

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

61378-2

Première édition
First edition
2001-02

Transformateurs de conversion –

**Partie 2:
Transformateurs pour applications CCHT**

Convertor transformers –

**Part 2:
Transformers for HVDC applications**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 61378-2:2001

Numérotation des publications

Depuis le 1er janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000. Ainsi, la CEI 34-1 devient la CEI 60034-1.

Editions 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.

Informations supplémentaires sur les publications de la CEI

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 cette publication, y compris sa validité, sont disponibles dans le Catalogue des publications de la CEI (voir ci-dessous) en plus des nouvelles éditions, amendements et corrigenda. Des informations sur les sujets à l'étude et l'avancement des travaux entrepris par le comité d'études qui a élaboré cette publication, ainsi que la liste des publications parues, sont également disponibles par l'intermédiaire de:

- Site web de la CEI (www.iec.ch)
- Catalogue des publications de la CEI

Le catalogue en ligne sur le site web de la CEI (www.iec.ch/catlg-f.htm) vous permet de faire des recherches en utilisant de nombreux critères, comprenant des recherches textuelles, par comité d'études ou date de publication. Des informations en ligne sont également disponibles sur les nouvelles publications, les publications remplacées ou retirées, ainsi que sur les corrigenda.

- IEC Just Published

Ce résumé des dernières publications parues (www.iec.ch/JP.htm) est aussi disponible par courrier électronique. Veuillez prendre contact avec le Service client (voir ci-dessous) pour plus d'informations.

- Service clients

Si vous avez des questions au sujet de cette publication ou avez besoin de renseignements supplémentaires, prenez contact avec le Service clients:

Email: custserv@iec.ch
Tél: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00

Publication numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series. For example, IEC 34-1 is now referred to as IEC 60034-1.

Consolidated editions

The IEC is now publishing consolidated versions of its publications. 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.

Further information on IEC publications

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 this publication, including its validity, is available in the IEC Catalogue of publications (see below) in addition to new editions, amendments and corrigenda. Information on the subjects under consideration and work in progress undertaken by the technical committee which has prepared this publication, as well as the list of publications issued, is also available from the following:

- IEC Web Site (www.iec.ch)
- Catalogue of IEC publications

The on-line catalogue on the IEC web site (www.iec.ch/catlg-e.htm) enables you to search by a variety of criteria including text searches, technical committees and date of publication. On-line information is also available on recently issued publications, withdrawn and replaced publications, as well as corrigenda.

- IEC Just Published

This summary of recently issued publications (www.iec.ch/JP.htm) is also available by email. Please contact the Customer Service Centre (see below) for further information.

- Customer Service Centre

If you have any questions regarding this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre:

Email: custserv@iec.ch
Tel: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

61378-2

Première édition
First edition
2001-02

Transformateurs de conversion –

Partie 2:

Transformateurs pour applications CCHT

Convertor transformers –

Part 2:

Transformers for HVDC applications

© IEC 2001 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 Varembe 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

S

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

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	6
Articles	
1 Généralités	10
1.1 Domaine d'application	10
1.2 Conditions en service	10
2 Références normatives	10
3 Définitions	12
4 Liste des variables	14
5 Régimes assignés	16
5.1 Généralités	16
5.2 Tension assignée	16
5.3 Courant assigné	16
5.4 Fréquence assignée	16
5.5 Puissance assignée	16
6 Tolérances	16
6.1 Généralités	16
6.2 Tolérances d'impédance de court-circuit	16
6.3 Garanties	18
7 Pertes	18
7.1 Généralités	18
7.2 Perte à vide	18
7.3 Pertes dues à la charge dans des conditions de fréquence industrielle assignée	18
7.4 Pertes dues à la charge dans des conditions en service	20
7.5 Détermination de la température en un point chaud	22
8 Niveaux d'isolement	22
8.1 Enroulements de ligne	22
8.2 Enroulements de valves	22
8.3 Niveau de tension induite avec mesures de décharges partielles	24
9 Niveau acoustique	24
9.1 Généralités	24
9.2 Niveaux de puissance acoustique garantis	24
9.3 Puissance acoustique sur le lieu d'implantation	26
10 Essais	26
10.1 Généralités	26
10.2 Essais	26
10.3 Mesures des pertes dues à la charge	28
10.4 Essais diélectriques en usine	30
10.5 Essai d'échauffement	36
10.6 Essai de courant de charge	40
10.7 Détermination du niveau de puissance acoustique du transformateur	40
11 Modélisation à haute fréquence	40

