NORME INTERNATIONALE

INTERNATIONAL STANDARD

CEI
IEC
61788-2

Deuxième édition
Second edition
2006-11

Supraconductivité –

Partie 2:
Mesure du courant critique – Courant critique continu des supraconducteurs composites Nb_3Sn

Superconductivity –

Part 2:
Critical current measurement – DC critical current of Nb_3Sn composite superconductors

© IEC 2006 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

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'éditeur.

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 the publisher.

International Electrotechnical Commission, 3, rue de Varembé, PO Box 131, CH-1211 Geneva 20, Switzerland
Telephone: +41 22 919 02 11 Telefax: +41 22 919 03 00 E-mail: inmail@iec.ch Web: www.iec.ch

Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE W

Pour prix, voir catalogue en vigueur
For price, see current catalogue

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS 6
INTRODUCTION 10

1 Domaine d'application 12
2 Références normatives 12
3 Termes et définitions 14
4 Principe 16
5 Exigences 16
6 Appareillage 18
6.1 Matériau du mandrin de réaction 18
6.2 Construction du mandrin de réaction 18
6.3 Matériaux du mandrin de mesurage 20
6.4 Construction du mandrin de mesurage 20
6.5 Réalisation des mesures 20
7 Préparation du spécimen 20
7.1 Montage du spécimen pour le traitement thermique de réaction 20
7.2 Traitement thermique de réaction 22
7.3 Montage du spécimen pour la mesure 22
7.4 Fixation du spécimen 22
8 Procédure de mesure 24
9 Justesse et précision de la méthode d'essai 26
9.1 Courant critique 26
9.2 Température 26
9.3 Champ magnétique 26
9.4 Structure de support du spécimen 26
9.5 Protection du spécimen 26
10 Calcul des résultats 28
10.1 Critères de courant critique 28
10.2 Valeur *n* (calcul facultatif, se reporter à A.7.2) 30
11 Rapport d'essai 30
11.1 Identification du spécimen d'essai 30
11.2 Compte rendu des valeurs I_C 30
11.3 Compte rendu des conditions d'essai 32

Annexe A (informative) Informations supplémentaires relatives aux Articles 1 à 10 34
Annexe B (informative) Effet de déformation des conducteurs Nb_3Sn 58
Annexe C (informative) Effet du champ induit 62
Annexe D (normative) Méthode à un mandrin 66

Bibliographie 72

CONTENTS

FOREWORD 7
INTRODUCTION 11

1 Scope 13
2 Normative references 13
3 Terms and definitions 15
4 Principle 17
5 Requirements 17
6 Apparatus 19
6.1 Reaction mandrel material 19
6.2 Reaction mandrel construction 19
6.3 Measurement mandrel material 21
6.4 Measurement mandrel construction 21
6.5 Measurement set up 21
7 Specimen preparation 21
7.1 Specimen mounting for reaction heat treatment 21
7.2 Reaction heat treatment 23
7.3 Specimen mounting for measurement 23
7.4 Specimen bonding 23
8 Measurement procedure 25
9 Precision and accuracy of the test method 27
9.1 Critical current 27
9.2 Temperature 27
9.3 Magnetic field 27
9.4 Specimen support structure 27
9.5 Specimen protection 27
10 Calculation of results 29
10.1 Critical current criteria 29
10.2 *n*-value (optional calculation, refer to A.7.2) 31
11 Test report 31
11.1 Identification of test specimen 31
11.2 Report of I_C values 31
11.3 Report of test conditions 33

Annex A (informative) Additional information relating to Clauses 1 to 10 35
Annex B (informative) Strain effect of Nb_3Sn conductors 59
Annex C (informative) Self-field effect 63
Annex D (normative) One-mandrel method 67

Bibliography 73

Figure 1 – Caractéristique *U-I* intrinsèque 28
Figure 2 – Caractéristique *U-I* avec une composante de transfert de courant 28
Figure A.1 – Instrumentation du spécimen avec une paire de prises de tension nulle 44
Figure B.1 – Variabilité du courant critique avec la déformation uniaxiale (traction) pour un fil composite Nb_3Sn typique représentée avec différents champs magnétiques 60

Tableau A.1 – Données concernant la contraction thermique des supraconducteurs Nb_3Sn et matériaux choisis 56

Figure 1 – Intrinsic *U-I* characteristic 29
Figure 2 – *U-I* characteristic with a current transfer component 29
Figure A.1 – Instrumentation of specimen with a null voltage tap pair 45
Figure B.1 – Uniaxial (tensile) strain dependence of critical current for a typical Nb_3Sn composite wire shown with various magnetic fields [7] 61

