantation pour le champ appliqué dans une période, comme indiqué à l'Annexe B.

7.4.4 Étalonnage

En général, l'étalonnage est une procédure de base pour la mesure des pertes en courant alternatif avec détection imparfaite des signaux. La méthode d'étalonnage recommandée est indiquée à l'Annexe D. En revanche, si les conditions relatives à la configuration des bobines de détection et de l'échantillon enroulé, indiquées aux Articles 5 et 6 et à l'Annexe C, sont satisfaites, les mesures des pertes en courant alternatif et de l'aimantation avec une erreur due à la configuration géométrique inférieure à quelques pour cent peuvent être effectuées sans étalonnage. Toutefois, lorsque la configuration du système de bobines de détection ne

répond pas aux conditions données, l'étalonnage indiqué à l'Annexe D pourrait être nécessaire.

8 Calcul des résultats

8.1 Amplitude du champ magnétique appliqué

Le champ appliqué $H_e(t)$ doit être calculé en substituant la tension mesurée $U_c(t)$ à partir de la bobine de compensation dans l'Equation (1) :

$$H_e(t) = \frac{1}{\mu_0 N_c S_c} \int_0^t U_c(t') dt' \quad (1)$$

où N_c et S_c sont respectivement le nombre de spires et la zone de liaison par spire de la bobine de compensation. Le temps initial d'intégration est un point de passage par zéro de $U_c(t)$. Le niveau zéro du champ magnétique est égal à la valeur médiane entre les niveaux maximaux et minimaux de $H_e(t)$ dans l'Equation (1). L'amplitude doit être obtenue comme la moitié de la différence entre les valeurs maximale et minimale de $H_e(t)$.

8.2 Aimantation

L'aimantation doit être calculée en substituant la tension compensée $U_{p-c}(t)$ provenant des bobines de détection dans l'Equation (2) :

$$M(t) = \frac{1}{\mu_0 N_p S_s} \int_0^t U_{p-c}(t') dt' \quad (2)$$

où N_p est le nombre de spires de la bobine de détection principale et S_s est une section utile de l'échantillon enroulé obtenue en divisant le volume total de l'échantillon par la hauteur de l'échantillon enroulé. Le temps initial d'intégration est un point de passage par zéro de $U_c(t)$. Le niveau zéro de l'aimantation est égal à la valeur médiane entre les niveaux maximaux et minimaux de $M(t)$ dans l'Equation (2).

8.3 Courbe d'aimantation

Sur une période du champ magnétique appliqué débutant au temps initial, la courbe d'aimantation par hystérésis peut être obtenue en relevant les valeurs de l'aimantation pour le champ appliqué. Les niveaux zéro de l'aimantation et du champ appliqué peuvent être obtenus comme indiqué en 8.1 et 8.2.

8.4 Pertes en courant alternatif

Comme indiqué à l'Annexe B, les pertes en courant alternatif par cycle dans un fil supraconducteur peuvent être estimées en intégrant le vecteur de Poynting $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ sur une surface fermée entourant le fil pendant une période T dans un environnement électromagnétique alternatif. Dans ce cas, les pertes en courant alternatif par volume unitaire P [W/m^3] doivent être calculées en substituant la tension compensée U_{p-c} provenant de la bobine de détection principale et le champ magnétique appliqué H_e dans l'Equation (3),

$$P = -\frac{f}{N_p S_s} \int_0^T U_{p-c}(t) H_e(t) dt \quad (3)$$

où f est la fréquence du champ magnétique appliqué égale à $1/T$. Dans des conditions périodiques stables, l'Equation (3) est équivalente à l'expression de l'intégration de l'aimantation déterminée par l'Equation (2) sur un cycle du champ appliqué, comme indiqué à l'Annexe B.

Lorsque les pertes par courants de Foucault dans le métal normal de l'échantillon sont un facteur mineur, les pertes en courant alternatif peuvent être classées dans deux éléments principaux de pertes par hystérésis P_h et de pertes par couplage P_c , en mesurant la dépendance à la fréquence pour une amplitude fixe du champ magnétique appliqué.

Si les pertes de fond ne peuvent pas être négligées dans le système de mesure des pertes, les pertes en courant alternatif doivent être calculées en soustrayant les pertes de fond des valeurs mesurées.

8.5 Pertes par hystérésis

Les pertes par hystérésis dans un volume unitaire de chacun des filaments, P_h , doivent être obtenues comme un niveau extrapolé des pertes en courant alternatif dans un volume unitaire à $f = 0$. Le niveau peut être extrapolé dans la dépendance à la fréquence des pertes en courant alternatif par cycle en utilisant une régression linéaire.

NOTE Dans les mesures où les pertes en courant alternatif ne sont pas divisées en pertes par hystérésis et pertes par couplage, par exemple dans le cas des échantillons avec de faibles valeurs de n , seuls les résultats des pertes totales en courant alternatif sont indiqués.

8.6 Pertes par couplage et constante de temps de couplage [5, 6]

Les pertes par couplage entre les filaments doivent être obtenues en soustrayant les pertes par hystérésis des pertes totales en courant alternatif dans la région des fréquences inférieures où les pertes par couplage par cycle estimées sont proportionnelles à la fréquence. Pour des fils ronds supraconducteurs isotropes avec des filaments fins et une forme d'onde sinusoïdale du champ magnétique appliqué, les pertes par couplage dans un volume unitaire, P_c , sont prédites théoriquement par

$$P_c = 4 \pi^2 \tau \mu_0 H_m^2 f^2 \quad (4)$$

où τ est la constante de temps de couplage et H_m est l'amplitude du champ magnétique appliqué. La constante de temps de couplage peut être calculée à partir du coefficient proportionnel des pertes par couplage par cycle selon la fréquence. Les expressions des pertes par couplage, dans les fils à section circulaire, pour différents types de formes d'onde du champ appliqué sont données à l'Annexe E.

9 Incertitude

9.1 Généralités

Le contexte préalable à l'introduction de l'incertitude, la définition et l'application de la méthode par bobines de détection, sont résumés à l'Annexe F et à l'Annexe G. Les résultats des incertitudes-type combinées relatives évaluées à l'Annexe G sont de 3,8 % pour les pertes par hystérésis et de 5,4 % (5,5 %) pour les pertes par couplage (constante de temps de couplage), comme exemple type pour des conducteurs en NbTi à condition que le rapport entre les pertes par hystérésis et les pertes totales en courant alternatif soit en moyenne de 0,5 à la limite supérieure dans la région des fréquences de mesure. L'incertitude-type cible combinée relative de cette méthode est définie comme une incertitude étendue avec un facteur de recouvrement k de 2, ne dépassant pas respectivement 7,6 % et 10,8 % (11,0 %) dans l'exemple ci-dessus.

9.2 Incertitude des instruments de mesure

Un instrument de mesure avec une incertitude-type relative inférieure ou égale à 0,5 % doit être utilisé. L'instrument de mesure de dimensions doit avoir une incertitude-type relative inférieure ou égale à 0,5 %.

9.3 Incertitude du champ appliqué

Un système de champ magnétique appliqué doit fournir le champ magnétique avec une incertitude-type relative inférieure ou égale à 0,5 %. Le champ appliqué doit avoir une uniformité telle que décrite en 7.1.5.

9.4 Incertitude de la température de mesure

Un cryostat doit fournir l'environnement nécessaire pour la mesure des pertes en courant alternatif et l'échantillon doit être mesuré en immersion dans de l'hélium liquide. La température de l'échantillon est considérée comme identique à celle du liquide. La température du liquide doit être consignée avec une incertitude-type ne dépassant pas 0,05 K. Pour convertir la pression atmosphérique observée dans le cryostat en valeur de température, le diagramme de phases de l'hélium doit être utilisé. La mesure de la pression atmosphérique doit avoir une incertitude suffisamment basse pour obtenir l'incertitude requise de la mesure de température. Pour des profondeurs d'hélium liquide supérieures à 1 m, une correction de hauteur peut être nécessaire.

