

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

61378-1

Première édition
First edition
1997-09

Transformateurs de conversion –

**Partie 1:
Transformateurs pour applications industrielles**

Convertor transformers –

**Part 1:
Transformers for industrial applications**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 61378-1:1997

Numéros des publications

Depuis le 1er janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000.

Publications consolidées

Les versions consolidées de certaines publications de la CEI incorporant les amendements sont disponibles. Par exemple, les numéros d'édition 1.0, 1.1 et 1.2 indiquent respectivement la publication de base, la publication de base incorporant l'amendement 1, et la publication de base incorporant les amendements 1 et 2.

Validité de la présente publication

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu par la CEI afin qu'il reflète l'état actuel de la technique.

Des renseignements relatifs à la date de reconfirmation de la publication sont disponibles dans le Catalogue de la CEI.

Les renseignements relatifs à ces révisions, à l'établissement des éditions révisées et aux amendements peuvent être obtenus auprès des Comités nationaux de la CEI et dans les documents ci-dessous:

- **Bulletin de la CEI**
- **Annuaire de la CEI**
Accès en ligne*
- **Catalogue des publications de la CEI**
Publié annuellement et mis à jour régulièrement (Accès en ligne)*

Terminologie, symboles graphiques et littéraux

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la CEI 60050: *Vocabulaire Electrotechnique International* (VEI).

Pour les symboles graphiques, les symboles littéraux et les signes d'usage général approuvés par la CEI, le lecteur consultera la CEI 60027: *Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique*, la CEI 60417: *Symboles graphiques utilisables sur le matériel. Index, relevé et compilation des feuilles individuelles*, et la CEI 60617: *Symboles graphiques pour schémas*.

Publications de la CEI établies par le même comité d'études

L'attention du lecteur est attirée sur les listes figurant à la fin de cette publication, qui énumèrent les publications de la CEI préparées par le comité d'études qui a établi la présente publication.

* Voir adresse «site web» sur la page de titre.

Numbering

As from the 1st January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series.

Consolidated publications

Consolidated versions of some IEC publications including amendments are available. For example, edition numbers 1.0, 1.1 and 1.2 refer, respectively, to the base publication, the base publication incorporating amendment 1 and the base publication incorporating amendments 1 and 2.

Validity of this publication

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC, thus ensuring that the content reflects current technology.

Information relating to the date of the reconfirmation of the publication is available in the IEC catalogue.

Information on the revision work, the issue of revised editions and amendments may be obtained from IEC National Committees and from the following IEC sources:

- **IEC Bulletin**
- **IEC Yearbook**
On-line access*
- **Catalogue of IEC publications**
Published yearly with regular updates (On-line access)*

Terminology, graphical and letter symbols

For general terminology, readers are referred to IEC 60050: *International Electrotechnical Vocabulary* (IEV).

For graphical symbols, and letter symbols and signs approved by the IEC for general use, readers are referred to publications IEC 60027: *Letter symbols to be used in electrical technology*, IEC 60417: *Graphical symbols for use on equipment. Index, survey and compilation of the single sheets* and IEC 60617: *Graphical symbols for diagrams*.

IEC publications prepared by the same technical committee

The attention of readers is drawn to the end pages of this publication which list the IEC publications issued by the technical committee which has prepared the present publication.

* See web site address on title page.

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

61378-1

Première édition
First edition
1997-09

Transformateurs de conversion

**Partie 1:
Transformateurs pour applications industrielles**

Convertor transformers –

**Part 1:
Transformers for industrial applications**

© IEC 1997 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
Telefax: +41 22 919 0300

3, rue de Varembé Geneva, Switzerland
e-mail: inmail@iec.ch IEC web site <http://www.iec.ch>



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

U

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

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	4
Articles	
1 Généralités.....	6
1.1 Domaine d'application.....	6
1.2 Classification	8
1.3 Conditions de service normal	8
2 Références normatives	8
3 Définitions	10
4 Régimes assignés	10
4.1 Puissance assignée à la fréquence assignée et capacité de charge.....	12
4.2 Tensions assignée et en service	12
4.3 Courant assigné	14
5 Pertes dues à la charge et chute de tension dans les transformateurs et bobines d'inductance	14
5.1 Détermination des pertes dues à la charge du transformateur en fonction de la distorsion du courant de charge.....	14
5.2 Effet de la disposition géométrique des enroulements sur leurs pertes par courants de Foucault dues à la présence des harmoniques	22
5.3 Pertes dans les bobines d'absorption, dans les bobines d'inductance d'équilibrage de courant, dans les bobines d'inductance de lissage et dans les transducteurs.....	22
5.4 Chutes de tension dans les transformateurs et les bobines d'inductance	24
6 Essais des transformateurs de conversion.....	24
6.1 Mesure de la réactance de commutation et détermination de la chute inductive de tension.....	26
6.2 Mesure du rapport de transformation et du déphasage	26
6.3 Essai de mesure des pertes dues à la charge	28
6.4 Essais d'échauffement	28
Tableau 1 – Montages et facteurs de calcul	34
Annexes	
A Détermination des pertes dues à la charge en service au courant non sinusoïdal assigné en fonctionnement en conversion à partir des mesures au courant assigné du transformateur à la fréquence fondamentale	38
B Courants d'essais de court-circuit et pertes dues à la charge des transformateurs pour convertisseurs à simple voie (injection des pertes totales).....	56
Figures	
A.1 Section d'un conducteur d'enroulement.....	42
A.2 Identification des bornes pour couplage d'enroulements Y yy0	46
A.3 Identification des bornes pour couplage d'enroulements D d y.....	52

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
Clause	
1 General	7
1.1 Scope	7
1.2 Classification	9
1.3 Normal service conditions	9
2 Normative references	9
3 Definitions	11
4 Ratings	11
4.1 Rated power at rated frequency and load capability	13
4.2 Rated and service voltages	13
4.3 Rated current	15
5 Load loss and voltage drop in transformers and reactors	15
5.1 Determination of transformer load loss under distorted current loading	15
5.2 Effect of geometrical arrangement of windings on their eddy current losses due to harmonics	23
5.3 Losses in interphase transformers, current-balancing reactors, series-smoothing reactors and transductors	23
5.4 Voltage drops in transformers and reactors	25
6 Tests for converter transformers	25
6.1 Measurement of commutating reactance and determination of the inductive voltage drop	27
6.2 Measurement of voltage ratio and phase displacement	27
6.3 Load loss test	29
6.4 Temperature rise tests	29
Table 1 – Connections and calculation factors	34
Annexes	
A Determination of transformer service load loss at rated non-sinusoidal converter current from measurements with rated transformer current of fundamental frequency	39
B Short-circuit test currents and load losses in transformers for single-way converters (total loss injection)	57
Figures	
A.1 Cross-section of a winding strand	43
A.2 Terminal identification for winding connection Y yy0	47
A.3 Terminal identification for winding connection D d y	53

COMMISSION ELECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

TRANSFORMATEURS DE CONVERSION –

Partie 1: Transformateurs pour applications industrielles

AVANT-PROPOS

- 1) La CEI (Commission Electrotechnique Internationale) 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. 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 intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les documents produits se présentent sous la forme de recommandations internationales. Ils sont publiés comme normes, rapports techniques ou guides et agréés comme tels par les Comités nationaux.
- 4) Dans le but d'encourager l'unification internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent à appliquer de façon transparente, dans toute la mesure possible, les Normes internationales de la CEI dans leurs normes nationales et régionales. Toute divergence entre la norme de la CEI et la norme nationale ou régionale correspondante doit être indiquée en termes clairs dans cette dernière.
- 5) La CEI n'a fixé aucune procédure concernant le marquage comme indication d'approbation et sa responsabilité n'est pas engagée quand un matériel est déclaré conforme à l'une de ses normes.
- 6) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Norme internationale 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 61378-1 a été établie par le comité d'études 14 de la CEI: Transformateurs de puissance.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
14/261/FDIS	14/270/RVD

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

Les annexes A et B sont données uniquement à titre d'information.

La CEI 61378 comprend les parties suivantes, présentées sous le titre général: Transformateurs de conversion:

- Partie 1: Transformateurs pour applications industrielles;
- Partie 2: Transformateurs pour applications courant continu à haute tension (à l'étude)
- Partie 3: Guide d'application (à l'étude)

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

CONVERTOR TRANSFORMERS –**Part 1: Transformers for industrial applications**

FOREWORD

- 1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the 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, the IEC publishes International Standards. 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. The 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 the 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 National Committees.
- 3) The documents produced have the form of recommendations for international use and are published in the form of standards, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.
- 5) The IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with one of its standards.
- 6) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this International Standard may be the subject of patent rights. The IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 61378-1 has been prepared by IEC technical committee 14: Power transformers.

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

FDIS	Report on voting
14/261/FDIS	14/270/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.

Annexes A and B are for information only.

IEC 61378 consists of the following parts, under the general title: Convertor transformers:

- Part 1: Transformers for industrial applications
- Part 2: Transformers for HVDC applications (under consideration)
- Part 3: Application guide (under consideration)

TRANSFORMATEURS DE CONVERSION –

Partie 1: Transformateurs pour applications industrielles

1 Généralités

1.1 *Domaine d'application*

La présente Norme internationale traite des spécifications, de la conception et des essais des transformateurs de puissance et des bobines d'inductance qui sont destinés à être intégrés dans des installations de conversion à semiconducteurs; cette norme n'est pas applicable en général aux transformateurs conçus pour la distribution industrielle ou publique de puissance en courant alternatif.

Le domaine d'application de cette norme est limité aux applications des convertisseurs de puissance, de quelque puissance que ce soit, pour la distribution locale, à tension de conversion assignée modérée, généralement pour des applications industrielles, et typiquement avec une tension maximale pour équipement n'excédant pas la classe 36 kV.

Cette norme n'est pas applicable aux transformateurs de puissance pour la transmission de puissance CCHT. Ceux-ci sont des transformateurs à haute tension et ils sont soumis à des essais diélectriques en courant continu.

Les normes pour l'installation complète de conversion (CEI 60146 ou autres publications relatives à des champs particuliers d'application) peuvent contenir des prescriptions de garanties et d'essais (par exemple isolement et niveaux de pertes) pour toute l'installation comprenant le transformateur de conversion et éventuellement les transformateurs auxiliaires et des bobines d'inductance. Cela n'empêche pas que les prescriptions de la présente norme concernant les garanties et les essais s'appliquent au transformateur de conversion lui-même comme composant séparé avant d'être assemblé avec le restant de l'installation de conversion.

Les garanties, les essais de type et de service définis dans cette norme s'appliquent aussi bien aux transformateurs fournis comme partie d'un ensemble d'équipement de conversion qu'aux transformateurs commandés séparément mais destinés à être utilisés dans des installations de conversion. Toute garantie supplémentaire ou vérification spéciale doit faire l'objet d'un accord spécifique dans le contrat du transformateur.

Les transformateurs de conversion couverts par cette norme peuvent être de conception immergée dans l'huile ou du type sec. A moins que des exceptions spécifiques ne soient prescrites dans la présente norme, les transformateurs doivent être conformes à la CEI 60076 pour les transformateurs immergés dans l'huile et à la CEI 60726 pour les transformateurs du type sec.

NOTES

1 Pour certaines applications en conversion, il est possible d'utiliser des transformateurs communs de distribution de conception normalisée. L'utilisation de tels transformateurs normalisés dans des applications spéciales en conversion peut nécessiter un certain déclassement. Ce sujet n'est pas spécifiquement couvert dans la présente norme qui traite des prescriptions à imposer à des unités spécialement conçues. Il est possible d'estimer ce déclassement à partir des formules données en 5.1 et aussi de l'article 9 de la CEI 60076-8.

2 Lorsque des transformateurs du type sec sont utilisés pour cette application, il convient d'apporter un soin particulier dans la prise en compte des courtes constantes de temps applicables et des pertes par courants de Foucault accrues dans les conducteurs de grande section et dans les enroulements en feuilles.

CONVERTOR TRANSFORMERS –

Part 1: Transformers for industrial applications

1 General

1.1 Scope

This International Standard deals with the specification, design and testing of power transformers and reactors which are intended for integration within semiconductor convertor plants; it is not applicable to transformers designed for industrial or public distribution of a.c. power in general.

The scope of this standard is limited to applications of power convertors, of any power rating, for local distribution, at moderate rated convertor voltage, generally for industrial applications and typically with a highest voltage for equipment not exceeding 36 kV.

This standard is not applicable to transformers for HVDC power transmission. These are high-voltage transformers, and they are subjected to d.c. voltage tests.

The standards for the complete convertor plant (IEC 60146, or other publications dedicated to particular fields of application) may contain requirements of guarantees and tests (such as insulation, power loss) for the whole plant, including the convertor transformer and possibly auxiliary transformers and reactor equipment. This does not relieve the application of the requirements of this standard concerning the guarantees and tests applicable to the convertor transformer itself as a separate component before being assembled with the remainder of the convertor plant.