CONTENTS

	Page
FOREWORD	7
Clause	
1 General.....	11
1.1 Scope	11
1.2 Service conditions.....	11
2 Normative references.....	11
3 Definitions.....	13
4 List of variables	15
5 Ratings	17
5.1 General.....	17
5.2 Rated voltage	17
5.3 Rated current.....	17
5.4 Rated frequency	17
5.5 Rated power	17
6 Tolerances.....	17
6.1 General.....	17
6.2 Short-circuit impedance tolerances	17
6.3 Guarantees.....	19
7 Losses.....	19
7.1 General.....	19
7.2 No-load loss	19
7.3 Load loss under rated power-frequency conditions.....	19
7.4 Load loss under service conditions	21
7.5 Determination of hot-spot temperature	23
8 Insulation levels.....	23
8.1 Line windings.....	23
8.2 Valve windings.....	23
8.3 Induced voltage level with partial discharge measurements	25
9 Sound level.....	25
9.1 General.....	25
9.2 Guaranteed sound-power levels.....	25
9.3 Sound-power level at site.....	27
10 Testing.....	27
10.1 General.....	27
10.2 Tests	27
10.3 Load-loss measurements	29
10.4 Factory dielectric tests.....	31
10.5 Temperature-rise test	37
10.6 Load-current test	41
10.7 Determination of transformer sound-power level	41
11 High-frequency modelling.....	41

Articles	Pages
12 Charge du transformateur supérieure aux caractéristiques assignées	40
13 Traversées.....	40
13.1 Traversées à courant alternatif.....	40
13.2 Traversées d'enroulement de valve	40
14 Changeur de prise.....	42
14.1 Généralités	42
14.2 Forme d'onde de courant.....	42
Bibliographie	44
Figure 1 – Profil de tolérances d'impédance de court-circuit pour gammes de prises ≤ 30 %.....	18
Figure 2 – Profil de tension d'essai à inversion double	34
Tableau 1 – Conditions d'essai pour transformateurs à trois enroulements	38

Clause	Page
12 Loading of transformer above rating.....	41
13 Bushings.....	41
13.1 AC bushings	41
13.2 Valve winding bushings.....	41
14 Tap-changer	43
14.1 General.....	43
14.2 Current wave shape.....	43
Bibliography	45
Figure 1 – Profile of short-circuit impedance tolerances for tapping ranges $\leq 30\%$	19
Figure 2 – Double reversal test voltage profile.....	35
Table 1 – Test conditions for three-winding transformers.....	39

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

TRANSFORMATEURS DE CONVERSION –

Partie 2: Transformateurs pour applications CCHT

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, spécifications techniques, 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 61378-2 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
14/384/FDIS	14/386/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.

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/CEI, Partie 3.

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 CCHT;
- Partie 3: Guide d'application (à l'étude).

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

CONVERTOR TRANSFORMERS –**Part 2: Transformers for HVDC 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 specifications, 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 61378-2 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
14/384/FDIS	14/386/RVD

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

This publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 3.

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;
- Part 3: Application guide (under consideration).

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant 2004. A cette date, la publication sera

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

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 61378-2:2001

Withdrawn

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until 2004. At this date, the publication will be

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

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 61378-2:2001

Withdrawn

TRANSFORMATEURS DE CONVERSION –

Partie 2: Transformateurs pour applications CCHT

1 Généralités

1.1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 61378 s'applique aux transformateurs de conversion immergés dans l'huile triphasés et monophasés utilisés pour la transmission de puissance CCHT. Elle s'applique aux transformateurs possédant deux, trois ou de multiples enroulements.

La présente norme ne s'applique pas aux

- transformateurs de conversion pour applications industrielles (voir CEI 61378-1),
- transformateurs de conversion pour applications de traction (voir CEI 60310).

1.2 Conditions en service

1.2.1 Généralités

Les transformateurs de conversion régis par cette norme doivent se conformer aux conditions en service indiquées dans la CEI 60076-1, sauf lorsqu'elle n'est manifestement pas applicable aux transformateurs de conversion ou lorsque d'autres prescriptions sont spécifiées ici. Sauf spécification contraire, on suppose que le transformateur fonctionne dans un système triphasé approximativement symétrique.