10 Rapport d'essai

10.1 Identification de l'échantillon

L'échantillon doit être identifié, autant que possible, par les éléments suivants:

- a) nom du fabricant;
- b) classification;
- c) numéro de lot;
- d) matériau de la matrice;
- e) dimension du fil;
- f) diamètre du filament;
- g) nombre de filaments;
- h) espacement entre filaments;
- e) rapport cuivre/non-Cu;
- j) pas de torsade;
- k) rapport de résistance résiduelle (RRR);
- l) épaisseur de la couche de matériau isolant.

10.2 Configuration de l'échantillon enroulé

La configuration suivante de l'échantillon enroulé doit être consignée:

- a) diamètre intérieur;
- b) diamètre extérieur;
- c) hauteur;
- d) nombre de spires;
- e) section utile de l'échantillon enroulé;
- f) rapport volumique du volume d'échantillon enroulé dans la hauteur des bobines de détection par le volume d'espace compris entre les bobines de détection.

10.3 Conditions d'essai

Les conditions d'essai suivantes doivent être consignées;

- a) amplitude du champ appliqué;
- b) forme d'onde du champ appliqué;
- c) fréquence du champ appliqué;
- d) uniformités du champ appliqué sur la longueur de la bobine de l'échantillon et la longueur des bobines de détection;
- e) température de mesure;
- f) méthode de mesure de la température;
- g) durée d'échantillonnage de la tension induite des bobines de détection;
- h) intensité des pertes de fond.

10.4 Résultats

Les résultats suivants doivent être consignés. Lors des mesures répétées de la perte totale en courant alternatif, des pertes par hystérésis et des pertes de couplage (constante de temps de couplage), la valeur moyenne et l'incertitude étendue relative pour le facteur de recouvrement k de 2 doivent être consignées avec le nombre de répétitions n :

- a) pertes totales en courant alternatif, y compris pertes par hystérésis et pertes par couplage;
- b) pertes par hystérésis;
- c) constante de temps de couplage ou pertes de couplage;
- d) courbe d'aimantation.

Lors des mesures où les pertes en courant alternatif ne sont pas divisées en pertes par hystérésis et pertes par couplage, seuls les résultats de a) et d) doivent être consignés.

Il est recommandé de consigner les résultats suivants, même lorsque des erreurs contrôlables, comme l'erreur géométrique du système de bobines de détection mentionné en 5.2 et dans l'Annexe C, peuvent être réduites:

- e) pertes par hystérésis et courbe d'aimantation de l'échantillon étalon en plomb (Pb);
- f) valeurs maximale et minimale de l'aimantation dans une éprouvette étalon en Pb exposée à un champ magnétique externe d'une amplitude de 0,1 T;
- g) champ magnétique critique de l'échantillon étalon en Pb.

10.5 Instruments de mesure

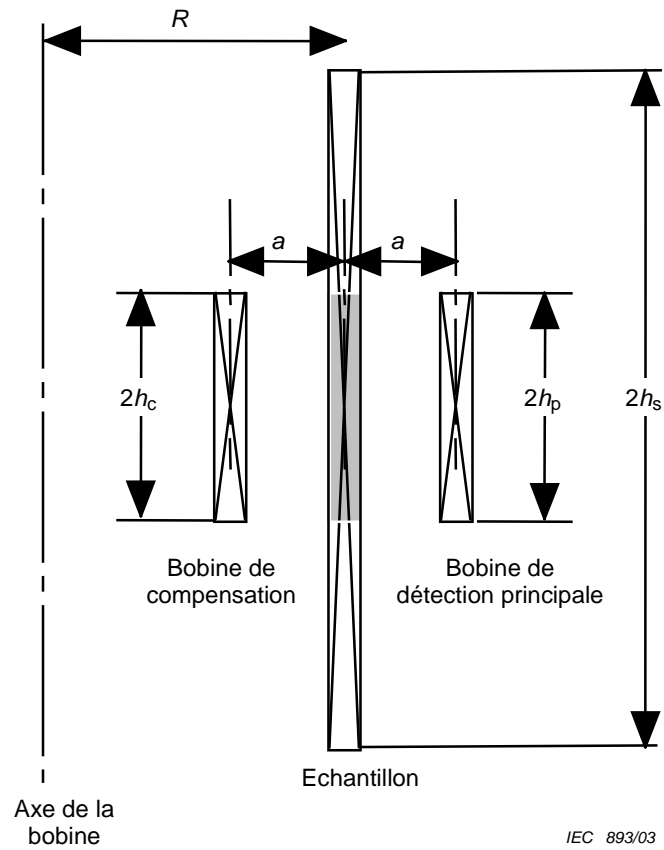
Le rapport d'essai doit contenir les informations suivantes.

10.5.1 Bobines de détection

- a) Rapport de position entre les bobines de détection et l'échantillon enroulé
- b) Paramètres de la bobine de détection principale (diamètre intérieur, diamètre extérieur, hauteur, nombre de spires, matériau et diamètre du fil, matériau de la structure d'enroulement)
- c) Paramètres de la bobine de compensation (diamètre intérieur, diamètre extérieur, hauteur, nombre de spires, matériau et diamètre du fil, matériau de la structure d'enroulement)

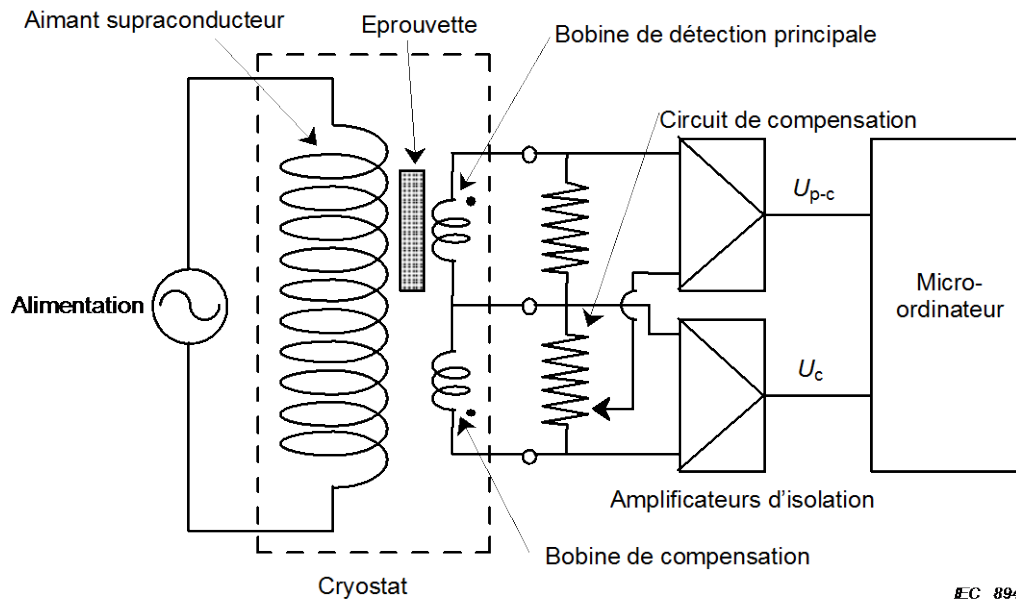
10.5.2 Système de mesure

- a) Circuit électrique du système de mesure
- b) Matériau du cryostat



IEC 893/03

Figure 1 – Disposition normalisée de l'échantillon et des bobines de détection



IEC 894/03

Figure 2 – Circuit électrique type pour la mesure des pertes en courant alternatif par des bobines de détection