The guarantees, service and type tests defined in this standard apply equally to transformers supplied as part of an overall convertor package, or to those transformers ordered separately but for use with convertor equipment. Any supplementary guarantee or special verification has to be specifically agreed in the transformer contract.

The convertor transformers covered by this standard may be of the oil-immersed or dry-type design. Unless specific exceptions are stated in this standard, the transformers are required to comply with IEC 60076 for oil-immersed transformers, and with IEC 60726 for dry-type transformers.

NOTES

1 For some convertor applications, it is possible to use common distribution transformers of standard design. The use of such standard transformers in the special convertor applications may require a certain derating. This matter is not specifically covered in this standard, which deals with the requirements to be placed on specially designed units. It is possible to estimate this derating from the formulae given in 5.1, and also from clause 9 of IEC 60076-8.

2 Where dry-type transformers are used, special care should be taken in considering the short time constants applicable and the increased eddy currents flowing in the larger cross-section conductors or foil windings.

Cette norme s'applique seulement aux transformateurs comportant une seule partie active et une seule bobine d'absorption. Pour plusieurs parties actives dans la même cuve, un accord est nécessaire entre l'acheteur et le fabricant pour la détermination et la mesure des pertes.

Cette norme s'applique seulement aux transformateurs à couplage étoile Y et à couplage triangle Δ . Pour d'autres couplages, un accord est nécessaire entre l'acheteur et le fabricant.

1.2 Classification

La classification des convertisseurs et les applications des convertisseurs sont données en 1.3 de la CEI 60146-1-1 et en 1.2 de la CEI 60146-1-2. Pour la conception des transformateurs, il est important de distinguer entre

- les applications avec une tension essentiellement sinusoïdale le long du transformateur, et
- les applications avec des tensions non sinusoïdales où le primaire du transformateur est excité à partir d'un circuit convertisseur de puissance commandé en courant alternatif ou d'un circuit convertisseur à fréquence variable.

Il est aussi important de distinguer entre

- les applications avec une charge continue, comme l'électrolyse, les fours à arc à courant continu, etc., et
- les applications avec des variations de charge cycliques ou irrégulières de courte durée, comme les laminoirs à commande par moteurs réversibles, etc.

Il est nécessaire que des informations sur l'application des convertisseurs soient fournies avec la spécification du transformateur. Cela est détaillé plus complètement dans les paragraphes suivants de la présente norme.

1.3 Conditions de service normal

Les conditions de service normal pour le transformateur doivent être conformes à la CEI 60076-1, à la CEI 60076-2, à la CEI 60726 et à la CEI 60146-1-1.

Il est nécessaire qu'une quelconque déviation de la tension en courant alternatif par rapport à la valeur de la tension assignée ou aux valeurs des tensions de prise, forme d'onde sinusoïdale ou symétrie des trois phases soit inscrite dans les limites de la classe d'immunité B, conformément à 2.5 de la CEI 60146-1-1. Si le transformateur de conversion est alimenté avec une tension non sinusoïdale, une application en convertisseur de fréquence ou en onduleur, il est nécessaire que des informations sur la plage de variation de la forme de la tension de service et sur la variation de sa fréquence soient fournies dans la spécification. Il est aussi important que des informations soient données concernant la composante en courant continu du cycle de tension appliquée.

2 Références normatives

Les documents normatifs suivants contiennent des dispositions qui, par suite de la référence qui y est faite, constituent des dispositions valables pour la présente partie de la CEI 61378. Au moment de la publication, les éditions indiquées étaient en vigueur. Tout document normatif est sujet à révision, et les parties prenantes aux accords fondés sur la présente partie de la CEI 61378 sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des documents normatifs indiqués ci-dessous. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des normes internationales en vigueur.

CEI 60050(421):1990, *Vocabulaire électrotechnique international (VEI) – Chapitre 421: Transformateurs de puissance et bobines d'inductance*

This standard only deals with transformers with one active part and one interphase transformer. For several active parts in the same tank, an agreement between the purchaser and manufacturer is necessary regarding the determination and the measurement of the total losses.

This standard deals only with transformer star Y and delta Δ connections. For other connections an agreement between purchaser and manufacturer is necessary.

1.2 Classification

Classification of convertors and convertor applications are given in 1.3 of IEC 60146-1-1 and in 1.2 of IEC 60146-1-2. From the aspect of transformer design, it is important to distinguish between

- applications with essentially sinusoidal voltage across the transformer, and
- applications with non-sinusoidal voltage where the transformer primary is energized from a convertor circuit for a.c. power control or variable frequency conversion.

It is also important to distinguish between

- applications characterized by a continuous load, such as electrolysis, d.c. arc furnace etc., and
- applications with short-time cyclic or irregular load variation, such as reversible mill-motor drives, etc.

It is required that information about the convertor application be supplied in the transformer specification. This is detailed further in following subclauses of this standard.

1.3 Normal service conditions

Normal service conditions for the transformer shall be in accordance with IEC 60076-1, IEC 60076-2, IEC 60726 and IEC 60146-1-1.

It is required that any deviation of the a.c. voltage from the rated voltage value or tapping voltage value, sinusoidal wave shape or three-phase symmetry be within the limits of immunity class B, according to 2.5 of IEC 60146-1-1. If the convertor transformer is supplied with non-sinusoidal voltage, inverter or frequency convertor application, it is necessary that information on the range of variation of service voltage shape and frequency variation be submitted in the specification. It is also important that information be given regarding the d.c. component of the applied voltage cycle.

2 Normative references

The following normative documents contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this part of IEC 61378. At the time of publication, the editions indicated were valid. All normative documents are subject to revision, and parties to agreements based on this part of IEC 61378 are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent editions of the normative documents indicated below. Members of IEC and ISO maintain registers of currently valid International Standards.

IEC 60050(421):1990, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 421: Power transformers and reactors*

CEI 60076-1:1993, *Transformateurs de puissance – Partie 1 : Généralités*

CEI 60076-2:1993, *Transformateurs de puissance – Partie 2 : Echauffement*

CEI 60076-3:1980, *Transformateurs de puissance – Partie 3 : Niveaux d'isolement et essais diélectriques*

CEI 60076-5:1976, *Transformateurs de puissance – Partie 5 : Tenue au court-circuit*

CEI 60146-1-1:1991, *Convertisseurs à semiconducteurs – Spécifications communes et convertisseurs commutés par le réseau – Partie 1-1: Spécifications des clauses techniques de base*

CEI 60146-1-2:1991, *Convertisseurs à semiconducteurs – Spécifications communes et convertisseurs commutés par le réseau – Partie 1-2: Guide d'application*

CEI 60289:1988, *Bobines d'inductance*

CEI 60354:1991, *Guide de charge pour transformateurs de puissance immergés dans l'huile*

CEI 60076-8:1997, *Guide d'application pour transformateurs de puissance*

CEI 60726:1982, *Transformateurs de puissance de type sec*

CEI 60905:1987, *Guide de charge pour transformateurs de puissance du type sec*

3 Définitions

Pour les besoins de la présente Norme internationale, les définitions de la CEI 60050(421) (VEI) sont applicables. Des définitions additionnelles, plus spécifiques, relatives aux termes concernant les transformateurs et les convertisseurs, sont données dans la CEI 60076-1 et dans la CEI 60146-1-1 respectivement. Pour certains de ces termes, les définitions sont différentes de celles du VEI. Lorsqu'il existe une différence, ce sont les définitions de la CEI 60076-1 et de la CEI 60146-1-1 qui prévalent. Voir, en particulier, les termes définis en 1.5.17, 1.5.18, 1.5.19 et 1.5.22 à 1.5.26 inclus, de la CEI 60146-1-1.

4 Régimes assignés

La CEI 60076-1 s'applique, avec les additions et explications des paragraphes suivants.

Les transformateurs pour application en conversion sont chargés avec des courants non sinusoïdaux et fonctionnent parfois sous tension non sinusoïdale. Même la fréquence peut varier considérablement dans certaines applications.

Le régime assigné des transformateurs est exprimé en grandeurs sinusoïdales à la fréquence fondamentale en régime permanent, avec lesquelles les essais sur les transformateurs seront conduits et auxquelles les garanties correspondantes feront référence.

Les paragraphes suivants indiquent comment déterminer le régime assigné du transformateur lorsque les renseignements concernant le convertisseur et d'autres informations sur la charge sont disponibles.

IEC 60076-1:1993, *Power transformers – Part 1: General*

IEC 60076-2:1993, *Power transformers – Part 2: Temperature rise*

IEC 60076-3:1980, *Power transformers – Part 3: Insulation levels and dielectric tests*

IEC 60076-5 :1976, *Power transformers – Part 5: Ability to withstand short circuit*

IEC 60146-1-1:1991, *Semiconductor convertors – General requirements and line commutated convertors – Part 1-1: Specifications of basic requirements*

IEC 60146-1-2:1992, *Semiconductor convertors – General requirements and line commutated convertors – Part 1-2: Application guide*

IEC 60289:1988, *Reactors*

IEC 60354:1991, *Loading guide for oil-immersed power transformers*

IEC 60076-8:1997, *Application guide for power transformers*

IEC 60726:1982, *Dry-type power transformers*

IEC 60905:1987, *Loading guide for dry-type power transformers*

3 Definitions

For the purpose of this International Standard, the definitions in IEC 60050(421) (IEV) apply. Additional definitions of more specific transformer and convertor terms are given in IEC 60076-1, and IEC 60146-1-1, respectively. Where some of these terms are at variance with earlier general definitions of the same terms, found in the IEV, the terms specified in IEC 60076-1 and IEC 60146-1-1 will take precedence. Particular attention is drawn to the terms defined in 1.5.17, 1.5.18, 1.5.19, and 1.5.22 to 1.5.26 inclusive, of IEC 60146-1-1.

4 Ratings

IEC 60076-1 applies, with the following additions and explanations.

Transformers for convertor application are loaded with non-sinusoidal current, and sometimes work with non-sinusoidal voltage. Even the frequency may vary considerably in certain applications.

The rating of the transformers on which the tests will be conducted and to which the corresponding guarantees are related is expressed in sinusoidal quantities of fundamental frequency in steady state.

The following subclauses provide guidance as to how to determine the transformer rating when the details of the convertor and other information about the loading are available.

4.1 Puissance assignée à la fréquence assignée et capacité de charge

La puissance assignée d'un transformateur de conversion est basée sur les composantes fondamentales de tension et de courant; la puissance assignée triphasée est donc:

$$S_R = \sqrt{3} \times U_1 \times I_1$$

où

U_1 est la valeur efficace de la composante fondamentale de la tension entre phases;

I_1 est la valeur efficace de la composante fondamentale du courant de ligne.

Les prescriptions concernant l'échauffement et le refroidissement doivent être déterminées après avoir tenu compte de l'accroissement des pertes dues aux harmoniques (voir article 5).

La capacité de charge d'un transformateur est essentiellement une question d'échauffement des enroulements. Si les variations de charge sont rapides avec des pointes de 5 min ou moins, la puissance assignée du transformateur sera basée sur la moyenne à long terme des pertes dues à la charge.

Si les variations de charge sont de durée plus longue que celles définies ci-dessus, une étude plus détaillée peut être faite sur les pointes maximales de température pendant les cycles ou pulsations de charge. Des conseils pour la détermination d'une charge constante équivalente, pour ce qui concerne le taux de vieillissement thermique du système d'isolation, peuvent être obtenus dans la CEI 60354 pour les transformateurs immergés dans l'huile, et dans la CEI 60905 pour les transformateurs du type sec. La charge constante équivalente ainsi déterminée peut être considérée comme la puissance assignée du transformateur.

NOTE – Les règles ci-dessus sont justifiées par les constantes de temps thermique considérables des transformateurs. Au tableau 2 de la CEI 60146-1-1, un certain nombre de modèles de cycles de charge conventionnels représentant plusieurs services en conversion sont donnés. Il convient que ces cycles de charge soient vérifiés conformément aux règles données ci-dessus.

Le modèle de variation de la charge doit être inclus par l'acheteur dans la spécification du transformateur pour déterminer une valeur appropriée de la puissance assignée.

4.2 Tensions assignée et en service

4.2.1 Transformateur mis sous tension à partir d'un réseau de puissance en courant alternatif

Pour un transformateur de conversion connecté à un réseau de puissance en courant alternatif, la tension assignée doit être spécifiée conformément à 4.4 de la CEI 60076-1, et à la CEI 60076-8.

4.2.2 Transformateur mis sous tension à partir d'un convertisseur/onduleur avec ou sans variation de fréquence

Dans le cas d'un convertisseur avec une tension du transformateur présentant une considérable distorsion, la tension assignée doit être la valeur efficace de la composante sinusoïdale fondamentale obtenue à partir de la décomposition en série de Fourier de la tension de service maximale en régime permanent.

