IEC 61788-8

Edition 2.0 2010-06

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

V

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.

® Registered trademark of the International Electrotechnical Commission
Marque déposée de la Commission Electrotechnique Internationale

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*

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 (α = 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*