Annexe A (informative)

Informations complémentaires concernant les Articles 1 à 10

A.1 Concernant le Domaine d'application

En général, la présente méthode par bobines de détection est applicable à la mesure des pertes totales en courant alternatif des fils supraconducteurs ayant la forme de l'échantillon enroulé indiquée en 6.1 dans des gammes importantes de fréquences et d'amplitudes du champ magnétique appliqué à la température de l'hélium liquide. La limite supérieure de la fréquence indiquée en 7.1.4 est la fréquence maximale qui a été utilisée dans les essais à tour de rôle pour la mesure des pertes en courant alternatif dans des fils multifilamentaires en Cu/Nb-Ti et des fils supraconducteurs à trois composants. Les pertes en courant alternatif dans les fils supraconducteurs peuvent également être mesurées avec cette méthode dans une gamme de fréquences plus élevées en prêtant davantage attention à la diminution du bruit électromagnétique dû aux courants de Foucault générés dans les parties métalliques au voisinage des bobines de détection, incluant des couches de superisolation dans le cryostat non métallique et aux courants de protection induits dans l'enroulement de l'aimant pour le champ magnétique appliqué.

La présente méthode par bobines de détection est applicable non seulement aux fils multifilamentaires en Cu/Nb-Ti et aux fils supraconducteurs à trois composants mais s'étend également en principe à d'autres fils supraconducteurs ronds indiqués dans ce qui suit à condition de pouvoir utiliser la méthode d'étalonnage pour la mesure des pertes en courant alternatif de 7.4.4 et de l'Annexe D.

- a) fils supraconducteurs composites à basse température en Nb_3Sn , Nb_3Al et ainsi de suite;
- b) fils supraconducteurs à température intermédiaire par exemple en MgB_2 ;
- c) fils supraconducteurs à haute température en Bi-2212 et ainsi de suite.

A.2 Constante de temps de couplage

Dans les fils supraconducteurs multifilamentaires, les filaments sont torsadés afin de réduire les pertes par couplage dans un champ magnétique transverse en courant alternatif. Pour les fils supraconducteurs métalliques du commerce, le pas de torsade est conçu de manière à limiter les pertes par couplage à un niveau comparable aux pertes par hystérésis de chacun des filaments dans la tolérance mécanique à la torsade dans des gammes pratiques de fréquences et d'amplitudes du champ magnétique appliqué.

Dans la région de la dépendance linéaire par rapport à la fréquence des pertes de couplage par cycle, la constante de temps de couplage peut être calculée d'après le coefficient de proportionnalité des pertes de couplage par rapport à la fréquence par cycle, à l'amplitude fixe indiquée en 8.6. Pour diminuer l'incertitude lors de l'évaluation de la constante de temps de couplage, les points de mesure doivent être étendus dans une large gamme de fréquences sur une échelle logarithmique, les pertes par hystérésis étant prédominantes dans les pertes en courant alternatif au point de mesure, la fréquence la plus basse et les pertes par hystérésis ainsi que les pertes de couplage étant comparables entre elles au point de mesure par rapport à la valeur la plus grande. Dans les essais antérieurs à tour de rôle, par exemple, la fréquence de mesure était dans la plage de 0,005 Hz à 1 Hz à l'amplitude du champ appliqué de 1 T pour les fils multifilamentaires en Cu/Nb-Ti [7] et à 0,5 T de 0,005 Hz à 10 Hz pour les fils supraconducteurs à trois composants [8].

A.3 Préparation de l'échantillon enroulé

L'échantillon enroulé de chaque fil supraconducteur doit être préparé et agencé entre deux bobines de détection concentriques en prêtant attention à la tolérance admissible de la flexion. Le niveau admissible doit être estimé d'après les conditions de contraintes mécaniques dans la mesure du courant critique. Pour des fils plus épais, les conditions de la flexion produisent un plus grand rayon de l'échantillon enroulé. L'erreur géométrique pour les grands échantillons peut également être estimée en tenant compte du coefficient G indiqué à l'Annexe C. Dans le cas où le rayon admissible de l'échantillon enroulé est en dehors de la plage indiquée à la Figure C.1, un ensemble similaire de dimensions pour l'échantillon enroulé et les bobines de détection pour les exemples donnés doit être utilisé. Par ailleurs, pour un échantillon enroulé préparé au moyen d'une méthode d'enroulement et de réaction, le rayon peut être réglé avant le traitement thermique de réaction, de la même manière que ce qui est indiqué dans la CEI 61788-2 [9] pour la mesure de courant critique de fils supraconducteurs en Nb_3Sn . L'isolation électrique entre les spires voisines de l'échantillon enroulé doit également être assurée.

A.4 Méthode par compensation cryogénique

Une alternative à la compensation de la tension inductive de la bobine de détection représentée à la Figure 2 est une compensation à l'intérieur du cryostat. Dans cette disposition de compensation, la bobine de détection et la bobine de compensation sont connectées en anti-série directement côté froid sans faire sortir les signaux complets du cryostat à la température ambiante et les fournir aux amplificateurs.

Il convient d'adapter le nombre de spires des bobines de détection et de compensation de façon à minimiser le signal inductif restant des bobines connectées en anti-série. Puisque la compensation n'est jamais « parfaite », un réglage précis et nécessaire. Le réglage précis peut être réalisé avec un signal inductif dérivé du courant de l'aimant ou avec du signal provenant d'une petite bobine de compensation située à l'intérieur de l'aimant. Ce réglage précis est réalisé à la température ambiante avec des amplificateurs, de façon similaire à la méthode de compensation décrite en 7.4 et représentée à la Figure 2.

L'avantage de la méthode de compensation cryogénique est que toute la tension des bobines de détection et de compensation n'est pas amenée jusqu'à la température ambiante et fournie aux amplificateurs. Une différence de déphasage du signal dans les deux amplificateurs conduit à une augmentation des pertes de fond (pertes sans échantillon dans les bobines de détection) car une partie du signal inductif apparaît comme un signal de pertes en courant alternatif (en phase). Par ailleurs, les perturbations des signaux dans le câblage entre les bobines de détection et de compensation et les amplificateurs à la température ambiante, qui ne sont pas identiques dans le circuit des bobines de détection et de compensation, peuvent conduire à une augmentation des pertes de fond. Avec la méthode de compensation cryogénique, la plus grande partie de la compensation est réalisée à froid. Aucun signal inductif important n'est fourni aux amplificateurs avec un déphasage possible et le risque de perturbations des signaux entre la température cryogénique et la température ambiante est minimisé. Avec la méthode de compensation cryogénique, l'effet de bobine vide peut être minimisé et la sensibilité de la mesure peut être améliorée.