Dans les applications présentant une telle distorsion de la tension du transformateur, ou une fréquence variable, des informations concernant les tensions appliquées dans diverses conditions de service doivent être données dans la spécification.

NOTE 1 – Pour les applications ci-dessus, c'est l'amplitude de l'induction dans le circuit magnétique qui est le paramètre déterminant, et non l'amplitude d'une tension non sinusoïdale. La valeur du flux est déterminée à partir de l'intégrale tension-temps sur un demi-cycle. Cette valeur sera la valeur maximale en régime permanent. Si des valeurs élevées de courte durée de l'intégrale tension-temps existent, il convient qu'elles fassent également partie de la spécification, pour permettre de vérifier une possible surexcitation.

4.1 Rated power at rated frequency and load capability

The rated power of the convertor transformer is based on the fundamental frequency components of voltage and current, hence the rated three-phase power is:

$$S_R = \sqrt{3} \times U_1 \times I_1$$

where

U_1 is the r.m.s. value of the fundamental component of the line-to-line voltage;

I_1 is the r.m.s. value of the fundamental component of the rated line current.

The temperature rise and cooling requirements of the transformers shall be determined after allowance is made for the increased losses due to harmonics (see clause 5).

The load capability of a transformer is essentially a matter of temperature rise within the windings. If load variations are rapid, with peaks having a duration of 5 min or less, then the power rating of the transformer is based on the long-term average value of the load losses.

If the load variations are of longer duration than those defined above, a more detailed study can be made of the maximum temperature peaks during the load pulse or cycle. Guidance for determination of an equivalent constant loading with respect to the rate of thermal aging of the insulation system can be obtained from IEC 60354 for oil-immersed transformers, and IEC 60905 for dry-type transformers. The equivalent constant load so determined may be taken as the rated power of the transformer.

NOTE – The rules above are justified by the considerable thermal time constants of power transformers. In table 2 of IEC 60146-1-1, a number of conventional load cycle patterns are given, representing different convertor duties. These load cycles should be verified in accordance with the rules given above.

The load variation pattern shall be included by the purchaser in the transformer specification in order to determine a suitable value of rated power.

4.2 Rated and service voltages

4.2.1 Transformer energized from an a.c. power system

For a convertor transformer connected to an a.c. power system, the rated voltage shall be as specified in 4.4 of IEC 60076-1 and in IEC 60076-8.

4.2.2 Transformer energized from a convertor/invertor with or without variable frequency

For a convertor application with a considerably distorted transformer voltage, the rated voltage shall be the r.m.s. value of the sinusoidal fundamental component derived from the Fourier spectrum of the maximum continuous service voltage.

For applications with such a distorted transformer voltage, or with variable frequency, information shall be given in the specification concerning the applied voltage under various service conditions.

NOTE 1 – For the above applications, the amplitude of flux density in the magnetic circuit is the determining parameter, and not the amplitude of a non-sinusoidal voltage. The value of flux is determined by the voltage-time integral over a half-cycle. This value will be the maximum value in continuous service. If short-time higher values of the voltage-time integral exist, they should also be included in the specification, to permit checking against possible overfluxing.

Les pertes à vide du circuit magnétique sont relativement faibles. Donc, aucune correction n'est nécessaire pour la mesure des pertes à vide au regard des harmoniques de tension.

NOTE 2 – L'ondulation correspondante du flux, étant une intégrale par rapport au temps, est relativement plus petite que les pointes de tension de courte durée.

4.3 Courant assigné

Le courant assigné du transformateur est la valeur efficace de la composante fondamentale du courant correspondant à la puissance assignée conformément à 4.1.

5 Pertes dues à la charge et chute de tension dans les transformateurs et bobines d'inductance

La mesure des pertes dues à la charge doit être effectuée avec le courant assigné. Les pertes dues à la charge garanties doivent faire référence à cette mesure.

Les pertes réelles dues à la charge en service comprennent des pertes additionnelles dues à la distorsion du courant. Cette valeur doit être calculée en accord avec la procédure de 5.1. Elle n'est pas garantie, mais doit être fournie à l'acheteur par le fabricant du transformateur.

Les pertes réelles dues à la charge calculées comme ci-dessus doivent être utilisées comme base pour la détermination des échauffements de l'huile et des enroulements, et pour vérifier que les températures n'excèdent pas les valeurs permises par la CEI 60076-2 pour les transformateurs immergés dans l'huile et par la CEI 60726 pour les transformateurs du type sec.

L'essai de type d'échauffement sur le transformateur, quand il est spécifié, doit prendre en compte les pertes dues à la charge en service (voir 5.1 et 6.4).

5.1 Détermination des pertes dues à la charge du transformateur en fonction de la distorsion du courant de charge

Les pertes dues à la charge d'un transformateur sont conventionnellement subdivisées en pertes mesurées en courant continu ($I^2 R$), pertes parasites par courants de Foucault dans les enroulements et les connexions, et pertes parasites supplémentaires dans les parties structurales conductrices du transformateur.

Pour les transformateurs avec basse tension et fort courant dans les enroulements, pour quelques kiloampères, les connexions internes à fort courant nécessitent une analyse séparée des pertes parasites supplémentaires. Les principes utilisés dans la présente norme font référence aux notions suivantes:

- a) les connexions d'enroulement et les boucliers métalliques de grande conductivité tels que cuivre ou aluminium sont des éléments linéaires. Leurs pertes sont proportionnelles au carré du courant:

$$P(I) = \text{constante} \times I^2$$

- b) une relation similaire est aussi valable pour les shunts en tôle magnétique, quand ils sont utilisés dans des conditions non saturées:

$$P(B) = \text{constante} \times B^2$$

où B est l'induction dans le shunt magnétique;

- c) pour les pertes parasites supplémentaires dans les parties structurales en acier, la même relation quadratique peut être utilisée avec une précision raisonnable:

$$P(B) = \text{constante} \times B^2$$

où $B^2 = \text{constante} \times I^2$

No-load core losses in transformers are relatively low. Therefore, no correction is necessary for the measured no-load loss with regard to voltage harmonics.

NOTE 2 – The corresponding flux ripple, being a time-integral, is relatively smaller than the short time voltage peaks.

4.3 Rated current

The rated current of the transformer is the r.m.s. value of the fundamental component of current corresponding to rated power according to 4.1.

5 Load loss and voltage drop in transformers and reactors

The measurement of load loss shall be carried out with the rated current. The load loss guarantee shall be based on this measurement.

The actual load loss in service includes additional loss due to distorted current. This value shall be calculated in accordance with the procedure of 5.1. It is not guaranteed, but shall be provided by the transformer manufacturer for the purchaser.

The actual load loss, calculated as above, shall be used as the base for determining the oil and winding temperature rises, and to verify that they do not exceed the values permitted in IEC 60076-2 for oil-immersed transformers and IEC 60726 for dry-type transformers.

The temperature-rise type test on the transformer, when specified, shall be conducted with allowance for service load loss (see 5.1 and 6.4).

5.1 Determination of transformer load loss under distorted current loading

The load loss in a transformer is conventionally subdivided into loss as measured with d.c. (I^2R loss) and, in addition, eddy loss in windings and connections, and stray losses in conductive structural parts of the transformer.

For transformers with low-voltage high-current windings, in the range of a few kiloamperes, the internal high current connections require a separate analysis of the additional eddy loss. The following principles are used in this standard:

- a) winding connections and metallic shields of high conductivity such as copper or aluminium are linear elements. Their losses are proportional to the square of the current:

$$P(I) = \text{constant} \times I^2$$

- b) a similar relationship is also valid for shields of magnetic core steel, when used in unsaturated conditions:

$$P(B) = \text{constant} \times B^2$$

where B is the flux density in the magnetic shield;

- c) for the stray losses in structural steel parts, a square law relationship may also be used with reasonable accuracy:

$$P(B) = \text{constant} \times B^2$$

where $B^2 = \text{constant} \times I^2$.

En service normal, le courant de charge du transformateur de conversion n'est pas sinusoïdal et, quand il est transformé en série de Fourier, il montre une quantité considérable d'harmoniques. Ce courant non sinusoïdal augmente les pertes par courant de Foucault et les pertes supplémentaires dues au flux de fuite, et accroît de manière significative les pertes totales calculées ou mesurées avec un courant purement sinusoïdal.

Une correction à la plus grande valeur des pertes aux conditions assignées, en charge non sinusoïdale en conversion, est nécessaire pour le dimensionnement thermique du transformateur, et pour le calcul correct des pertes et du rendement de l'installation complète de conversion. Le spectre des harmoniques doit être spécifié par l'acheteur préalablement à la passation de la commande.

Il est nécessaire que le spectre des harmoniques du courant de charge normal soit spécifié par l'acheteur préalablement à la passation de la commande. En l'absence d'information spécifique, un spectre d'harmoniques peut être calculé conformément à 3.6.2 et/ou 3.6.4 de la CEI 60146-1-2. Les pertes dues à la charge en conversion doivent être calculées à partir du spectre d'harmoniques défini ci-dessus et des formules suivantes données dans cet article.

Les règles suivantes sont données pour recalculer les pertes mesurées lors de l'essai, de manière à obtenir la valeur des pertes valable dans les conditions spécifiées de charge en convertisseur.

Liste des variables et relations entre elles

I_L	est la valeur efficace du courant non sinusoïdal de ligne (côté primaire) du transformateur
I_{LN}	est la valeur efficace du courant primaire I_L à la charge assignée en conversion
I_{PN}	est la valeur efficace du courant de phase primaire non sinusoïdal à charge assignée
I_{SN}	est la valeur efficace du courant de phase secondaire non sinusoïdal à charge assignée
I_{PT}	est la valeur efficace du courant de phase primaire pendant les essais de mesure des pertes dues à la charge (première approximation pour l'injection des pertes totales dues à la charge)
I_{ST}	est la valeur efficace du courant de phase secondaire (hexaphasé) pendant les essais de mesure des pertes dues à la charge
I_{WN}	est la valeur efficace du courant assigné dans l'enroulement en essai
I_h	est la valeur efficace du courant harmonique de rang h
I_P	est la valeur du courant de phase primaire sinusoïdal ayant une valeur efficace égale à I_{PN}
I_S	est la valeur du courant de phase secondaire sinusoïdal ayant une valeur efficace égale à I_{SN}
I_1	est la valeur efficace du courant fondamental à charge assignée (c'est-à-dire égale au courant assigné du transformateur)
I_{1P}	est la valeur efficace du courant fondamental de phase primaire du transformateur
I_{1S}	est la valeur efficace du courant fondamental de phase secondaire du transformateur
I_{eq}	est la valeur efficace du courant d'essais sinusoïdal équivalent pour la détermination de l'échauffement de l'enroulement
I_{dN}	est le courant continu assigné
U_{d0}	est la tension continue à vide conventionnelle
h	est le rang de l'harmonique

In normal service, the convertor transformer load current is non-sinusoidal hence, when transformed into a Fourier series, it shows a considerable amount of harmonics. This non-sinusoidal current raises the eddy loss and stray flux loss, and significantly increases the total loss calculated or measured with purely sinusoidal current.

A correction to the higher loss value at rated, non-sinusoidal convertor load is required for the thermal dimensioning of the transformer, and for the correct calculation of the loss and efficiency of the complete convertor installation. The harmonic spectrum shall be specified by the purchaser prior to the time of placing the order.

It is necessary that the harmonic spectrum of current at rated load be specified by the purchaser prior to the time of placing the order. In the absence of specific information, a harmonic spectrum can be derived according to 3.6.2 and/or 3.6.4 of IEC 60146-1-2. The load losses in convertor application shall be calculated from the harmonic spectrum defined above and the following formulae given in this clause.

The following rules are given for the recalculation of the measured loss under test to the loss value valid under the specified convertor loading.