Table A.1 – Thermal contraction data of Nb_3Sn superconductor and selected materials 57

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

SUPRACONDUCTIVITÉ –

Partie 2: Mesure du courant critique – Courant critique continu des supraconducteurs composites Nb_3Sn

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 n'a prévu aucune procédure de marquage valant indication d'approbation et n'engage pas sa responsabilité pour les équipements déclarés conformes à une de ses Publications.
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 propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 61788-2 a été établie par le comité d'études 90 de la CEI: Supraconductivité.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition publiée en 1999. Les modifications apportées à cette deuxième édition portent essentiellement sur la formulation, sans inclure de modification technique, et sur l'ajout d'une nouvelle annexe (annexe normative D) dans laquelle les spécifications de la méthode à un mandrin sont décrites.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

SUPERCONDUCTIVITY –

Part 2: Critical current measurement – DC critical current of Nb_3Sn composite superconductors

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 provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with an IEC Publication.
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 61788-2 has been prepared by IEC technical committee 90: Superconductivity.

This second edition cancels and replaces the first edition published in 1999. Modifications made to the second edition are mostly wording that essentially includes no technical changes and an addition of a new annex (normative Annex D) in which the specifications in the one-mandrel method are described.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
90/195/FDIS	90/199/FDIS

Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de cette norme.

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

Une liste de toutes les parties de la CEI 61788, sous le titre général: *Supraconductivité*, est disponible 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 maintenance 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.

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

FDIS	Report on voting
90/195/FDIS	90/199/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.

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 maintenance result 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

Les courants critiques des supraconducteurs composites sont utilisés pour établir les limites de conception des applications des fils supraconducteurs. Les conditions de fonctionnement des supraconducteurs dans ces applications déterminent en grande partie leur comportement et il est permis d'utiliser les essais effectués selon la méthode donnée dans la présente norme afin d'obtenir une partie des informations nécessaires pour déterminer si un supraconducteur spécifique est adapté ou non.

Il est également permis d'utiliser les résultats obtenus grâce à la présente méthode pour détecter, dans les propriétés supraconductrices d'un supraconducteur composite, des modifications résultant de variables de traitement, de la manipulation, du vieillissement, d'autres applications ou de conditions ambiantes. La présente méthode est utile dans le contrôle de la qualité, les essais de réception ou de recherche si les précautions données dans la présente norme sont observées.

Les courants critiques des supraconducteurs composites dépendent d'un grand nombre de variables. Il est nécessaire de considérer ces variables aussi bien lors des essais que lors de l'application de ces matériaux. Les conditions d'essai telles que le champ magnétique, la température et l'orientation relative du spécimen, le courant et le champ magnétique sont déterminés en fonction de l'application considérée. Il est permis de déterminer la configuration d'essai en fonction du conducteur considéré avec certaines tolérances. Il est permis de déterminer le critère spécifique de courant critique en fonction de l'application considérée. En cas d'irrégularités lors des essais, il peut être approprié de mesurer un certain nombre de spécimens d'essai.

La méthode d'essai couverte par la présente norme est basée sur celle concernant la détermination du courant critique des supraconducteurs composites Cu/Nb-Ti (CEI 61788-1[2] [1)] et sur les travaux prénormatifs VAMAS (Projet Versailles sur les matériaux et normes avancés) concernant le courant critique des supraconducteurs composites Nb_3Sn. On sait que le courant critique des supraconducteurs Nb_3Sn est très sensible aux déformations mécaniques si on compare avec le cas des supraconducteurs Cu/Nb-Ti. C'est pourquoi certaines modifications sont effectuées dans les procédures d'essai qui peuvent affecter l'état de déformation du spécimen d'essai. Voir l'Annexe B pour l'historique de ces modifications.

---

1) Les chiffres entre crochets se réfèrent à la Bibliographie.

INTRODUCTION

The critical currents of composite superconductors are used to establish design limits for applications of superconducting wires. The operating conditions of superconductors in these applications determine much of their behaviour and tests made with the method given in the present standard may be used to provide part of the information needed to determine the suitability of a specific superconductor.

Results obtained from this method may also be used for detecting changes in the superconducting properties of a composite superconductor due to processing variables, handling, ageing or other applications or environmental conditions. This method is useful for quality control, acceptance or research testing if the precautions given in this standard are observed.