Annexe B (informative)

Explication de la mesure des pertes en courant alternatif avec le vecteur de Poynting [10]

En général, les pertes en courant alternatif par cycle dans un fil supraconducteur peuvent être estimées en intégrant le vecteur de Poynting $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ sur une surface fermée A entourant le fil dans un environnement électromagnétique périodique. Les pertes en courant alternatif en volume unitaire de l'échantillon sont données par

$$P = -\frac{f}{V_s} \int_0^T dt \int_A d\mathbf{A} \cdot \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (\text{B.1})$$

où E et H sont le champ électrique et le champ magnétique sur la surface A et V_s est le volume de l'échantillon entouré par la surface A . Lorsque l'échantillon est exposé à un champ magnétique alternatif uniforme H_e , les pertes en courant alternatif peuvent être mesurées par les bobines de détection de la manière suivante. Dans la disposition de l'échantillon et des bobines de détection illustrée à la Figure 1 par exemple, l'Equation (B.1) est modifiée pour devenir

$$P = -\frac{f d_p}{V_s} \int_0^T dt H_e \int_{\Gamma} ds E = -\frac{f}{n_p V_s} \int_0^T dt H_e U_{p-c} \quad (\text{B.2})$$

où d_p est un pas moyen d'enroulement des bobines de détection, n_p est le nombre de spires par unité de longueur pour la bobine de détection principale, et Γ est un trajet le long de l'enroulement dans une couche. De cette façon, les pertes en courant alternatif peuvent être estimées en intégrant le produit du champ magnétique appliqué H_e et de la tension compensée aux bornes U_{p-c} provenant des bobines de détection pendant la période donnée. Dans la Figure 1, la portion de l'échantillon entouré par la surface fermée est indiquée en grisé. En substituant l'aimantation M déterminée par l'Equation (2), l'Equation (B.2) devient

$$P = \mu_0 f \int_0^T H_e \frac{\partial M}{\partial t} dt = \mu_0 f \oint H_e dM \quad (\text{B.3})$$

Dans des conditions périodiques stables dans lesquelles la courbe d'aimantation par période est fermée, l'Equation (B.3) peut être modifiée comme suit

$$P = -\mu_0 f \oint M dH_e \quad (\text{B.4})$$

L'erreur géométrique provenant de la configuration de l'échantillon et des bobines de détection est due à une approximation de la surface A au moyen d'une surface latérale de la bobine de détection. L'analyse quantitative est présentée à l'Annexe C.

Annexe C (informative)

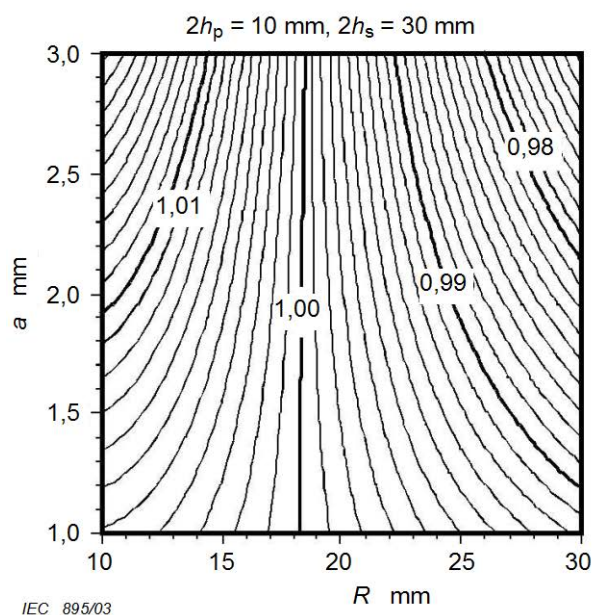
Estimation de l'erreur géométrique dans la méthode par bobines de détection

La méthode par bobines de détection présente une erreur géométrique, comme suggéré dans l'Annexe B, due à une détection imparfaite par les bobines de détection. Si l'aimantation apparente M obtenue à partir de l'Equation (2) est égale à $G(h_p, h_c, h_s, R, a) M_0$, l'Equation (B.4) conduit à l'expression suivante

$$P = -\mu_0 f G(h_p, h_c, h_s, R, a) \oint M_0 dH_e \tag{C.1}$$

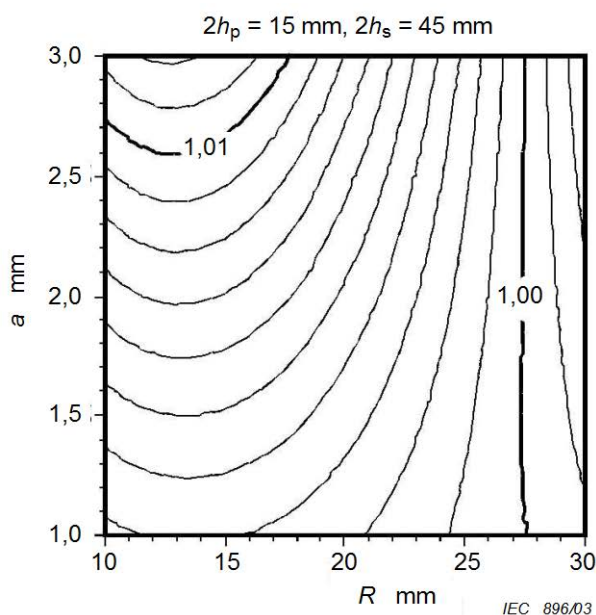
où M_0 est l'aimantation réelle induite dans l'échantillon. Un coefficient G donne l'erreur géométrique et dépend uniquement d'une hauteur $2h_p$ de la bobine de détection principale, d'une hauteur $2h_c$ de la bobine de compensation et d'une hauteur d'enroulement $2h_s$ de l'échantillon enroulé, d'un rayon R de l'échantillon enroulé et d'une différence a entre les rayons de l'échantillon et de chaque bobine de détection [11]. Il est possible de mesurer relativement précisément les pertes en courant alternatif lorsque le coefficient G approche de 1.

Selon cette estimation de l'erreur géométrique, on obtient la condition $|G - 1,00| < 0,01$ dans la disposition normalisée de l'échantillon enroulé et des bobines de détection donnée en 5.2. La Figure C.1 indique également l'erreur géométrique lorsque la disposition est légèrement différente de la disposition normalisée.



IEC 895/03

Figure C.1a – Exemple 1



IEC 896/03

Figure C.1b – Exemple 2

Figure C.1 – Exemples de courbe de niveau pour le coefficient G

Annexe D (informative)

Méthode recommandée pour l'étalonnage de l'aimantation et des pertes en courant alternatif

D.1 Grandes lignes de l'étalonnage

L'étalonnage de l'aimantation est recommandé pour compenser des mesures incomplètes de la variation dans le temps dans le moment magnétique induit dans l'échantillon, même lorsque des erreurs contrôlables, telles que l'erreur géométrique du système de bobines de détection mentionnée à l'Annexe C, peuvent être réduites. Une éprouvette étalon d'un supraconducteur de type I tel qu'un fil de plomb (Pb) de grande pureté doit être utilisée pour l'étalonnage de l'aimantation. L'aimantation peut être étalonnée au moyen de la valeur de crête de la courbe réversible de $M - H_e$, comme indiqué à l'Article D.4. La procédure de mesure de l'aimantation pour l'échantillon étalon est en principe identique à celle utilisée pour l'échantillon réel, à l'exception de la configuration d'enroulement et des conditions d'essai qui sont décrites ci-dessous.

D.2 Configuration d'enroulement de l'échantillon étalon

L'échantillon étalon doit être co-bobiné de manière lâche avec un fil non métallique et non magnétique tel qu'une ligne de pêche, pour l'isolation entre spires dans une bobine monocouche. Il est recommandé que le diamètre de l'entretoise corresponde à environ la moitié du diamètre du fil de l'échantillon.

Les deux extrémités de l'échantillon étalon doivent être ouvertes. La condition de la hauteur d'enroulement pour l'échantillon étalon est la même que celle de l'échantillon réel.

D.3 Conditions d'essai de l'échantillon étalon

Lorsque l'échantillon étalon est en Pb, l'amplitude du champ appliqué doit être égale à 0,1 T. La forme d'onde du champ appliqué doit être sinusoïdale et la fréquence comprise dans la gamme 0,006 Hz à 0,06 Hz. Une forme d'onde triangulaire peut aussi être utilisée comme forme d'onde du champ appliqué.