1.2.2 Température

Si une quelconque partie du transformateur (par exemple les traversées de valve) dépasse dans le hall de valve, la température maximale dans le hall de valve doit être spécifiée en plus de la température normale ambiante.

1.2.3 Courant de charge

Les courants parcourant les transformateurs contiennent des harmoniques. Les courants continus résiduels parcourent aussi les enroulements de valves. Le fournisseur doit obtenir l'information sur le résidu harmonique et l'amplitude des courants continus résiduels dans le cadre de demandes de renseignements et il doit en obtenir la confirmation au cours de la phase du contrat.

1.2.4 Sens de l'écoulement de puissance

Sauf spécification contraire, le transformateur doit être conçu à la fois pour le fonctionnement du redresseur et celui de l'onduleur.

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. Pour les références datées, les amendements ultérieurs ou les révisions de ces publications ne s'appliquent pas. Toutefois, 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-après. Pour les références non datées, la dernière édition du document normatif en référence s'applique. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des Normes internationales en vigueur.

CONVERTOR TRANSFORMERS –

Part 2: Transformers for HVDC applications

1 General

1.1 Scope

This part of IEC 61378 applies to oil-immersed three-phase and single-phase convertor transformers for use in HVDC power transmission. It applies to transformers having two, three or multiple windings.

This standard does not apply to

- convertor transformers for industrial applications (see IEC 61378-1);
- convertor transformers for traction applications (see IEC 60310).

1.2 Service conditions

1.2.1 General

Convertor transformers in this standard shall comply with the service conditions stated in IEC 60076-1, except where it is clearly not applicable to convertor transformers or when other requirements are specified herein. It is assumed that the transformer operates in an approximately symmetrical three-phase system, unless otherwise stated.

1.2.2 Temperature

If any part of the transformer (for example, the valve bushings) protrudes into the valve hall, the maximum temperature in the valve hall shall be specified in addition to the normal ambient temperature.

1.2.3 Load current

The currents flowing through the transformers contain harmonics. Residual d.c. currents also flow through the valve windings. The supplier shall be provided with the harmonic content and the magnitude of the residual d.c. currents in the enquiry and have it confirmed during the contract stage.

1.2.4 Direction of power flow

Unless otherwise specified, the transformer shall be designed for both rectifier and inverter operation.

2 Normative references

The following normative documents contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this part of IEC 61378. For dated references, subsequent amendments to, or revisions of, any of these publications do not apply. However, 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. For undated references, the latest edition of the normative document referred to applies. Members of IEC and ISO maintain registers of currently valid International Standards.

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

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

CEI 60076-3:2000, *Transformateurs de puissance – Partie 3: Niveaux d'isolement, essais diélectriques et distances d'isolement dans l'air*

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

CEI 60076-8:1997, *Transformateurs de puissance – Partie 8: Guide d'application*

CEI 60076-10, —, *Transformateurs de puissance - Détermination des niveaux de bruit*¹⁾

CEI 60137:1995, *Traversées isolées pour tensions alternatives supérieures à 1 000 V*

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

CEI 60214:1989, *Changeurs de prises en charge*

CEI 60270: —, *Mesure des décharges partielles*¹⁾

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

CEI 60567:1992, *Guide d'échantillonnage de gaz et d'huile dans les matériels électriques immergés, pour l'analyse des gaz libres et dissous*

CEI 61378-1:1997, *Transformateurs de conversion – Partie 1: Transformateurs pour applications industrielles*

3 Définitions

Pour les besoins de la présente partie de la CEI 61378, les définitions de la CEI 60050 (VEI) s'appliquent. Des définitions complémentaires de termes plus spécifiques relatifs aux transformateurs et convertisseurs sont respectivement fournies dans la CEI 60076-1 et la CEI 60146-1-1. Lorsque certains de ces termes sont utilisés en variante avec des définitions générales plus anciennes des mêmes termes, trouvés dans le VEI, les termes spécifiés dans la CEI 60076-1 et la CEI 60146-1-1 ont la priorité.

1) A publier.