List of variables and relationships between them

I_L	is the r.m.s. value of non-sinusoidal line current of the transformer
I_{LN}	is the r.m.s. value of current I_L at rated convertor load
I_{PN}	is the r.m.s. value of the non-sinusoidal primary phase current at rated load
I_{SN}	is the r.m.s. value of the non-sinusoidal secondary phase current at rated load
I_{PT}	is the r.m.s. value of the primary phase current during load loss tests (first approximation for the injection of the total load loss)
I_{ST}	is the r.m.s. value of the secondary phase current (six phases) during load loss tests
I_{WN}	is the r.m.s. value of the rated current in the winding under test
I_h	is the r.m.s. value of harmonic current, having order number h
I_P	is a sinusoidal primary phase current having an r.m.s. value equal to I_{PN}
I_S	is a sinusoidal secondary phase current having an r.m.s. value equal to I_{SN}
I_1	is the r.m.s. value of the fundamental current, at rated load (that is equal to transformer rated current)
I_{1P}	is the r.m.s. value of the transformer fundamental primary phase current
I_{1S}	is the r.m.s. value of the transformer fundamental secondary phase current
I_{eq}	is the r.m.s. value of the equivalent sinusoidal test current for the determination of winding temperature rise
I_{dN}	is the rated direct current
U_{d0}	is the conventional no-load direct voltage
h	is the harmonic order number

P_0	est la valeur des pertes à vide à tension assignée
P_N	est la valeur des pertes dues à la charge du transformateur avec un courant I_{LN}
P_1	est la valeur des pertes dues à la charge du transformateur avec un courant I_1
P_W	est la valeur des pertes d'enroulement pour le courant I_L
P_{Wh}	est la valeur des pertes d'enroulement pour le courant I_h
P_{W1}	est la valeur des pertes d'enroulement pour le courant I_1
P_{WP}	est la valeur des pertes de l'enroulement primaire pour I_{LN}
P_{WS}	est la valeur des pertes totales de l'enroulement secondaire et des barres des connexions associées pour I_{LN}
P_{WE}	est la valeur des pertes parasites par courants de Foucault dans l'enroulement pour le courant I_L
P_{WEh}	est la valeur des pertes parasites par courants de Foucault dans l'enroulement pour le courant I_h
P_{WE1}	est la valeur des pertes parasites par courants de Foucault dans l'enroulement pour le courant I_1
P_C	est la valeur des pertes de connexions pour le courant I_L
P_{Ch}	est la valeur des pertes de connexions pour le courant I_h
P_{C1}	est la valeur des pertes de connexions pour le courant I_1
P_{CE}	est la valeur des pertes parasites des connexions pour le courant I_L
P_{CEh}	est la valeur des pertes parasites des connexions pour le courant I_h
P_{CE1}	est la valeur des pertes parasites des connexions pour le courant I_1
P_{SE}	est la valeur des pertes supplémentaires parasites dans les parties mécaniques pour le courant I_L
P_{SE1}	est la valeur des pertes supplémentaires parasites dans les parties mécaniques pour le courant I_1
R_W	est la valeur de la résistance d'enroulement en courant continu
R_C	est la valeur de la résistance des connexions en courant continu
F_{WE}	est le facteur d'accroissement des pertes parasites par courants de Foucault dans les enroulements (voir annexe A)
F_{CE}	est le facteur d'accroissement des pertes parasites par courants de Foucault dans les connexions (voir annexe A)
F_{SE}	est le facteur d'accroissement des pertes parasites par courants de Foucault dans les parties mécaniques (voir annexe A)
K_{WE}	est le facteur d'accroissement des pertes parasites par courants de Foucault dans les bobinages à la fréquence fondamentale (voir annexe A)
x	est l'exposant à appliquer au rang de l'harmonique de fréquence pour calculer les accroissements des pertes parasites par courants de Foucault et des pertes parasites supplémentaires

$$I_L^2 = \sum_{h=1}^n I_h^2$$

$$P_{WE} = \sum_{h=1}^n P_{WEh} = F_{WE} \times P_{WE1} = P_W - R_W \times I_L^2$$

où R_W est vu du côté ligne.

P_0	is the no-load loss at rated voltage
P_N	is the transformer load loss with current I_{LN}
P_1	is the transformer load loss with current I_1
P_W	is the winding loss with current I_L
P_{Wh}	is the winding loss with current I_h
P_{W1}	is the winding loss with current I_1
P_{WP}	is the primary winding loss with I_{LN}
P_{WS}	is the total secondary winding and associated busbar loss with I_{LN}
P_{WE}	is the winding eddy loss with current I_L
P_{WEh}	is the winding eddy loss with current I_h
P_{WE1}	is the winding eddy loss with current I_1
P_C	is the connection loss with current I_L
P_{Ch}	is the connection loss with current I_h
P_{C1}	is the connection loss with current I_1
P_{CE}	is the connection eddy loss with current I_L
P_{CEh}	is the connection eddy loss with current I_h
P_{CE1}	is the connection eddy loss with current I_1
P_{SE}	is the structural parts stray loss with current I_L
P_{SE1}	is the structural parts stray loss with current I_1
R_W	is the d.c. resistance of windings
R_C	is the d.c. resistance of connections
F_{WE}	is the eddy loss enhancement factor for windings (see annex A)
F_{CE}	is the eddy loss enhancement factor for connections (see annex A)
F_{SE}	is the stray loss enhancement factor for structural parts (see annex A)
K_{WE}	is the eddy loss enhancement loss for windings at fundamental frequency (see annex A)
x	is the exponent to be applied on the frequency harmonic order in calculations of eddy and stray loss enhancement

$$I_L^2 = \sum_{h=1}^n I_h^2$$

$$P_{WE} = \sum_{h=1}^n P_{WEh} = F_{WE} \times P_{WE1} = P_W - R_W \times I_L^2$$

where R_W is seen from the line side.

$$P_{WE1} = P_{W1} - R_W \times I_1^2$$

$$F_{WE} = \sum_1^n \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \times h^2$$

$$P_{CE} = \sum_1^n P_{CEh} = F_{CE} \times P_{CE1} = P_C - R_C \times I_1^2$$

où R_C est vu du côté ligne.

$$P_{CE1} = P_{C1} - R_C \times I_1^2$$

$$F_{CE} = \sum_1^n \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \times h^{0,8}$$

$$F_{SE} = F_{CE}$$

$$K_{WE} = \frac{P_{WE1}}{R_W \times I_1^2} \text{ (valeur relative)}$$

Les pertes dues à la charge au courant assigné, I_1 , du transformateur sont subdivisées dans les termes suivants:

- i) $I_1^2 R$ pertes en courant continu dans les enroulements et les connexions R_W et R_C (mesurées);
- ii) pertes parasites par courants de Foucault dans les enroulements P_{WE1} (calculées);
- iii) pertes parasites par courants de Foucault dans les barres à fort courant P_{CE1} (déduites);
- iv) pertes parasites supplémentaires dans les parties structurales en acier P_{SE1} (déduites).

La somme $P_{CE1} + P_{SE1}$ est le reste quand les termes i) et de ii) ont été soustraits des pertes totales mesurées.

Les relations suivantes s'appliquent:

$$P_1 = I_1^2 (R_W + R_C) + P_{WE1} + P_{CE1} + P_{SE1}$$

$$P_N = I_{LN}^2 (R_W + R_C) + P_{WE} + P_{CE} + P_{SE}$$

$$= I_{LN}^2 (R_W + R_C) + F_{WE} \times P_{WE1} + F_{CE} \times P_{CE1} + F_{SE} \times P_{SE1}$$

NOTES

- 1 La somme $P_{CE1} + P_{SE1}$ est augmentée d'un facteur d'accroissement commun $F_{CE} = F_{SE}$ pour obtenir les pertes dues à la charge en conversion pour le courant non sinusoïdal assigné.
- 2 Différents enroulements d'un transformateur de conversion peuvent avoir différentes valeurs de puissance assignée et aussi différentes proportions de $I^2 R$ et de pertes parasites par courants de Foucault. Il convient que les composantes respectives soient donc interprétées dans l'équation ci-dessus comme la somme des valeurs calculées pour chaque enroulement pris séparément.
- 3 Les mesures des résistances, spécialement quand la tension secondaire est basse et le courant secondaire élevé, peuvent entraîner des incertitudes par suite
 - a) des difficultés de mesure des faibles valeurs de résistance;
 - b) de l'influence du dispositif de mise en court-circuit.

$$P_{WE1} = P_{W1} - R_W \times I_1^2$$

$$F_{WE} = \sum_1^n \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \times h^2$$

$$P_{CE} = \sum_1^n P_{CEh} = F_{CE} \times P_{CE1} = P_C - R_C \times I_L^2$$

where R_C is seen from the line side.

$$P_{CE1} = P_{C1} - R_C \times I_1^2$$

$$F_{CE} = \sum_1^n \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \times h^{0,8}$$

$$F_{SE} = F_{CE}$$

$$K_{WE} = \frac{P_{WE1}}{R_W \times I_1^2} \text{ (per unit)}$$

The load loss at rated current, I_1 , of the transformer is subdivided into the following terms:

- i) $I_1^2 R$ d.c. loss in windings and connections R_W and R_C (measured);
- ii) eddy losses in windings P_{WE1} (calculated);
- iii) eddy losses in high-current busbars, when present P_{CE1} (derived);
- iv) stray losses induced in structural steel parts P_{SE1} (derived).

The sum of $P_{CE1} + P_{SE1}$ is the remainder when the previous terms from i) and ii) have been subtracted from the measured total loss.

The following relations apply:

$$P_1 = I_1^2 (R_W + R_C) + P_{WE1} + P_{CE1} + P_{SE1}$$

$$P_N = I_{LN}^2 (R_W + R_C) + P_{WE} + P_{CE} + P_{SE}$$

$$= I_{LN}^2 (R_W + R_C) + F_{WE} \times P_{WE1} + F_{CE} \times P_{CE1} + F_{SE} \times P_{SE1}$$

NOTES

- 1 The sum $P_{CE1} + P_{SE1}$ is uprated with a common enhancement factor $F_{CE} = F_{SE}$ to obtain the losses at rated non-sinusoidal convertor load.
- 2 Different windings of a convertor transformer may have different values of rated power and also different proportions of $I^2 R$ and eddy loss. The respective components in the equation above should therefore be interpreted as the sum of values calculated for each winding separately.
- 3 Resistance measurements, especially when the secondary voltage is low and the secondary current is high, may lead to inaccuracies, because of
 - a) difficulties in measuring low resistances;
 - b) the influence of the short-circuiting device.

5.2 Effet de la disposition géométrique des enroulements sur leurs pertes par courants de Foucault dues à la présence des harmoniques

Pour les transformateurs à trois enroulements, la disposition de ceux-ci doit être prise en considération dans le calcul des pertes par courants de Foucault et des pertes supplémentaires dans les parties métalliques structurales.

Deux cas doivent être nécessairement considérés dans le calcul de l'effet des harmoniques sur les pertes dues à la charge.

Cas 1

a) Pour les transformateurs biconcentriques avec l'enroulement primaire disposé radialement entre les deux enroulements de valve (couplage électromagnétique négligeable entre les deux enroulements de valve):

- pour l'enroulement primaire, la décomposition harmonique du courant est définie par

$$h = p \times K \pm 1$$

où p est le nombre de phases de l'enroulement primaire et K est un entier égal à 1, 2, ..., n ;

- pour les deux enroulements de valve, la décomposition harmonique est définie par

$$h = (p/2) \times K \pm 1$$

où $p/2$ est le nombre de phases d'un groupe de valves triphasées et K est un entier égal à 1, 2, ..., n .

b) Pour les transformateurs à deux voies connectées avec double enroulement secondaire axialement disposé et double enroulement primaire axialement disposé et connecté en parallèle, la décomposition harmonique est définie par

$$h = (p/2) \times k \pm 1$$

où $p/2$ est le nombre de phases d'un groupe de valves triphasé et k est un entier égal à 1, 2, ..., n .

Cas 2

Pour les transformateurs avec deux enroulements physiques, où l'enroulement extérieur à courant fort consiste en deux enroulements de valve électrique, réalisés à partir de galettes imbriquées qui sont les parties constitutives d'un enroulement à couplage Δ et Y ou les parties de deux enroulements à couplage Y (le couplage électromagnétique entre les deux enroulements de valve électrique est voisin de 100 %), la décomposition harmonique est définie par:

$$h = p \times K \pm 1$$

où p est le nombre de phases et K est un entier égal à 1, 2, ..., n .

Comparer aux exemples A.1 et A.2 dans l'annexe A.

NOTE – Les enroulements de valve à couplage Y et à couplage Δ sont connectés chacun à un convertisseur hexaphasé.

5.3 Pertes dans les bobines d'absorption, dans les bobines d'inductance d'équilibrage de courant, dans les bobines d'inductance de lissage et dans les transducteurs

Quand des bobines d'absorption, des bobines d'inductance d'équilibrage de courant, des bobines d'inductance de lissage et des transducteurs font partie intégrante d'un transformateur raccordé à un convertisseur statique, les pertes de ces composants doivent être évaluées comme précisé ci-dessous.

NOTE – Les règles définies dans ce paragraphe n'impliquent pas la spécification des pièces individuelles d'équipement dans le contexte d'une norme.

5.2 *Effect of geometrical arrangement of windings on their eddy current losses due to harmonics*

With three-winding transformers, the winding arrangement shall be considered for the calculation of the eddy current losses and of the supplementary losses in structural steel parts.

It is necessary to take into account two cases in the calculation of the effect of the harmonics on the load losses.