D.4 Étalonnage pour l'aimantation de l'échantillon étalon

Il est bien connu que la pente de la courbe d'aimantation mesurée sur un supraconducteur de type I avec une désaimantation finie dépend de la magnitude du facteur de désaimantation, mais que la désaimantation maximale est toujours la même et égale à la force du champ magnétique critique H_c . Ceci est confirmé par les résultats expérimentaux obtenus avec un magnétomètre SQUID comme illustré à la Figure D.1a. Quand la courbure des courbes est estimée par extrapolation linéaire, les valeurs crêtes expérimentales sont toujours les mêmes et égales à une force de champ critique de 39,8 kA/m avec une erreur de 5 %, en parfait accord avec la force de champ mesurée directement, où l'aimantation disparaît.

Deux ensembles de résultats expérimentaux sur un fil en Pb pur par la méthode par bobines de détection sont également illustrés à la Figure D.1b. Dans cette figure, les traits pleins et pointillés indiquent respectivement les résultats pour des fréquences de 0,006 Hz et 0,06 Hz. Les bobines de détection et l'échantillon ont été préparés selon les conditions données dans la présente norme. Les courbes d'aimantation présentent une hystérésis qui dépend de la fréquence. Dans la gamme de fréquences ci-dessus, la branche ascendante est reproductible alors que la branche descendante est très sensible à la fréquence [12]. Comme indiqué par une flèche dans la figure, si le niveau de crête de l'aimantation est estimé dans la phase

croissante, le niveau de 43,8 kA/m est égal au champ magnétique critique 42,2 kA/m plus ou moins quelques pour cent.

Le rapport entre le niveau prévu et le niveau mesuré de la crête est un coefficient d'étalonnage utilisé pour les mesures de l'aimantation et des pertes en courant alternatif par le système de bobines de détection. Dans les conditions relatives au système de bobines de détection indiquées dans la présente norme, la mesure des pertes en courant alternatif avec une erreur inférieure à quelques pour cent peut être effectuée sans étalonnage.

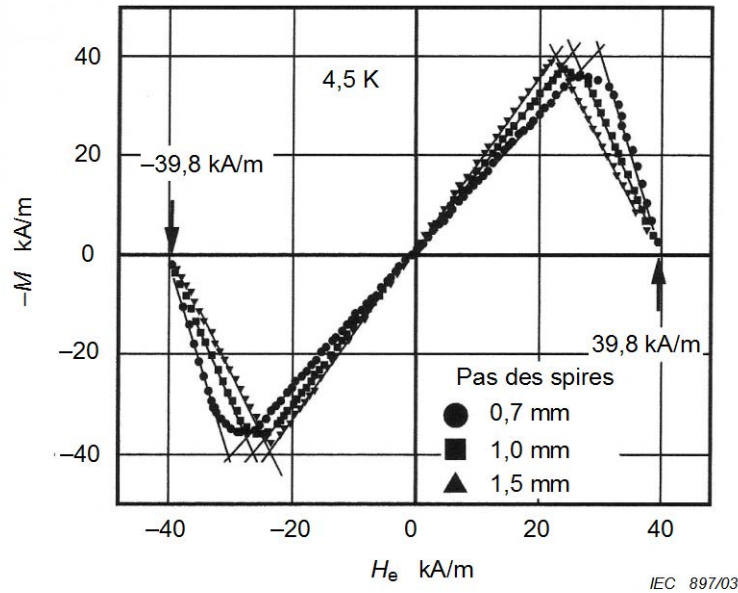


Figure D.1a – Courbes d'aimantation d'une éprouvette étalon en Pb pur (magnétomètre à SQUID)

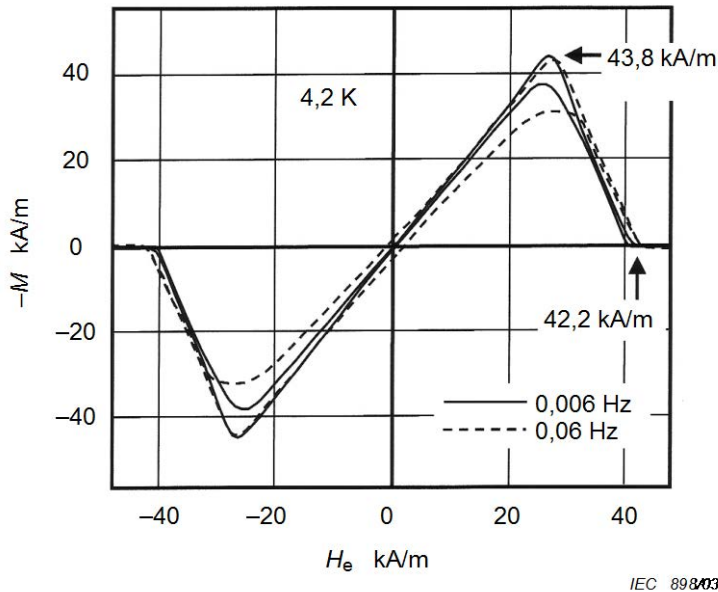


Figure D.1b – Courbes d'aimantation d'une éprouvette étalon en Pb pur (bobine de détection)

Figure D.1 – Évaluation du champ critique à partir des courbes d'aimantation

Annexe E (informative)

Pertes par couplage pour différents types de champ magnétique appliqué

Dans les conditions électromagnétiques mentionnées en 8.6 pour les films supraconducteurs isotropes avec filaments fins, les expressions des pertes par couplage pour deux types de champ appliqué sont données dans les équations suivantes :

$$P_c = 4 \pi^2 \tau \mu_0 H_m^2 f^2 \text{ pour des ondes sinusoïdales} \quad (\text{E.1})$$

$$P_c = 64 \tau \mu_0 H_m^2 f^2 \text{ pour des ondes triangulaires} \quad (\text{E.2})$$

Des paramètres spécifiques pour chaque type de forme d'onde sont illustrés à la Figure E.1.

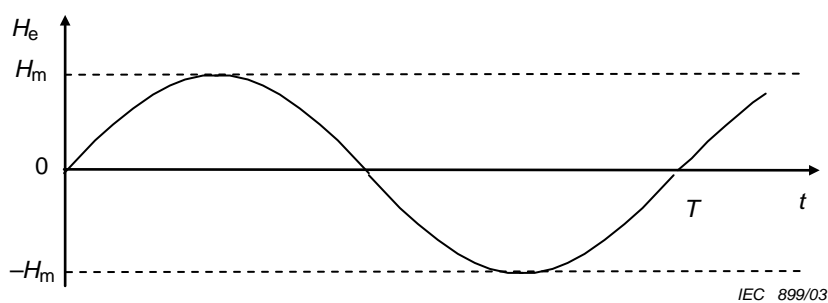


Figure E.1a – Forme d'onde sinusoïdale de période $T = 1/f$

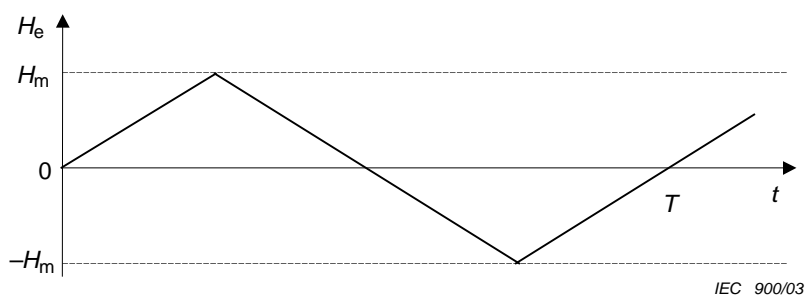


Figure E.1b – Forme d'onde triangulaire

Figure E.1 – Formes d'onde de champ magnétique appliqué dans une période $T = 1/f$

Annexe F (informative)

Considérations relative à l'incertitude

F.1 Vue d'ensemble

Un certain nombre d'organisations internationales de normalisation, incluant la CEI, ont décidé en 1995 d'unifier l'utilisation des termes relatifs aux statistiques dans leurs normes. Il a été décidé d'utiliser le terme « incertitude » pour toutes les expressions statistiques quantitatives (associées à un nombre) et de supprimer l'utilisation quantitative des termes « précision » et « exactitude ». Les termes « exactitude » et « précision » peuvent toujours être utilisés qualitativement. La terminologie et les méthodes d'évaluation de l'incertitude sont normalisées dans le Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM) [1]²⁾.