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

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

IEC 60076-3:2000, *Power transformers – Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air*

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

IEC 60076-8:1997, *Power transformers – Part 8: Application guide*

IEC 60076-10:—, *Power transformers and reactors – Part 10: Determination of sound levels* ¹⁾

IEC 60137:1995, *Insulated bushings for alternating voltages above 1 000 V*

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

IEC/TR 60146-1-2:1991, *Semiconductor convertors – General requirements and line commutated convertors – Part 1-2: Application guide*

IEC 60214:1989, *On-load tap-changers*

IEC 60270:—, *Partial discharge measurements* ¹⁾

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

IEC 60567:1992, *Guide for the sampling of gases and of oil from oil-filled electrical equipment and for the analysis of free and dissolved gases*

IEC 61378-1:1997, *Convertor transformers – Part 1: Transformers for industrial application*

3 Definitions

For the purpose of this part of IEC 61378, the definitions of IEC 60050 (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 definitions of the same terms, found in the IEV, the terms specified in IEC 60076-1 and IEC 60146-1-1 will take precedence.

¹⁾ To be published.

4 Liste des variables

I_1	courant assigné
I_x	courant d'essai de pertes dues à la charge à la fréquence f_x
I_{LN}	valeur efficace du courant de charge en service dans l'enroulement à l'étude
I_h	courant en harmonique d'indice de rang h
I_{eq}	courant efficace sinusoïdal équivalent donnant des pertes dues à la charge en service des enroulements
h	rang de l'harmonique
U_1	tension assignée
S_R	puissance assignée
P_1	pertes totales dues à la charge à la fréquence fondamentale (50 Hz ou 60 Hz)
P_x	perte due à la charge mesurée à la fréquence f_x
$I_1^2 R$	pertes ohmiques à courant assigné
R	résistance d'enroulements en courant continu, y compris les conducteurs internes
P_{WE1}	pertes par courants de Foucault dans les enroulements à la fréquence fondamentale
P_{SE1}	pertes parasites dans les parties mécaniques (à l'exclusion des enroulements) à la fréquence fondamentale
P_N	valeur totale des pertes dues à la charge en service
f_1	fréquence assignée et également la fréquence fondamentale
f_x	fréquence ≥ 150 Hz utilisée pour déterminer la répartition des pertes par courants de Foucault
f_h	fréquence au rang de l'harmonique h
F_{WE}	facteur d'accroissement pour les pertes par courants de Foucault pour les enroulements
F_{SE}	facteur d'accroissement pour pertes parasites dans les parties mécaniques
K_h	rapport du courant I_h au courant assigné I_1
U_{ac}	tension d'essai de source séparée à courant alternatif pour les enroulements de valve (valeur efficace)
U_m	tension du réseau la plus élevée de l'enroulement de ligne
U_{dm}	tension continue la plus élevée par pont à valve
U_{dc}	tension d'essai de source séparée à courant continu, pour les enroulements de valve
U_{pr}	tension d'essai de l'inversion de polarité pour les enroulements de valve (tension à courant continu)
U_{vm}	tension de fonctionnement maximale entre phases à courant alternatif des enroulements de valve du transformateur de conversion
N	nombre de ponts hexaphasés en série à partir du neutre de la ligne à courant continu au pont à redresseur connecté au transformateur

Le «côté valve» et le «côté ligne» définissent les connexions externes des enroulements de transformateur. Le côté ligne se réfère à l'enroulement connecté au réseau à courant alternatif et le côté valve à l'enroulement connecté au convertisseur.

4 List of variables

I_1	rated current
I_x	load-loss test current at frequency f_x
I_{LN}	r.m.s. value of the in-service load current in the winding under consideration
I_h	current at harmonic order number h
I_{eq}	equivalent sinusoidal r.m.s. current giving the winding in-service load loss
h	harmonic order number
U_1	rated voltage
S_R	rated power
P_1	total load losses at fundamental frequency (50 Hz or 60 Hz)
P_x	load loss measured at frequency f_x
$I_1^2 R$	ohmic losses at rated current
R	d.c. resistance of windings including internal leads
P_{WE1}	eddy losses in windings at fundamental frequency
P_{SE1}	stray losses in structural parts (excluding windings) at fundamental frequency
P_N	total service load loss
f_1	rated frequency and also the fundamental frequency
f_x	frequency ≥ 150 Hz used to determine the distribution of eddy losses
f_h	frequency at harmonic order number h
F_{WE}	enhancement factor for winding eddy losses
F_{SE}	enhancement factor for stray losses in structural parts
K_h	ratio of the current I_h to the rated current I_1
U_{ac}	a.c. separate source test voltage for the valve windings (r.m.s. value)
U_m	highest system voltage of the line winding
U_{dm}	highest d.c. voltage per valve bridge
U_{dc}	d.c. separate source test voltage for the valve windings
U_{pr}	polarity-reversal test voltage for the valve windings (d.c. voltage)
U_{vm}	maximum phase to phase a.c. operating voltage of the valve windings of the converter transformer
N	number of six-pulse bridges in series from the neutral of the d.c. line to the rectifier bridge connected to the transformer