Case 1

a) For double concentric transformers with the primary winding positioned radially between the two valve windings (negligible magnetic coupling between the two valve windings):

– for the primary winding, the harmonic content of the current is defined by

$$h = p \times K \pm 1$$

where p is the pulse number of the primary winding and K is an integer equal to 1, 2, ..., n ;

– for the two valve windings, the harmonic content is defined by

$$h = (p/2) \times K \pm 1$$

where $p/2$ is the pulse number of one three-phase valve group and K is an integer equal to 1, 2, ..., n .

b) For transformers with double-way connection with double secondary windings axially disposed and double primary windings axially displaced and connected in parallel, the harmonic content is defined by

$$h = (p/2) \times k \pm 1$$

where $p/2$ is the pulse number of one three-phase valve group and k is an integer equal to 1, 2, ..., n .

Case 2

For transformers with two physical windings, where the outer high current winding consists of two electrical valve windings, built up of interleaved discs that are consecutive parts of a Δ and a Y connected winding, or parts of two Y connected windings (magnetic coupling between electrical valve windings is practically 100 %), the harmonic content is defined by:

$$h = p \times K \pm 1$$

where p is the pulse number and K is an integer equal to 1, 2, ..., n .

Compare with examples A.1 and A.2 in annex A.

NOTE – The Y and Δ connected valve windings are each connected to a six-pulse convertor.

5.3 *Losses in interphase transformers, current-balancing reactors, series-smoothing reactors and transductors*

When interphase transformers, current-balancing reactors, series-smoothing reactors and transductors are integral parts of a transformer for connection to a static convertor, the losses of these components shall be derived as stated below.

NOTE – The rules laid down in this subclause do not imply specification of the individual pieces of equipment in the context of a standard.

5.3.1 Bobines d'absorption

Le fournisseur doit mesurer les pertes dans le fer à une fréquence égale à la fréquence de service normal de cette bobine d'absorption à une tension déterminée pour fournir le flux magnétique correspondant au fonctionnement du convertisseur au courant assigné, à la tension assignée et à la valeur du déphasage spécifiée. Si la fréquence de service ne peut pas être délivrée, la valeur des pertes calculées peut être utilisée.

Les pertes dans l'enroulement doivent être calculées comme le produit de la résistance en courant continu et du carré du courant continu dans l'enroulement.

5.3.2 Bobines d'inductance d'équilibrage de courant

Les pertes dans le fer dans ces bobines d'inductance d'équilibrage de courant sont petites et peuvent être négligées.

NOTE – Les pertes dans l'enroulement font partie de la mesure des pertes du convertisseur, ou bien elles sont calculées comme le produit de la résistance mesurée en courant continu et du carré de la valeur efficace du courant dans l'enroulement.

5.3.3 Bobines d'inductance de lissage

En général, il faut faire référence à la section 8 de la CEI 60289.

Les pertes dans le fer causées par l'ondulation harmonique des composantes de courant sont faibles et peuvent être ignorées.

NOTE – Les pertes dans l'enroulement font partie de la mesure des pertes du convertisseur, ou bien elles sont calculées comme le produit de la résistance en courant continu et du carré du courant continu dans l'enroulement.

5.3.4 Transducteurs

Il est recommandé que les pertes dans le fer du transducteur soient mesurées à l'aide d'un wattmètre à large bande. Le circuit magnétique doit être excité avec une force magnétisante ayant une amplitude d'au moins 5 000 A/m à la fréquence fondamentale.

Les pertes dans le circuit à courant fort au travers de l'enroulement de puissance du transducteur doivent être recalculées en utilisant la valeur de la résistance mesurée ou calculée en courant continu à la température de référence et la valeur efficace du courant d'enroulement non sinusoïdal à la charge assignée.

NOTES

- 1 Pour l'essai de mesure des pertes du circuit magnétique, il est permis d'utiliser un enroulement d'essai qui soit capable d'atteindre la force magnétisante requise avec un courant d'essai convenable. En variante, l'enroulement de commande peut être utilisé.
- 2 Ces pertes sont déduites pour le calcul du rendement.

5.4 Chutes de tension dans les transformateurs et les bobines d'inductance

Les chutes de tension doivent être calculées à partir des mesures de pertes en utilisant les formules données en 3.5 de la CEI 60146-1-1.

6 Essais des transformateurs de conversion

Tous les essais doivent être faits conformément à la CEI 60076-1, à la CEI 60076-2 et à la CEI 60076-3 pour les transformateurs de puissance immergés dans l'huile, et à la CEI 60726 pour les transformateurs du type sec, sauf spécification contraire dans le présent article.

5.3.1 *Interphase transformers*

The supplier shall measure the iron losses at a frequency equal to the normal service frequency of the interphase transformer, and at a voltage calculated to provide the magnetic flux corresponding to operation of the convertor at rated current, voltage and specified phase control. If service frequency cannot be supplied, the calculated loss figure may be used.

The losses in the winding shall be calculated as the product of the d.c. resistance and the square of the direct current in the winding.

5.3.2 *Current-balancing reactors*

The iron losses in current-balancing reactors are small and may be ignored.

NOTE – The losses in the winding are either a part of the convertor loss measurement, or are calculated as the product of the d.c. measured resistance and the square of the r.m.s. current in the winding.

5.3.3 *Series-smoothing reactors*

In general, reference shall be made to section 8 of IEC 60289.

The iron losses caused by harmonic ripple current components are small and may be ignored.

NOTE – The losses in the winding are either part of the convertor loss measurement, or are calculated as the product of the d.c. resistance and the square of the direct current in the winding.

5.3.4 *Transductors*

It is recommended that the transductor core losses be measured using a wide-band wattmeter. The core shall be excited with a magnetizing force having an amplitude of not less than 5 000 A/m at the fundamental frequency.

The losses in the high-current circuit through the transductor power winding shall be calculated using the d.c. resistance, measured or calculated at reference temperature, and the r.m.s. value of the non-sinusoidal winding current at rated load.

NOTES

- 1 When testing for the core loss, it is permitted to use a test winding that is able to achieve the required magnetizing force with a convenient test current. Alternatively, the control or bias winding may be used.
- 2 These losses are derived for use in efficiency calculation.

5.4 *Voltage drops in transformers and reactors*

The voltage drops shall be calculated from the loss measurements using the formulae given in 3.5 of IEC 60146-1-1.

6 Tests for convertor transformers

All tests shall be made in accordance with IEC 60076-1, IEC 60076-2 and IEC 60076-3 for oil-immersed transformers, and IEC 60726 for dry-type transformers, unless otherwise specified in this clause.

Les essais des transformateurs sont répartis en essais individuels, essais de type et essais spéciaux, conformément à 10.1.1, 10.1.2 et 10.1.3 de la CEI 60076-1 pour les transformateurs de puissance immergés dans l'huile, et à la section 5 de la CEI 60726 pour les transformateurs de type sec.

6.1 Mesure de la réactance de commutation et détermination de la chute inductive de tension

6.1.1 Réactance de commutation

Pour mesurer la réactance de commutation, les bornes côté réseau du transformateur doivent être court-circuitées. Un courant alternatif à la fréquence fondamentale définie au point b) de 6.1.2 doit circuler au travers de deux phases consécutives d'un même groupe commutant et la tension entre ces bornes doit être mesurée. La réactance de commutation $2 \times X_t$ est égale à la composante inductive de l'impédance calculée à partir de cette mesure. Au moins deux essais doivent être effectués avec différentes paires de phases dans chaque groupe commutant et la moyenne arithmétique de ces mesures doit être prise égale à la valeur de la réactance de commutation.

Quand le même enroulement de ligne (enroulement primaire) alimente un groupe commutant connecté en parallèle ou en série qui commute simultanément, les enroulements correspondant à ces groupes doivent être connectés phase par phase en parallèle, pour les essais ci-dessus.

6.1.2 Chute inductive de tension

La chute inductive de tension doit être calculée par l'une ou l'autre des méthodes suivantes.

a) Calcul utilisant la formule

$$d_{xtN} = \frac{\delta \times p \times s}{2 \times \pi \times g} \times X_t \times \frac{I_{dN}}{U_{di0}}$$

b) Mesure décrite en 6.1.1 avec une valeur efficace de courant égale à:

$$\frac{\sqrt{2}}{4} \times \frac{\delta}{g} \times I_{dN}$$

où

g est le nombre d'ensembles de groupes commutants entre lesquels I_{dN} se répartit;

I_{dN} est le courant continu assigné;

p est l'indice de commutation;

s est le nombre de groupes commutants en série;

U_{di0} est la tension continue idéale à vide;

δ est le nombre de groupes commutants en commutation simultanée par primaire.

Dans ce cas, la composante inductive de la tension d'entrée, exprimée en valeur réduite à l'unité de la tension assignée entre bornes U_{v0} représente la chute inductive de tension d_{xt1} .

Pour les montages donnés au tableau 1, la chute inductive de tension peut être calculée à partir des résultats des essais en court-circuit côté secondaire spécifiés dans la colonne 17, à l'exception des montages numéros 3, 4, 6, 9 et 12. Pour ces montages, l'essai de court-circuit spécifié en 6.1.1 est recommandé (voir 1.5.4 de la CEI 60146-1-2).

6.2 Mesure du rapport de transformation et du déphasage

Le rapport de transformation doit être mesuré sur chaque prise. Le déphasage doit être vérifié.

The transformer tests are divided into routine, type and special tests in accordance with subclauses 10.1.1, 10.1.2 and 10.1.3 of IEC 60076-1 for oil-immersed transformers, and section 5 of IEC 60726 for dry-type transformers.

6.1 Measurement of commutating reactance and determination of the inductive voltage drop

6.1.1 Commutating reactance

To measure the commutating reactance, the line-side terminals of the transformer shall be short-circuited. An alternating current of fundamental frequency as specified in item b) of 6.1.2 shall be passed through two consecutive phases of the same commutating group, and the voltage between these terminals shall be measured. The commutating reactance $2 \times X_t$ is equal to the inductive component of the impedance calculated from this measurement. At least two tests shall be carried out with different pairs of phases in each commutating group, and the arithmetic mean of these measurements shall be taken as the value of the commutating reactance.

When the same line winding feeds a commutating group connected in parallel or in series which commutates simultaneously, the windings corresponding to these groups shall be connected phase-by-phase in parallel for the above tests.

6.1.2 Inductive voltage regulation

The inductive voltage regulation shall be determined by either of the following two procedures.

- a) Calculation, using the formula

$$d_{xtN} = \frac{\delta \times p \times s}{2 \times \pi \times g} \times X_t \times \frac{I_{dN}}{U_{di0}}$$

- b) Measurement as described in 6.1.1, with an r.m.s. current equal to

$$\frac{\sqrt{2}}{4} \times \frac{\delta}{g} \times I_{dN}$$

where

g is the number of sets of commutating groups between which I_{dN} is divided;

I_{dN} is the rated direct current;

p is the commutation number;

s is the number of commutating groups in series;

U_{di0} is the ideal no-load direct voltage;

δ is the number of commutating groups commutating simultaneously per primary.

In this case, the inductive component of the input voltage, expressed in p.u. of the rated voltage between terminals U_{V0} , represents the inductive voltage regulation d_{xt1} .

For the connections given in table 1, the inductive voltage regulation can be calculated from the results of secondary short-circuit tests specified in column 17, with the exception of connections 3, 4, 6, 9 and 12. For these connections, the short-circuit test specified in 6.1.1 is recommended (see 1.5.4 of IEC 60146-1-2).

6.2 Measurement of voltage ratio and phase displacement

The voltage ratio shall be measured on each tapping. The phase displacement shall be checked.

6.3 Essai de mesure des pertes dues à la charge

Cet essai doit être réalisé pour obtenir les pertes dues à la charge dans le transformateur au courant assigné et à la fréquence fondamentale.

Les connexions appropriées lors des essais en court-circuit sont données aux colonnes 13, 14 et 15 du tableau 1 pour les montages les plus communément utilisés.

Les pertes sont mesurées pour chaque combinaison de court-circuit A , B et C . Les valeurs des pertes mesurées P_A , P_B et P_C sont utilisées pour déterminer la valeur des pertes totales à partir des équations de la colonne 16 du tableau 1.

NOTE – Les pertes dues à la charge sont basées sur l'hypothèse de courants ayant une forme rectangulaire. Dans le cadre de la présente norme, les pertes dues à la charge sont basées sur le spectre des harmoniques de courant fourni par l'acheteur.

Ces résultats d'essais doivent être corrigés afin de les rapporter aux températures de référence suivantes:

- 75 °C pour les transformateurs immergés dans l'huile (voir 10.1 de la CEI 60076-1);
- suivant les prescriptions générales pour les essais de la CEI 60726 pour les transformateurs du type sec.

6.4 Essais d'échauffement

La procédure de l'essai d'échauffement pour les transformateurs immergés dans l'huile selon 5.2.2 de la CEI 60076-2 est modifiée comme décrit ci-dessous en 6.4.1 et 6.4.2.

Ces paragraphes servent aussi de guide, lorsqu'ils sont applicables, pour les essais des transformateurs du type sec (voir article 21 de la CEI 60726).