Il a été laissé au choix de chaque CT de décider de modifier les normes existantes et futures pour les rendre cohérentes avec la nouvelle approche unifiée. Une telle modification n'est pas aisée et crée une confusion supplémentaire en particulier pour les personnes qui ne sont pas familiarisées avec les statistiques et avec le terme incertitude. À la réunion TC 90 de juin 2006 à Kyoto, il a été décidé de mettre en œuvre ces modifications dans les futures normes.

La conversion des valeurs « d'exactitude » et de « précision » en valeurs « d'incertitude » équivalentes nécessite la connaissance des origines des nombres. Le facteur de recouvrement de la valeur d'origine peut être de 1, 2, 3 ou un autre nombre. Une spécification d'un fabricant peut parfois être décrite par une distribution rectangulaire conduisant à un nombre de conversion de $1/\sqrt{3}$. Le facteur de recouvrement approprié a été utilisé lors de la conversion du nombre d'origine en incertitude-type équivalente. Il n'est pas nécessaire que l'utilisateur de la norme traite le processus de conversion pour la conformité aux normes du TC 90, celui-ci est uniquement expliqué ici pour informer l'utilisateur de la façon dont les nombres ont été modifiés dans ce processus. Le processus de conversion en terminologie d'incertitude ne modifie pas le besoin des utilisateurs d'évaluer leur incertitude de mesure pour déterminer si les critères de la norme sont satisfaits.

Les modes opératoires indiqués dans les normes de mesure TC 90 ont été conçus pour limiter l'incertitude d'une quelconque quantité pouvant avoir une influence sur la mesure, en se basant sur l'estimation d'ingénierie de Convener et sur la propagation de l'analyse d'erreur.

À chaque fois que cela est possible, les normes ont des limites simples concernant l'influence de certaines quantités, de sorte qu'il n'est pas nécessaire que l'utilisateur évalue l'incertitude de ces quantités.

F.2 Termes et définitions

On peut trouver les termes et les définitions des statistiques auprès de trois sources: le GUM, le guide international de métrologie des termes fondamentaux et généraux en métrologie (VIM) [2], et les directives NIST d'évaluation et d'expression de l'incertitude des résultats de mesure du NIST (NIST) [3]. Tous les termes et définitions statistiques utilisés dans la présente norme ne sont pas explicitement définis dans le GUM. Par exemple, les termes « incertitude-type relative » et « incertitude-type relative combinée » sont utilisés dans le GUM (5.1.6, Annexe J), mais ils ne sont pas formellement définis dans le GUM (voir [3]).

2) Les chiffres entre crochets se réfèrent aux documents de référence de l'Article F.5 de la présente annexe.

F.3 Considération relative au concept d'incertitude

Les évaluations statistiques utilisaient fréquemment autrefois le Coefficient de variation (COV), qui est le rapport entre l'écart type et la moyenne (N.B. le COV est parfois appelé écart type relatif). Ces évaluations ont été utilisées pour évaluer la précision des mesures et fournir l'étroitesse des essais répétés. L'incertitude-type (SU) dépend davantage du nombre d'essais répétés et moins de la moyenne que le COV et dans certains cas, elle fournit donc une image plus réaliste de la dispersion des données et de l'évaluation de l'essai. L'exemple ci-dessous montre un ensemble de mesures de tension de dérive électronique et de fluage à partir de deux extensomètres nominalement identiques utilisant le même conditionneur de signal et le même système d'acquisition de données. Les $n = 10$ paires de données sont prélevées aléatoirement de la feuille de calcul de 32 000 cellules. Ici, l'extensomètre numéro un (E_1) est dans la position de décalage nul, tandis que l'extensomètre numéro deux (E_2) est dévié de 1 mm. Les signaux de sortie sont exprimés en volts.

Tableau F.1 – Signaux de sortie de deux extensomètres nominalement identiques

Signal de sortie [V]	
E_1	E_2
0,001 220 70	2,334 594 73
0,000 610 35	2,334 289 55
0,001 525 88	2,334 289 55
0,001 220 70	2,334 594 73
0,001 525 88	2,334 594 73
0,001 220 70	2,333 984 38
0,001 52 588	2,334 289 55
0,000 915 53	2,334 289 55
0,000 915 53	2,334 594 73
0,001 220 70	2,334 594 73

Tableau F.2 – Valeurs moyennes de deux signaux de sortie

Moyenne (\bar{X}) [V]	
E_1	E_2
0,001 190 19	2,334 411 62

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad [\text{V}] \quad (\text{F.1})$$

Tableau F.3 – Écart types expérimentaux de deux signaux de sortie

Écart type expérimental (s) [V]	
E_1	E_2
0,000 303 48	0,000 213 381

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad [V] \tag{F.2}$$

Tableau F.4 – Incertitudes type de deux signaux de sortie

Incertitude-type (<i>u</i>) [V]	
<i>E</i> ₁	<i>E</i> ₂
0,000 095 97	0,000 067 48

$$u = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad [V] \tag{F.3}$$

Tableau F.5 – Coefficient de variation de deux signaux de sortie

Coefficient de variation (COV) [%]	
<i>E</i> ₁	<i>E</i> ₂
25,498 2	0,009 1

$$COV = \frac{s}{\bar{X}} \tag{F.4}$$

L'incertitude-type est très similaire pour les deux déviations de l'extensomètre. En revanche, le coefficient de variation COV est presque différent d'un facteur de 2 800 entre les deux ensembles de données. Ceci montre l'avantage d'utiliser l'incertitude-type qui est indépendante de la valeur moyenne.

F.4 Exemple d'évaluation d'incertitude pour les normes TC 90

La valeur observée d'une mesure ne coïncide généralement pas avec la valeur réelle du mesurande. La valeur observée peut être considérée comme une estimation de la valeur réelle. L'incertitude fait partie de « l'erreur de mesure » qui est une partie intrinsèque de toute mesure. L'amplitude de l'incertitude est à la fois une mesure de la qualité métrologique des mesures et elle améliore la connaissance du mode opératoire de mesure. Le résultat d'une quelconque mesure physique est constitué de deux parties: une estimation de la valeur réelle du mesurande et l'incertitude de cette « meilleure » estimation. Dans ce contexte, le GUM est un guide constituant une documentation transparente normalisée du mode opératoire de mesure. On peut tenter de mesurer la valeur réelle en mesurant « la meilleure estimation » et en utilisant les évaluations d'incertitude pouvant être considérées comme de deux types: les incertitudes de type A (mesures de laboratoire répétées exprimés en général sous forme de distributions gaussiennes) et les incertitudes de type B (expériences précédentes, données issues de la documentation, informations du fabricant, etc., souvent fournies sous la forme de distributions rectangulaires).

Le calcul d'incertitude utilisant le mode opératoire du GUM est illustré dans l'exemple suivant:

- a) Dans une première étape, l'utilisateur doit déterminer un modèle de mesure mathématique sous forme de mesurande identifié en fonction de toutes les quantités d'entrée. Un simple

exemple d'un tel modèle est fourni pour l'incertitude d'une mesure de force utilisant un dynamomètre.

Force comme mesurande = W (poids de la norme comme attendu) + d_W (données du fabricant) + d_R (contrôles répétés de poids normal/jour) + d_{Re} (reproductibilité des contrôles à des jours différents).