The critical current of composite superconductors depends on many variables. These variables need to be considered in both the testing and the application of these materials. Test conditions such as magnetic field, temperature and relative orientation of the specimen, current and magnetic field are determined by the particular application. The test configuration may be determined by the particular conductor through certain tolerances. The specific critical current criterion may be determined by the particular application. It may be appropriate to measure a number of test specimens if there are irregularities in testing.

The test method covered in this standard is based on that for the determination of the critical current of Cu/Nb-Ti composite superconductors (IEC 61788-1[2] [1)] and the VAMAS (Versailles project on advanced materials and standards) prestandardization work on the critical current of Nb_3Sn composite superconductors. The critical current of Nb_3Sn superconductors is known to be highly sensitive to mechanical strain compared to Cu/Nb-Ti superconductors. Hence, some modifications are made on the test procedures which may affect the strain state of a test specimen. See Annex B for the background to these modifications.

---

1) Figures in square brackets refer to the Bibliography.

SUPRACONDUCTIVITÉ –

Partie 2: Mesure du courant critique – Courant critique continu des supraconducteurs composites Nb_3Sn

1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 61788 traite d'une méthode d'essai pour la détermination du courant critique continu des supraconducteurs composites Nb_3Sn qui sont fabriqués soit par le procédé du bronze, soit par le procédé de diffusion interne de l'étain, et dont le rapport cuivre/non-cuivre est supérieur à 0,2.

La présente méthode est destinée à être utilisée avec des supraconducteurs caractérisés par des courants critiques inférieurs à 1 000 A et des valeurs *n* supérieures à 12 dans des conditions d'essai normalisées et avec des champs magnétiques inférieurs ou égaux à 0,7 fois la valeur du champ magnétique critique le plus élevé. Le spécimen d'essai est immergé dans un bain d'hélium liquide à une température mesurée pendant l'essai. Le conducteur d'essai composite Nb_3Sn a une structure monolithique avec une surface de section ronde totale inférieure à 2 mm^2. Le spécimen utilisé dans la présente méthode d'essai a la forme d'une bobine inductive. La présente norme indique les écarts par rapport à la méthode d'essai permis dans des essais individuels de série et d'autres restrictions spécifiques.

Les conducteurs Nb_3Sn ayant des courants critiques supérieurs à 1 000 A ou des surfaces de section supérieure à 2 mm^2 peuvent être mesurés avec la présente méthode avec une réduction anticipée de précision et un effet de champ induit plus significatif (voir Annexe C). D'autres formes d'essai, plus spécialisées, peuvent être mieux appropriées pour des essais de conducteurs de plus grande taille qui ont été omis dans la présente norme dans un souci de simplicité et de précision.

En principe, il convient que la méthode d'essai indiquée dans la présente norme s'applique aux fils composites Nb_3Sn fabriqués selon un autre procédé. Cette méthode est également supposée adaptable à d'autres fils supraconducteurs composites après des modifications appropriées.

2 Références normatives

Le document référencé ci-après est indispensable pour l'application de ce document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, c'est l'édition la plus récente du document référencé (y compris tous ses amendements) qui s'applique.

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

SUPERCONDUCTIVITY –

Part 2: Critical current measurement – DC critical current of Nb_3Sn composite superconductors

1 Scope

This part of IEC 61788 covers a test method for the determination of the d.c. critical current of Nb_3Sn composite superconductors which are fabricated by either the bronze process or the internal tin diffusion process and have a copper/non-copper ratio larger than 0,2.

This method is intended for use with superconductors which have critical currents of less than 1 000 A and *n*-values larger than 12 under standard test conditions and at magnetic fields of less than or equal to 0,7 times the upper critical magnetic field. The test specimen is immersed in a liquid helium bath at a known temperature during testing. The Nb_3Sn composite test conductor has a monolithic structure with a total round-cross-sectional area that is less than 2 mm^2. The specimen geometry used in this test method is an inductively coiled specimen. Deviations from this test method which are allowed for routine tests and other specific restrictions are given in this standard.

Nb_3Sn conductors with critical currents above 1 000 A or total cross-sectional areas greater than 2 mm^2 can be measured with the present method with an anticipated reduction in precision and a more significant self-field effect (see Annex C). Other, more specialized, specimen test geometries may be more appropriate for larger conductor testing which have been omitted from this present standard for simplicity and to retain precision.

The test method given in this standard should in principle apply to Nb_3Sn composite wires fabricated by any other process. This method is also expected to apply to other superconducting composite wires after some appropriate modifications.

2 Normative references

The following referenced document is 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*