Le but de cet essai est

- d'établir l'échauffement de l'huile supérieure en régime permanent avec la dissipation des pertes totales égales aux pertes au courant de charge assigné non sinusoïdal en conversion et à la tension assignée sinusoïdale du transformateur;
- d'établir l'échauffement des enroulements au-dessus de l'huile dans les mêmes conditions;
- d'établir l'échauffement des enroulements au-dessus de l'ambiante pour les transformateurs du type sec.

L'échauffement de l'huile et des enroulements est déterminé en utilisant les méthodes décrites en 6.4.1 et 6.4.2.

6.4.1 Injection des pertes totales

Les pertes totales sont la somme des pertes à vide et des pertes dues à la charge. Les pertes dues à la charge sont les pertes développées à partir du courant assigné non sinusoïdal en conversion (voir 5.1). Les pertes à vide correspondent à la tension assignée du transformateur.

Les pertes injectées dans le transformateur doivent être mesurées. Le courant à la fréquence industrielle fondamentale, I , doit être ajusté pour donner la valeur spécifiée pour l'essai aux pertes totales.

Si les moyens d'essai le rendent nécessaire, il est permis de réduire les pertes injectées à au moins 80 % de la valeur spécifiée (voir 5.2.3 et 5.6 de la CEI 60076-2). L'échauffement déterminé à la fin de l'essai doit être corrigé.

6.3 Load loss test

This test shall be performed to obtain the load loss in the transformer at rated current and fundamental frequency.

The appropriate short-circuit connections for the tests are given in columns 13, 14 and 15 of table 1 for the commonly used connections.

The losses are measured for each short-circuit combination *A*, *B* and *C*. The measured loss values P_A , P_B and P_C are used to calculate the total loss figure by the relevant equation in column 16 of table 1.

NOTE – The calculated load losses are based on the assumption of currents having a rectangular waveshape. For the purpose of this standard, losses are based on the harmonic current spectrum supplied by the purchaser.

The test results shall be corrected to the following reference temperature:

- 75 °C for oil-immersed transformers (see 10.1 of IEC 60076-1);
- according to the general requirements for tests in IEC 60726 for dry-type transformers.

6.4 Temperature rise tests

The temperature rise test procedure for oil-immersed transformers according to 5.2.2 of IEC 60076-2 is modified as described in 6.4.1 and 6.4.2 below.

These subclauses also serve as guidance, as applicable, for the testing of dry-type transformers (see clause 21 of IEC 60726).

The purpose of the test is

- to establish the top oil temperature rise in steady-state condition, with dissipation of total loss equal to the loss at rated non-sinusoidal convertor load current, and rated sinusoidal transformer voltage;
- to establish the winding temperature rise above oil under the same conditions;
- to establish the winding temperature rise above ambient for dry-type transformers.

The oil and winding temperature rise values are determined using the methods described in 6.4.1 and 6.4.2.

6.4.1 Total loss injection

The total loss is the sum of the load loss plus the no-load loss. The load loss is the loss developed from the rated, non-sinusoidal convertor current (see 5.1). The no-load loss corresponds to rated transformer voltage.

The loss injected into the transformer shall be measured. The fundamental power-frequency current, *I*, shall be adjusted to give the specified test value of the total loss.

If test facilities make it necessary, it is permissible to reduce the injected power loss to no less than 80 % of the specified value (see 5.2.3 and 5.6 of IEC 60076-2). The temperature rise determined at the end of this test shall then be corrected.

NOTES

1 Dans un transformateur de conversion disposant de deux enroulements secondaires de même puissance assignée, tension assignée et impédance, les deux enroulements secondaires peuvent être court-circuités simultanément lors de l'essai.

2 Il convient de prendre en considération la surcharge possible de l'un des enroulements pendant l'essai de court-circuit pour déterminer s'il convient d'appliquer un essai à pertes réduites (voir annexe B).

6.4.2 Injection des pertes dues à la charge assignée

6.4.2.1 Transformateurs à deux enroulements

Quand l'échauffement de l'huile supérieure a été établi, l'essai doit continuer avec un courant sinusoïdal d'essai équivalent aux pertes dues à la charge pour le courant assigné en conversion. Cette condition doit être maintenue pendant 1 h, pendant laquelle les mesures des températures de l'huile et du fluide de refroidissement doivent être effectuées.

Le courant d'essai équivalent est égal à

$$I_{eq} = I_1 \left(\frac{I_{LN}^2 (R_W + R_C) + (F_{WE} \times P_{WE1})}{I_1^2 (R_W + R_C) + P_{WE1}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

A la fin de l'essai d'échauffement, les températures des deux enroulements doivent être déterminées. Cela s'obtient par une série de mesures des résistances des deux enroulements qui doit être effectuée pendant la période de refroidissement suivant la rapide déconnexion des alimentations et courts-circuits. Voir, pour plus amples informations, 5.2.2 et 5.5, ainsi que les articles C.2 et C.3 de la CEI 60076-2.

6.4.2.2 Transformateur à plus de deux enroulements

Le cas le plus usuel est un transformateur de conversion à trois enroulements avec deux enroulements secondaires ayant la même puissance assignée. Le couplage secondaire est soit étoile-étoile avec une bobine d'absorption, soit avec l'un en étoile et l'autre en triangle.

Le courant d'essai équivalent pour chaque enroulement, l'un après l'autre, doit être fourni et la valeur de l'échauffement d'enroulement doit être obtenue.

La forme générale du courant équivalent est

$$I_{eq} = I_1 \left(\frac{I_{WN}^2 (R_W + R_C) + (F_{WE} \times P_{WE1})}{I_1^2 (R_W + R_C) + P_{WE1}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

La valeur du courant d'essai équivalent pour chaque enroulement doit être obtenue à partir de valeurs spécifiques de la résistance, des pertes parasites par courants de Foucault et du facteur d'augmentation pour cet enroulement.

NOTES

1 Pour les transformateurs avec des enroulements importants dans des réseaux de barres côté secondaire, il peut être difficile, voire impossible, d'obtenir une déconnexion rapide des courts-circuits. Dans ce cas, un accord entre constructeur et acheteur sera recherché concernant les échauffements des enroulements concernés.

2 I_{WN} remplace I_L quand le facteur d'accroissement, F_{WE} , pour l'enroulement en essai est calculé selon l'annexe A.

NOTES

- 1 In a converter transformer having two secondary windings of the same rated power, rated voltage, and impedance, then both secondaries may be short-circuited simultaneously during this test.
- 2 The possible overload of any winding during a short-circuit test should be considered in order to determine whether a reduced test loss should be supplied (see annex B).

6.4.2 Rated load loss injection

6.4.2.1 Two-winding transformer

When the top oil temperature rise has been established, the test shall continue with a sinusoidal test current equivalent to the load loss at rated converter current. This condition shall be maintained for 1 h during which measurements of oil and cooling medium temperatures shall be made.

The equivalent test current is equal to

$$I_{eq} = I_1 \left(\frac{I_{LN}^2 (R_W + R_C) + (F_{WE} \times P_{WE1})}{I_1^2 (R_W + R_C) + P_{WE1}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

At the end of the temperature rise test, the temperatures of the two windings shall be determined. This is done by a series of resistance measurements of the two windings that shall be made during the cooling period following the rapid disconnection of the supply and short circuits. For more details, see 5.2.2 and 5.5, as well as clauses C.2 and C.3 of IEC 60076-2.

6.4.2.2 Multi-winding transformer

The most common case is a three-winding converter transformer with two secondary windings having the same rated power. The secondary three-phase connection is either star-star with an interphase transformer, or one star- and one delta-connected winding.

The equivalent test current for each winding, in turn, shall be supplied and the winding temperature rise figures shall be obtained.

The general form for the equivalent current is

$$I_{eq} = I_1 \left(\frac{I_{WN}^2 (R_W + R_C) + (F_{WE} \times P_{WE1})}{I_1^2 (R_W + R_C) + P_{WE1}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

The equivalent test current value for each winding shall be obtained using specific values for resistance, eddy loss and enhancement factor for the winding.

NOTES

- 1 For transformers with heavy current busbar systems on the secondary side, it may be difficult or impossible to achieve a rapid disconnection of the short circuits. In that case, an agreement between the manufacturer and purchaser should be made concerning the temperature rise of the windings involved.
- 2 I_{WN} replaces I_L when the enhancement factor, F_{WE} , for the tested winding is calculated in accordance with annex A.

L'essai doit être effectué de la manière suivante.

Les deux secondaires doivent être court-circuités et le courant primaire équivalent doit être fourni pour obtenir l'échauffement au-dessus de l'huile moyenne de l'enroulement primaire. Ensuite, chacun des enroulements secondaires doit être court-circuité à tour de rôle, et un courant primaire doit être injecté pour obtenir le courant équivalent pour l'enroulement secondaire en essai. Ces deux essais donnent les échauffements des enroulements au-dessus de l'huile moyenne pour les enroulements secondaires.

En variante, seul le premier essai avec les deux enroulements secondaires court-circuités doit être utilisé. Les valeurs des échauffements d'enroulements mesurés pour les enroulements secondaires obtenues par cet essai doivent alors être corrigées suivant 5.6 de la CEI 60076-2.

6.4.3 Essais d'échauffement d'un transformateur du type sec

L'essai doit être fait suivant l'une ou l'autre des méthodes données à l'article 21 de la CEI 60726, avec la modification indiquée ci-dessous.

Le courant de charge doit être ajusté pour correspondre aux pertes dues à la charge pour le courant assigné en conversion. L'ajustement doit être effectué suivant l'annexe A et les équations de 6.4.2 donnant le courant équivalent.

The test shall be carried out in the following manner.

Both secondaries shall be short-circuited, and the equivalent primary current shall be supplied to obtain the temperature rise over the mean oil of the primary winding. Then each secondary winding shall in turn be short-circuited and primary current supplied to give the equivalent current in the tested secondary winding. These two tests give the winding temperature rises above mean oil for the secondary windings.

Alternatively, only the first test, with both secondary windings short-circuited, shall be used. The measured winding temperature rise values of the secondary windings obtained from this test shall then be corrected in accordance with 5.6 of IEC 60076-2.

6.4.3 *Test of temperature rise on dry-type transformers*

The test shall be made in accordance with any of the methods given in clause 21 of IEC 60726, with the following modification.

The load current shall be adjusted to correspond to load loss at rated converter current. The adjustment shall be carried out in accordance with annex A and the equations in 6.4.2 for the equivalent current.

Tableau 1 – Montages et facteurs de calcul (colonnes 1 à 9)
Table 1 – Connections and calculation factors (columns 1 to 9)

Numéro de montage / Connection number	Couplage de transformateur / Transformer connections		Couplage des valves / Valve connections	p	q	(δqs)/g (note 1)	Facteur de courant côté réseau / Line side current factor (note 2)	Facteur de courant côté valves / Valve side current factor (note 3)
	Côté réseau / Line side	Côté valves / Valve side					I_L / I_d	I_v / I_d
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Convertisseur simple, montage à une voie / Single convertor, single-way connections								
1				2	2	2	0,5 (1/2)	0,707 (1/√2)
2	ou 			3	3	3	0,471 (√2/3)	0,577 (1/√3)
3				6	6	6	0,816 (√2/3)	0,408 (1/√6)
4	ou 			6	6	6	0,816 (√2/3)	0,408 (1/√6)
5	ou 			6	3	3/2	0,408 (1/√6)	0,289 (1/(2√3))
6				6	3	2/3	0,272 (1/(3√2/3))	0,236 (1/(3√2))
Convertisseur simple, montage homogène à deux voies / Single convertor, uniform double-way connections								
7				2	2	8	1	1
8	ou 	ou 		6	3	6	0,816 (√2/3)	0,816 (√2/3)
9	ou 	ou 		12	3	3	0,789 (1+√3)/(2√3)	0,408 (1/√6)

NOTES

1 Voir 1.7.2 et 1.8.1.4 de la CEI 60146-1-2 / See 1.7.2 and 1.8.1.4 of IEC 60146-1-2.

2 Se référer au primaire du transformateur, voir 1.5.2 de la CEI 60146-1-2 / Refer to transformer primary, see 1.5.2 of IEC 60146-1-2.

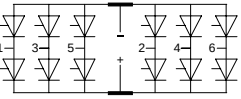
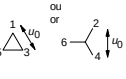
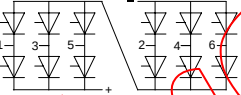
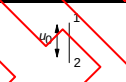
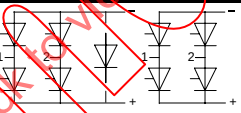
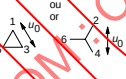
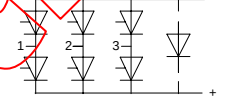
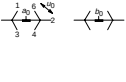
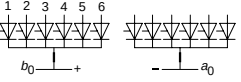
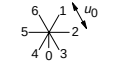
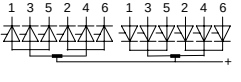
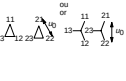
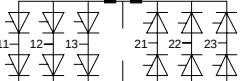
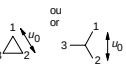
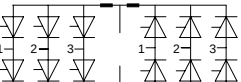
3 Se référer au secondaire du transformateur, voir 1.5.3 de la CEI 60146-1-2 / Refer to transformer secondary, see 1.5.3 of IEC 60146-1-2.