Les quantités d'entrée sont ici: le poids mesuré des poids normaux en utilisant différentes balances (type A), les données du fabricant (type B), des résultats d'essais répétés utilisant le système électronique numérique (type B) et la reproductibilité des valeurs finales mesurées à des jours différents (type B).

- b) Il convient que l'utilisateur identifie le type de distribution pour chaque quantité d'entrée (par exemple, des distributions gaussiennes pour les mesures de type A et des distributions rectangulaires pour les mesures de type B).
- c) Évaluer l'incertitude-type des mesures de type A,

$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}}$ où, s est l'écart type expérimental et n est le nombre total de points de données mesurés.

- d) Évaluer les incertitudes type des mesures de type B:

$u_B = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot d_W^2 + \dots}$ où, d_W est la gamme de valeurs distribuées rectangulaires

- e) Calculer l'incertitude-type combinée pour le mesurande en combinant toutes les incertitudes type en utilisant l'expression suivante:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

On suppose dans ce cas qu'il n'y a aucune corrélation entre les quantités d'entrée. Si l'Equation modèle comporte des termes avec des produits ou des quotients, l'incertitude-type combinée est évaluée en utilisant les dérivées partielles et la relation devient plus complexe en raison des coefficients de sensibilité [4, 5].

- f) Facultatif - l'incertitude-type combinée de l'estimation du mesurande de référence peut être multipliée par un facteur de recouvrement (par exemple 1 pour 68 % ou 2 pour 95 % ou 3 pour 99 %) afin d'augmenter la probabilité pour que l'on s'attende à ce que le mesurande se trouve dans l'intervalle.
- g) Consigner le résultat comme l'estimation du mesurande \pm l'incertitude étendue, ainsi que l'unité de mesure et au minimum, indiquer le facteur de recouvrement utilisé pour calculer l'incertitude étendue et la probabilité de recouvrement estimée.

Pour faciliter le calcul et normaliser le mode opératoire, l'utilisation d'un logiciel du commerce certifié approprié est une méthode directe qui diminue la quantité de travail de routine [6, 7]. En particulier, on peut obtenir facilement les dérivées partielles indiquées lorsqu'on utilise un tel outil logiciel. D'autres références aux directives relatives aux incertitudes de mesure sont indiquées en [3, 8 et 9].

F.5 Documents de référence de cette Annexe F

- [1] ISO/IEC Guide 98-3:2008, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*
- [2] Guide ISO/CEI 99:2007, *Vocabulaire international de métrologie – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM)*
- [3] TAYLOR, B.N. and KUYATT, C.E., *Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results*. NIST Technical Note 1297 (1994) (Disponible à <<http://physics.nist.gov/Pubs/pdf.html>>)

- [4] KRAGTEN, J., Calculating standard deviations and confidence intervals with a universally applicable spreadsheet technique. *Analyst*, **119**, 2161-2166 (1994)
- [5] EURACHEM / CITAC Guide CG 4 Second edition:2000, *Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement*
- [6] Disponible à <http://www.gum.dk/e-wb-home/gw_home.html>
- [7] Disponible à <<http://www.isgmax.com/>>
- [8] CHURCHILL, E., HARRY, H.K., and COLLE, R., *Expression of the Uncertainties of Final Measurement Results*. NBS Special Publication 644 (1983)
- [9] JAB NOTE4 Edition 1:2003, *Estimation of Measurement Uncertainty (Electrical Testing / High Power Testing)*. (Disponible à <<http://www.jab.or.jp>>).

Annexe G (informative)

Évaluation de l'incertitude dans les mesures de pertes en courant alternatif par la méthode par bobines de détection [13]

L'incertitude des mesures de pertes en courant alternatif par la méthode par bobines de détection est principalement attribuée aux effets des conditions de mesure, au traitement du signal et à la division en composantes des pertes en courant alternatif. L'effet des conditions de mesure est évalué au moyen des expressions théoriques de deux composantes principales des pertes en courant alternatif, les pertes par hystérésis P_h et les pertes par couplage P_c . Le traitement du signal est une étape essentielle pour calculer les pertes en courant alternatif avec des sorties expérimentales par les Equations (1) et (2). La troisième composante est une composante supplémentaire divisant les pertes en courant alternatif en deux composantes en suivant les modes opératoires de 8.5 et de 8.6. Les principaux résultats des incertitudes-type combinées relatives pour les deux composantes de pertes dans ces évaluations sont résumés dans le Tableau G.1 comme exemple type pour des conducteurs en NbTi.

L'évaluation d'incertitude pour l'effet des conditions de mesure commence par les incertitudes-type de base pour la température et le champ magnétique, lorsque l'éprouvette est installée, s'ajoutant à celles des appareils de mesure. Ces données initiales sont indiquées dans le texte et dans le Tableau G.1. La propagation des incertitudes-type initiales par rapport à celle de P_h et P_c peut être exprimée par les expressions théoriques suivantes

$$P_h = \frac{4}{3} \mu_0 H_p^2 \left(2 \frac{H_m}{H_p} - 1 \right) f \cong \frac{8}{3} \mu_0 H_p H_m f \quad (\text{G.1})$$

$$P_c = 4\pi^2 \tau \mu_0 H_m^2 f^2 \quad (\text{G.2})$$

par l'intermédiaire du champ de pénétration H_p et de la constante de temps de couplage τ . On doit considérer que les pertes en courant alternatif correspondent pratiquement aux pertes par hystérésis à une limite de fréquence basse de la mesure et sont divisées de manière équivalente en deux composantes à une fréquence supérieure. Les incertitudes-type combinées relatives des pertes en courant alternatif sont exprimées par

$$u_{c,r1}(P_{\text{lower}}) = u_{c,r1}(P_h) \quad \text{à la limite de fréquence inférieure} \quad (\text{G.3})$$

$$u_{c,r1}(P_{\text{upper}}) = \sqrt{\alpha^2 u_{c,r1}^2(P_h) + (1-\alpha)^2 u_{c,r1}^2(P_c)} \quad \text{à la limite de fréquence supérieure} \quad (\text{G.4})$$

où $u_{c,r1}(P_h)$ et $u_{c,r1}(P_c)$ sont respectivement les incertitudes-type combinées de P_h et P_c , obtenues d'après les équations (G.1) et (G.2). Le coefficient α est le rapport entre les pertes par hystérésis et les pertes totales en courant alternatif à la limite de fréquence supérieure, où l'on suppose que $u_{c,r1}(P_h)$ et $u_{c,r1}(P_c)$ sont indépendantes. Il est recommandé de fixer la valeur α dans une plage allant de 0,3 à 0,5. Le Tableau G.1 donne les résultats de l'évaluation d'incertitude pour $\alpha = 0,5$ comme exemple type.