Tableau 1 – Montages et facteurs de calcul (colonnes 10 à 17)
Table 1 – Connections and calculation factors (columns 10 to 17)

$(U_{di})/(U_{v0})$	$(U_{im})/(U_{di})$	$(d_{xN})/(e_{xN})$	Bornes à court-circuiter pour l'essai de mesure des pertes du transformateur / Terminals to be short-circuited at transformer loss test			Pertes totales dans les enroulements en fonctionnement en convertisseur / Total losses in windings in convertor operation	Bornes à court-circuiter pour: / Terminals to be short-circuited for: e_{xN}
			A	B	C		
10	11	12	13	14	15	16	17
Convertisseur simple, montage à une voie / Single convertor, single-way connections							
0,45 $(\sqrt{2}/n)$	3,14 (n)	0,707 $(1/\sqrt{2})$	0-1	0-2		$0,5 (P_A + P_B)$	1-2
0,675 $(3/(n\sqrt{2}))$	2,09 (2n/3)	0,866 $(\sqrt{3}/2)$	1-2-3			$P_A + \frac{2}{3} r_2 / 3$ (note 5)	1-2-3
1,35 $((3\sqrt{2})/n)$	2,09 (2n/3)	1,5 à 0,5 1,5 to 0,5	1-3-5	2-4-6		$0,75 (P_A + P_B)$	Moyenne des résultats 1-3-5 et 2-4-6 Average of 1-3-5 and 2-4-6
1,35 $((3\sqrt{2})/n)$	2,09 (2n/3)	1,5 à 0,5 1,5 to 0,5	1-2 3-4 5-6	2-3 4-5 6-1	Moyenne des résultats 1-3-5 et 2-4-6 Average of 1-3-5 and 2-4-6	$(P_A + 2 P_B + 3 P_C)/6$	Moyenne des résultats 1-3-5 et 2-4-6 Average of 1-3-5 and 2-4-6
0,675 $(3/(n\sqrt{2}))$	2,42 $(4n/(3\sqrt{3}))$	0,5	1-3-5	2-4-6		$0,5 (P_A + P_B)$	Moyenne des résultats 1-3-5 et 2-4-6 Average of 1-3-5 and 2-4-6
0,45 $(\sqrt{2}/n)$	3,14 (n)	0,75 à 0,5 0,75 to 0,5	1-3-5 I-II-III	2-4-6 I-II-III		$1,125 (P_A + P_B)/2$	1-4 2-5 3-6
Convertisseur simple, montage homogène à deux voies / Single convertor, uniform double-way connections							
0,9 $(2\sqrt{2}/n)$	1,57 (n/2)	0,707 $(1/\sqrt{2})$ (note 4)	1-2			P_A	1-2
1,35 $(3\sqrt{2}/n)$	1,05 (n/3)	0,5	1-2-3			P_A	1-2-3
1,35 $(3\sqrt{2}/n)$	1,05 (n/3)	0,26	1-3-5	2-4-6	1-3-5 2-4-6	$0,035 (P_A + P_B) + 0,93 P_C$	Moyenne des résultats 1-3-5 et 2-4-6 Average of 1-3-5 and 2-4-6
NOTES							
4 $K < u$: 0,707 $(1/\sqrt{2})$; $I > u$: 0,354 $(1/2 \sqrt{2})$; $\cos u = 1 - X_t \times I_d / \sqrt{2} \times U_{v0}$.							
5 r_2 est la résistance de l'un des trois enroulements de cellule / r_2 is the resistance of one cell winding.							

(suite / continued)

Tableau 1 – Montages et facteurs de calcul (Colonnes 1 à 9) (fin)
Table 1 – Connections and calculation factors (Columns 1 to 9) (concluded)

Numéro de montage / Connection number	Couplage des transformateurs / Transformer connections		Couplage des valves / Valve connections	p	q	(δqs)/g (note 1)	Facteur de courant côté réseau / Line side current factor (note 2)	Facteur de courant côté valves / Valve side current factor (note 3)
	Côté réseau / Line side	Côté valves / Valve side					I_L / I_d	I_V / I_d
1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	Identique à 9, mais avec deux transformateurs séparés / Identical to 9, but with two different transformers		Identique à 9 / Identical to 9	12	3	3	0,789 $(1+\sqrt{3})/(2\sqrt{3})$	0,408 $(1/\sqrt{6})$
11	 ou or			12	3	3	0,789 $(1+\sqrt{3})/(2\sqrt{3})$	0,408 $(1/\sqrt{6})$
12	 ou or			12	3	12	1,577 $((1+\sqrt{3})/\sqrt{3})$	0,816 $(\sqrt{2/3})$
13	Identique à 12, mais avec deux transformateurs séparés / Identical to 12, but with two different transformers		Identique à 12 / Identical to 12	12	3	12	1,577 $((1+\sqrt{3})/\sqrt{3})$	0,816 $(\sqrt{2/3})$
Convertisseur simple, montages hétérogènes à double voie / Single convertor, non-uniform double-way connections								
14				2	2	–	$\sqrt{((n-a)/n)}$	$\sqrt{((n-a)/n)}$
15	 ou or			6	3	–	Voir 1.5.2 de la CEI 60146-2-1 / See 1.5.2 of IEC 60146-2-1	Voir 1.5.3 de la CEI 60146-2-1 / See 1.5.3 of IEC 60146-2-1
Montages à convertisseurs doubles / Double convertor connections								
16	 ou or			Voir montage numéro 5 / See connection number 5				
17	 ou or			Voir montage numéro 5 / See connection number 5				
18	 ou or			Voir montage numéro 8 / See connection number 8				
19	 ou or			Voir montage numéro 8 / See connection number 8				

NOTES

- 1 Voir 1.7.2 et 1.8.1.4 de la CEI 60146-1-2 / See 1.7.2 and 1.8.1.4 of IEC 60146-1-2.
- 2 Se référer au primaire du transformateur, voir 1.5.2 de la CEI 60146-1-2 / Refer to transformer primary, see 1.5.2 of IEC 60146-1-2.
- 3 Se référer au secondaire du transformateur, voir 1.5.3 de la CEI 60146-1-2 / Refer to transformer secondary, see 1.5.3 of IEC 60146-1-2.

Tableau 1 – Montages et facteurs de calcul (colonnes 10 à 17) (fin)
Table 1 – Connections and calculation factors (columns 10 to 17) (concluded)

[illegible]

Annexe A (informative)

Détermination des pertes dues à la charge en service au courant non sinusoïdal assigné en fonctionnement en conversion à partir des mesures au courant assigné du transformateur à la fréquence fondamentale

A partir des notations définies dans la liste des symboles de 5.1, les relations suivantes peuvent être écrites pour les pertes dans les enroulements:

$$P_{W1} = R_W \times I_1^2 (1 + K_{WE} \times 1^x)$$

$$P_{W2} = R_W \times I_2^2 (1 + K_{WE} \times 2^x)$$

$$\vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots$$

$$P_{Wh} = R_W \times I_h^2 (1 + K_{WE} \times h^x)$$

$$P_W = R_W \times I_L^2 + R_W \times K_{WE} \times \sum_{h=1}^n I_h^2 \times h^x$$

En conséquence

$$\frac{P_W - R_W \times I_L^2}{P_{W1} - R_W \times I_1^2} = \sum_{h=1}^n \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \times h^x$$

Avec $x = 2$ pour les enroulements, le facteur d'accroissement est égal à

$$F_{WE} = \sum_{h=1}^n \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \times h^2$$

Dans les systèmes de connexions en barres pour fort courant, les pertes suivront la même règle fondamentale que pour les enroulements, mais l'exposant x sera inférieur. Avec $x = 0,8$, le facteur d'accroissement pour les connexions est égal à

$$\frac{P_C - R_C \times I_L^2}{P_{C1} - R_C \times I_1^2} = \sum_{h=1}^n \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \times h^{0,8} = F_{CE}$$

A partir d'autres études, le facteur d'accroissement des pertes parasites supplémentaires dans les parties mécaniques structurales est pris égal à celui des connexions massives.

$$F_{SE} = \frac{P_{SE}}{P_{SE1}} = F_{CE}$$

Annex A (informative)

Determination of transformer service load loss at rated non-sinusoidal converter current from measurements with rated transformer current of fundamental frequency

Using the notations given in the list of symbols in 5.1, the following relations can be written for the winding loss.

$$\begin{aligned}
 P_{W1} &= R_W \times I_1^2 (1 + K_{WE} \times 1^x) \\
 P_{W2} &= R_W \times I_2^2 (1 + K_{WE} \times 2^x) \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 P_{Wh} &= R_W \times I_h^2 (1 + K_{WE} \times h^x) \\
 \hline
 P_W &= R_W \times I_L^2 + R_W \times K_{WE} \times \sum_{h=1}^n I_h^2 \times h^x
 \end{aligned}$$

Consequently

$$\frac{P_W - R_W \times I_L^2}{P_{W1} - R_W \times I_1^2} = \sum_{h=1}^n \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \times h^x$$

With $x = 2$ for windings, the enhancement factor is equal to

$$F_{WE} = \sum_{h=1}^n \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \times h^2$$

In high-current busbar connection systems, the loss will follow the same basic rule as for windings, but the exponent, x , is lower. With $x = 0,8$, the enhancement factor for connections is equal to

$$\frac{P_C - R_C \times I_L^2}{P_{C1} - R_C \times I_1^2} = \sum_{h=1}^n \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \times h^{0,8} = F_{CE}$$

Based on other studies, the enhancement factor for the stray loss in structural parts is taken as equal to that of busbar systems.

$$F_{SE} = \frac{P_{SE}}{P_{SE1}} = F_{CE}$$

Conventions supplémentaires pour le calcul des pertes:

a) les pertes d'enroulement P_{W1} représentent la somme des pertes mesurées $I_1^2 \times R_W$ et des pertes parasites par courants de Foucault P_{WE1} .

$$P_{W1} = (I_1^2 \times R_W) + P_{WE1}$$

b) la somme des autres pertes dans les connexions (pertes parasites par courants de Foucault) P_{CE1} et dans les parties mécaniques structurales (pertes parasites supplémentaire) P_{SE1} est égale aux pertes mesurées totales P_1 moins les pertes d'enroulements P_{W1} suivant a) et moins les pertes mesurées $I_1^2 \times R_C$ par effet Joule dans les connexions.

$$P_{CE1} + P_{SE1} = P_1 - (P_{W1} + (I_1^2 \times R_C))$$

Les pertes totales tenant compte de la distorsion du courant sont donc:

$$P_N = I_{LN}^2 \times (R_W + R_C) + (F_{WE} \times P_{WE1}) + F_{CE} \times (P_{CE1} + P_{SE1})$$

Toutes les composantes de pertes dans les calculs ci-dessus sont à rapporter à la température de référence (voir 10.1 de la CEI 60076-1 et article 12 de la CEI 60726).

Les composantes respectives dans les équations ci-dessus doivent être la somme des valeurs calculées dans chaque enroulement pris séparément.

Les pertes parasites par courants de Foucault, P_{WE1} , dans les enroulements avec les pertes par effet Joule mesurées, $I_1^2 \times R_W$ donnent une valeur précise des pertes totales dans les enroulements P_{W1} .

La somme des pertes parasites supplémentaires dans les connexions et dans les parties mécaniques structurales $P_{CE1} + P_{SE1}$ peut être déduite avec une précision raisonnable comme étant la différence entre les pertes totales mesurées P_1 moins les pertes d'enroulements P_{W1} et moins la quantité mesurée, $I_1^2 \times R_C$, des pertes par courant continu des connexions.

Méthode en variante pour le calcul du facteur d'accroissement des pertes parasites par courants de Foucault

Une estimation plus précise du facteur d'accroissement pour les enroulements, F_{WE} , peut être établie si les composantes des pertes parasites axiales et radiales P_{WEax1} et P_{WErad1} , sont connues. Ces coefficients peuvent être calculés à la fréquence fondamentale par une méthode d'éléments finis d'analyse de champ.

Etant donné que la distribution harmonique des flux de fuite est la même que celle existant à la pulsation fondamentale dans les enroulements conventionnels formés de brins individuels, les relations suivantes peuvent être déduites.

Further conventions of loss calculations:

a) the winding loss P_{W1} is taken as the sum of the measured $I_1^2 \times R_W$ loss and the calculated eddy loss P_{WE1} .

$$P_{W1} = (I_1^2 \times R_W) + P_{WE1}$$

b) the sum of the eddy losses P_{CE1} from connections and the stray loss P_{SE1} in structural parts is equal to the measured total loss P_1 minus the winding loss P_{W1} according to a) and minus the measured $I_1^2 \times R_C$ loss of the connections.

$$P_{CE1} + P_{SE1} = P_1 - (P_{W1} + (I_1^2 \times R_C))$$

Total loss with distorted current:

$$P_N = I_{LN}^2 \times (R_W + R_C) + (F_{WE} \times P_{WE1}) + F_{CE} \times (P_{CE1} + P_{SE1})$$

All loss components in the above calculations are adjusted to the reference temperature (see 10.1 of IEC 60076-1 and clause 12 of IEC 60726).

The respective components in the equations above shall be the sum of the values calculated for each winding separately.

The calculated eddy losses P_{WE1} in the windings together with the measured $I_1^2 \times R_W$ loss give an accurate value for the total winding loss P_{W1} .

The sum of stray loss from connections and structural parts $P_{CE1} + P_{SE1}$ can be derived with reasonable accuracy as the difference between the total measured loss P_1 minus the winding loss P_{W1} and minus the measured quantity $I_1^2 \times R_C$ of the d.c. loss of the connections.

Alternative method for calculation of the winding eddy loss enhancement factor

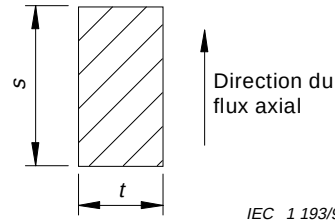
A more accurate estimate of the eddy loss enhancement factor for windings, F_{WE} , can be made if the winding eddy loss components from axial and radial stray flux, P_{WEax1} and P_{WErad1} respectively, are known. These may be calculated at fundamental frequency using a finite element method of field analysis.

Since the distribution of the harmonic stray flux is the same as that of the flux at fundamental frequency in conventional windings consisting of individual strands, the following relationships may be derived.

Dimensions du brin élémentaire en fonction de la profondeur de pénétration:

$$X_{ah} = t \times \left(\frac{\mu_0 \times \omega_1 \times h}{2 \times \rho} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$X_{rh} = s \times \left(\frac{\mu_0 \times \omega_1 \times h}{2 \times \rho} \right)^{\frac{1}{2}}$$



où

ω_1 est la pulsation fondamentale;

h est le rang de l'harmonique.

Figure A.1 – Section d'un conducteur d'enroulement

La résistance additionnelle, R_{ADh} , à la pulsation d'ordre, $h \times \omega_1$, peut être définie par:

$$R_{ADh} = R_h - R_W \quad (\text{A.1})$$

où R_h est la résistance d'enroulement à la pulsation, $h \times \omega_1$.

L'augmentation de la résistance additionnelle R_{ADh} en rapport à R_{AD1} à la pulsation fondamentale, est la même pour tous les brins élémentaires de l'enroulement, quelles que soient les pertes spécifiques par courants de Foucault de chaque brin, et peut être exprimée de la manière suivante:

$$\frac{R_{ADh}}{R_{AD1}} = \frac{\Psi(X_h)}{\Psi(X_1)} \quad (\text{A.2})$$

$$\text{où } \Psi(X_h) = 2X_h \times \frac{\sin h X_h - h \sin X_h}{\cos h X_h + h \cos X_h}$$

De sorte que le facteur d'accroissement des pertes d'enroulement F_{WE} peut être exprimé par:

$$F_{WE} = \frac{P_{WEax1}}{P_{WE1}} \times \sum_1^n \left(\frac{l_h}{l_1} \right)^2 \times \frac{\Psi(X_{ah})}{\Psi(X_1)} + \frac{P_{WErad1}}{P_{WE1}} \times \sum_1^n \left(\frac{l_h}{l_1} \right)^2 \times \frac{\Psi(X_{rh})}{\Psi(X_1)} \quad (\text{A.3})$$

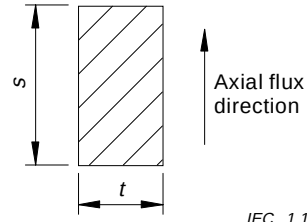
Pour les enroulements en feuilles, le facteur d'accroissement des pertes d'enroulement peut être pris égal à:

$$F_{WE} = \frac{P_{WEax1}}{P_{WE1}} \times \sum_1^n \left(\frac{l_h}{l_1} \right)^2 \times h^2 + \frac{P_{WErad1}}{P_{WE1}} \times \sum_1^n \left(\frac{l_h}{l_1} \right)^2 \times h^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A.4})$$

Strand dimensions in relation to penetration depth:

$$X_{ah} = t \times \left(\frac{\mu_0 \times \omega_1 \times h}{2 \times \rho} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$X_{rh} = s \times \left(\frac{\mu_0 \times \omega_1 \times h}{2 \times \rho} \right)^{\frac{1}{2}}$$



IEC 1 193/97

where

ω_1 is the pulse of fundamental frequency;

h is the harmonic order.

Figure A.1 – Cross-section of a winding strand

The additional resistance, R_{ADh} , at frequency of order, $h \times \omega_1$, may be defined as

$$R_{ADh} = R_h - R_W \quad (\text{A.1})$$

where R_h is the winding resistance at frequency, $h \times \omega_1$.

The increase of additional resistance R_{ADh} in relation to R_{AD1} fundamental frequency, is the same for all winding strands, regardless of the specific eddy loss of each strand and may be expressed as follows:

$$\frac{R_{ADh}}{R_{AD1}} = \frac{\Psi(X_h)}{\Psi(X_1)} \quad (\text{A.2})$$

$$\text{where } \Psi(X_h) = 2X_h \times \frac{\sin h X_h - h \sin X_h}{\cos h X_h + h \cos X_h}$$

Hence the expression for the winding enhancement factor F_{WE} may be expressed as:

$$F_{WE} = \frac{P_{WEax1}}{P_{WE1}} \times \sum_1^n \left(\frac{l_h}{l_1} \right)^2 \times \frac{\Psi(X_{ah})}{\Psi(X_1)} + \frac{P_{WErad1}}{P_{WE1}} \times \sum_1^n \left(\frac{l_h}{l_1} \right)^2 \times \frac{\Psi(X_{rh})}{\Psi(X_1)} \quad (\text{A.3})$$

For foil windings the winding enhancement factor may be taken as:

$$F_{WE} = \frac{P_{WEax1}}{P_{WE1}} \times \sum_1^n \left(\frac{l_h}{l_1} \right)^2 \times h^2 + \frac{P_{WErad1}}{P_{WE1}} \times \sum_1^n \left(\frac{l_h}{l_1} \right)^2 \times h^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A.4})$$

Exemple A.1: Détermination des pertes dues à la charge en fonction de la distorsion du courant de charge

(Schéma suivant tableau 1, couplage 5, couplage électromagnétique entre enroulements de valve pratiquement égal à 100 %, $p = 6$)

Régime assigné du transformateur	Primaire	Secondaire
Puissance assignée (kVA)	18 180	$2 \times 12\,850$
Tension assignée (kV)	30	$\sqrt{3} \times 0,303$
Courant assigné de phase du transformateur (A)	$I_{1P} = 350$	$I_{1S} = 14\,128$
Couplage	Y	yy0

Avec bobine d'absorption dans la même cuve

Caractéristiques assignées de conversion: $U_{d0} = 354\text{ V}$
 $I_{dN} = 50\,000\text{ A}$

Contenu harmonique de la charge assignée: $I_{1P} = 350\text{ A}$

Rang de l'harmonique h	I_h / I_1
1	1
5	$176,0 \times 10^{-3}$
7	$110,0 \times 10^{-3}$
11	$44,7 \times 10^{-3}$
13	$26,4 \times 10^{-3}$
17	$11,8 \times 10^{-3}$
19	$10,6 \times 10^{-3}$
23	$8,7 \times 10^{-3}$
25	$8,6 \times 10^{-3}$

$$\sum_{h=1}^{25} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 = 1,046 = \left(\frac{I_{PN}}{I_{1P}} \right)^2 = \left(\frac{I_{SN}}{I_{1S}} \right)^2$$

$$\frac{I_{PN}}{I_{1P}} = 1,023 = \frac{I_{SN}}{I_{1S}} : \text{primaire et secondaire hexaphasés}$$

$$I_{PN} = 358\text{ A}$$

$$I_{SN} = 14\,450\text{ A}$$

Example A.1: Determination of transformer load loss under distorted current load

(Scheme as in table 1, connection 5, magnetic coupling between valve windings practically 100 %, $p = 6$)

Transformer rating	Primary	Secondary
Rated power (kVA)	18 180	$2 \times 12\,850$
Rated system voltage (kV)	30	$\sqrt{3} \times 0,303$
Rated transformer phase current (A)	$I_{1P} = 350$	$I_{1S} = 14\,128$
Connection	Y	yy0

With interphase transformer in common tank

Convertor rating

$$U_{d0} = 354 \text{ V}$$

$$I_{dN} = 50\,000 \text{ A}$$

Harmonic content at rated load:

$$I_{1P} = 350 \text{ A}$$

Harmonic order h I_h / I_1

1	1
5	$176,0 \times 10^{-3}$
7	$110,0 \times 10^{-3}$
11	$44,7 \times 10^{-3}$
13	$26,4 \times 10^{-3}$
17	$11,8 \times 10^{-3}$
19	$10,6 \times 10^{-3}$
23	$8,7 \times 10^{-3}$
25	$8,6 \times 10^{-3}$

$$\sum_{h=1}^{25} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 = 1,046 = \left(\frac{I_{PN}}{I_{1P}} \right)^2 = \left(\frac{I_{SN}}{I_{1S}} \right)^2$$

$$\frac{I_{PN}}{I_{1P}} = 1,023 = \frac{I_{SN}}{I_{1S}} : \text{six-pulse primary and secondary}$$

$$I_{PN} = 358 \text{ A}$$

$$I_{SN} = 14\,450 \text{ A}$$

$$F_{WE} = \sum_1^{25} \left(\frac{l_h}{l_1} \right)^2 \times h^2 = 2,89$$

$$F_{CE} = F_{SE} = \sum_1^{25} \left(\frac{l_h}{l_1} \right)^2 \times h^{0,8} = 1,19$$

Mesures issues du rapport d'essais

Mesures des résistances à la température d'enroulement de 20 °C

Bornes connectées (voir figure A.2)	Résistance par phase mesurée	Valeurs corrigées à 75 °C Ω
A – B – C	$\frac{1}{2} \times \frac{0,1468 + 0,1463 + 0,1457}{3} = 73,13 \times 10^{-3}$	$88,9 \times 10^{-3}$
a – c – e	$\frac{1}{2} \times \frac{869 + 905 + 867}{3} \times 10^{-7} = 44,0 \times 10^{-6}$	$53,5 \times 10^{-6}$
b – d – f	$\frac{1}{2} \times \frac{875 + 907 + 876}{3} \times 10^{-7} = 44,3 \times 10^{-6}$	$53,8 \times 10^{-6}$
o – n	$14,7 \times 10^{-6}$	$17,9 \times 10^{-6}$
o – p	$13,6 \times 10^{-6}$	$16,5 \times 10^{-6}$

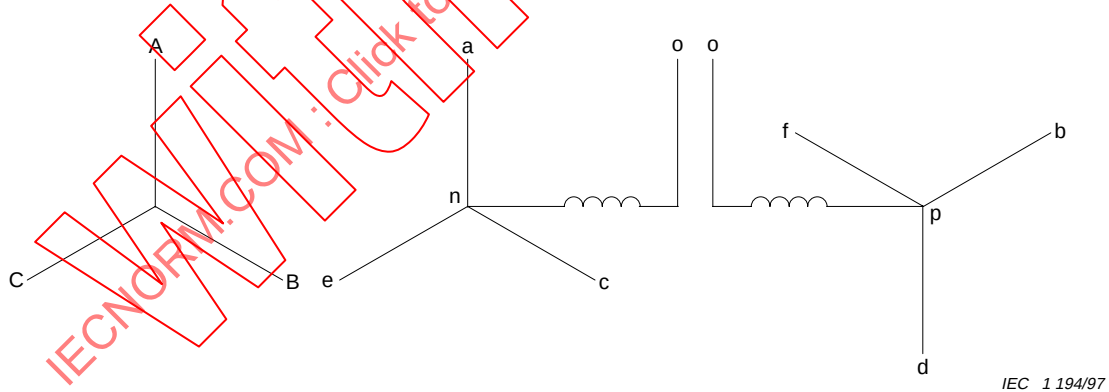


Figure A.2 – Identification des bornes pour couplage d'enroulements Y yy0

Pertes dues à la charge mesurées à 75 °C de température d'enroulement, 50 Hz, et au courant assigné $I_{1P} = 350$ A et $I_{1S} = 14\,128$ A

$$P_1 = 124,3 \text{ kW}$$