Dans le traitement du signal, on utilise les Equations (1) et (2) pour évaluer l'incertitude. Les incertitudes-type de base pour cette étape sont également énumérées dans le Tableau G.1. Seule l'incertitude-type combinée relative des pertes totales en courant alternatif, $u_{c,r2}(P)$ est évaluée à cette étape. Dans l'évaluation dans les conditions d'une compensation complète, on prend comme hypothèse l'incertitude de U_{p-c} dans (2) presque équivalente à celle du signal d'origine provenant de la bobine de détection. Les résultats de ces deux étapes doivent être intégrés pour l'incertitude-type combinée relative $u_{c,r}(P)$ des pertes en courant alternatif :

$$u_{c,r}(P) = u_{c,r}(P_{\text{lower}}) = \sqrt{u_{c,r1}^2(P_{\text{lower}}) + u_{c,r2}^2(P)} \quad \text{à la limite de fréquence inférieure} \quad (\text{G.5})$$

$$= u_{c,r}(P_{\text{upper}}) = \sqrt{u_{c,r1}^2(P_{\text{upper}}) + u_{c,r2}^2(P)} \quad \text{à la limite de fréquence supérieure.} \quad (\text{G.6})$$

Enfin, les incertitudes-type combinées relatives des composantes P_h et P_c sont évaluées à partir de celles des pertes totales en courant alternatif aux limites de fréquence inférieure et supérieure. L'incertitude-type combinée relative $u_{c,r}(P_h)$ de P_h est considérée comme celle des pertes en courant alternatif à la limite de fréquence inférieure. De cette manière, l'incertitude-type combinée relative $u_{c,r}(P_c)$ de P_c est estimée d'après les pertes en courant alternatif à la limite de fréquence supérieure,

$$u_{u,r}(P_h) = u_{u,r}(P_{\text{lower}}) \quad (\text{G.7})$$

$$u_{c,r}(P_c) = \sqrt{\left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right)^2 u_{c,r}^2(P_h) + \left(\frac{1}{1-\alpha}\right)^2 u_{c,r}^2(P_{\text{upper}})} = \sqrt{\left(\frac{\alpha}{1-\alpha}\right)^2 u_{c,r}^2(P_{\text{lower}}) + \left(\frac{1}{1-\alpha}\right)^2 u_{c,r}^2(P_{\text{upper}})} \quad (\text{G.8})$$

où on utilise la condition telle que les moyennes de P_h et P_c sont équivalentes entre elles à la limite supérieure. L'incertitude-type combinée relative de la constante de temps de couplage est également évaluée avec l'Equation (G.2).

Dans l'ensemble des processus de l'évaluation, les incertitudes sont principalement affectées par la température pour les pertes par hystérésis et la température et l'étape finale de division de pertes pour les pertes par couplage et la constante de temps de couplage.

L'incertitude-type combinée relative cible de cette méthode est définie comme une incertitude étendue U_r avec un facteur de recouvrement k de 2

$$U_r = 2 u_{c,r} \quad (\text{G.9})$$

pour l'incertitude-type combinée relative $u_{c,r}$ des pertes par hystérésis et des pertes par couplage (constante de temps de couplage).

Dans les essais à tour de rôle antérieurs [7], [8], on utilisait le COV pour résumer la comparaison internationale. La relation entre le COV et l'incertitude de chaque composante des pertes en courant alternatif calculées selon la le mode opératoire de l'Annexe G est expliquée dans la bibliographie [10].

**Tableau G.1 – Propagation de l'incertitude relative dans
la méthode par bobines de détection ($\alpha = 0,5$)**

Effet des conditions de mesure		Effet du traitement du signal dans la mesure	
Instrument de mesure	$5,0 \times 10^{-3}$	Nombre de spires de la bobine de détection	$1,5 \times 10^{-3}$
Champ magnétique	$5,0 \times 10^{-3}$	Aire en section transversale de la bobine de détection	$1,0 \times 10^{-2}$
Température	$1,2 \times 10^{-2}$	Intervalle d'échantillonnage de la mesure	$1,4 \times 10^{-6}$
Champ magnétique de pénétration H_p	$3,6 \times 10^{-2}$	Tension aux bornes de la bobine de détection	$3,2 \times 10^{-6}$
Constante de temps de couplage τ	$1,4 \times 10^{-2}$	Champ magnétique de traitement	$1,0 \times 10^{-2}$
Pertes par hystérésis	$3,7 \times 10^{-2}$	Pertes totales de traitement en courant alternatif	$1,0 \times 10^{-2}$
Pertes par couplage	$2,0 \times 10^{-2}$	Intégration des deux effets	
Pertes en courant alternatif à la limite de fréquence inférieure	$3,7 \times 10^{-2}$	Pertes en courant alternatif à la limite de fréquence inférieure	$3,8 \times 10^{-2}$
Pertes en courant alternatif à la limite de fréquence supérieure	$2,1 \times 10^{-2}$	Pertes en courant alternatif à la limite de fréquence supérieure	$2,3 \times 10^{-2}$
Division en composantes des pertes en courant alternatif			
Pertes par hystérésis			$3,8 \times 10^{-2}$
Pertes par couplage			$5,4 \times 10^{-2}$
Constante de temps de couplage			$5,5 \times 10^{-2}$
Incertaineté étendue relative avec $k = 2$			
Pertes par hystérésis			$7,6 \times 10^{-2}$
Pertes par couplage			$10,8 \times 10^{-2}$
Constante de temps de couplage			$11,0 \times 10^{-2}$

Bibliographie

- [1] SCHMIDT, C., ITOH, K., WADA, H. AC magnetization measurement of hysteresis and coupling losses in NbTi multifilamentary strands. *Cryogenics*, 1997, Vol. 37, No. 2, p. 77-89.
- [2] CEI 61788-13 (2003), *Supraconductivité – Partie 13: Mesure des pertes en courant alternatif – Méthodes de mesure par magnétomètre des pertes par hystérésis dans les composites multifilamentaires de Cu/Nb-Ti*.
- [3] CEI 61788-1 (2006), *Supraconductivité – Partie 1: Mesure du courant critique – Courant critique continu de supraconducteurs en composite Nb-Ti*.
- [4] SUMIYOSHI, F., IRIE, F., YOSHIDA, K., FUNAKOSHI, H. AC loss of a multifilamentary superconducting composite in a transverse ac magnetic field with large amplitude. *J. Appl. Phys.*, 1979, Vol. 50, No. 11, p. 7044-7050.
- [5] CARR Jr., W. J. AC loss in a twisted filamentary superconducting wire. I. *J. Appl. Phys.*, 1974, Vol. 45, No. 2, p. 929-934.
- [6] CAMPBELL, A. M. A general treatment of losses in multifilamentary superconductors. *Cryogenics*, 1982, Vol. 22, No. 1, p. 3-16.
- [7] FUNAKI, K., YUMURA, H., KAWABATA, A., SUGIMOTO, M., ITO, K., OSAMURA, K.: "Standardization of AC loss measurement of Cu/Nb-Ti composites exposed to alternating transverse magnetic field by pickup coil method." *Advances in Superconductivity XII* (Springer-Verlag, Tokyo), 2000, pp. 706-708.
- [8] KAWABATA, S., TSUZURA, H., FUKUDA, Y., FUNAKI, K., OSAMURA, K. Standardization of the pickup coil method for AC loss measurement of three-component superconducting wires. *PHYSICA C: Superconductivity*, 2003, Vol. 392-396, p. 1129-1133.
- [9] CEI 61788-2, *Supraconductivité – Partie 2: Mesure du courant critique – Courant critique continu des supraconducteurs composites Nb₃Sn*.
- [10] KAJIKAWA, K., NAKAMURA, M., IWAKUMA, M., FUNAKI, K. Theoretical evaluation of geometrical errors in AC loss measurements using pickup coil methods. *Advances in Superconductivity X* (Springer-Verlag, Tokyo), 1998, p. 1413-1416.
- [11] KAJIKAWA, K., IWAKUMA, M., FUNAKI, K., WADA, M., TAKENAKA, A. Influences of geometrical configuration on AC loss measurement with pickup coil method. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 1999, Vol. 9, No. 2, p. 746-749.
- [12] MENDELSSOHN, K., PONTIUS, R.B. Time effects in supra-conductors. *Nature*, 1936, July 4, p. 29-30.
- [13] FUNAKI, K., FUJIKAMI, J., IWAKUMA, M., KASAHARA, H., KAWABATA, S., TANAKA, Y., EHARA, K. Uncertainty consideration in AC loss measurement of multi filamentary superconducting wires performed via a pickup coil method. *Cryogenics*, 2010, Vol. 50, p. 111-117.

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