"Valve side" and "line side" define the external connections of the transformer windings. Line side refers to the winding connected to the a.c. network and valve side to the winding connected to the converter.

5 Régimes assignés

5.1 Généralités

Les caractéristiques assignées du transformateur sont exprimées en grandeurs sinusoïdales en régime établi de courant et de tensions à la fréquence fondamentale assignée. Les pertes, impédance et bruits garantis doivent correspondre à ces valeurs.

NOTE Les pratiques nord-américaines établissent des régimes assignés de plaque en kVA fondés à la fois sur la fréquence efficace et la fréquence fondamentale.

5.2 Tension assignée

La tension assignée est la valeur efficace du composant fondamental de la tension entre phases.

5.3 Courant assigné

Le courant assigné est la valeur efficace du composant fondamental du courant de ligne.

5.4 Fréquence assignée

La fréquence assignée est la fréquence fondamentale de 50 Hz ou de 60 Hz pour laquelle le transformateur est conçu.

5.5 Puissance assignée

La puissance assignée est le produit de la tension assignée et du courant assigné; la puissance triphasée assignée est donc la suivante:

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

6 Tolérances

6.1 Généralités

Les tolérances doivent être conformes au tableau 1 de la CEI 60076-1 avec les exceptions données en 6.2.

6.2 Tolérances d'impédance de court-circuit

L'impédance à la prise principale ne doit pas dévier de plus de ± 5 % de la valeur garantie.

S'agissant des transformateurs ayant une gamme de prises ne dépassant pas 30 %, l'impédance sur la partie de fonctionnement habituelle de la gamme ne doit pas dépasser ± 5 % de la valeur à la prise principale et pas plus ± 10 % de la valeur à la prise principale sur toutes les autres parties de la gamme. La partie habituelle de la gamme de prises doit faire l'objet d'un accord entre le fournisseur et l'acheteur.

Les tolérances sur l'impédance sur la gamme de prises pour les transformateurs ayant une gamme de prises supérieure à 30 % doivent faire l'objet d'un accord entre le fournisseur et l'acheteur avant le contrat.

5 Ratings

5.1 General

The rating characteristics of the transformer are expressed in steady-state sinusoidal quantities of current and voltages at rated fundamental frequency. The guaranteed losses, impedances and noise level shall correspond to these values.

NOTE North American practice establishes nameplate rating in kVA based on both r.m.s. and fundamental frequency.

5.2 Rated voltage

The rated voltage is the r.m.s. value of the fundamental component of the line-to-line voltage.

5.3 Rated current

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

5.4 Rated frequency

The rated frequency is the fundamental frequency of either 50 Hz or 60 Hz for which the transformer is designed.

5.5 Rated power

The rated power is the product of the rated voltage and rated current, hence the rated three-phase power is as follows:

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

6 Tolerances

6.1 General

The tolerances shall be in accordance with table 1 of IEC 60076-1, with the exceptions given in 6.2.

6.2 Short-circuit impedance tolerances

The impedance at the principal tap shall not deviate by more than ± 5 % of the guaranteed value.

For transformers having a tapping range not exceeding 30 %, the impedance over the usual operating part of the range shall not exceed ± 5 % of the value at the principal tapping and not more than ± 10 % of the value at the principal tapping over all other parts of the range. The usual part of the tapping range shall be agreed between the supplier and the purchaser.

The tolerances on impedance over the tapping range for transformers having a tapping range greater than 30 % shall be agreed between supplier and purchaser before contract.

L'impédance à la prise principale et la variation d'impédance sur la gamme de prises pour les transformateurs de conception en série ou similaire pour les besoins d'une application identique en service ou d'interchangeabilité ne doivent pas dépasser $\pm 3\%$ des valeurs d'essai moyennes.

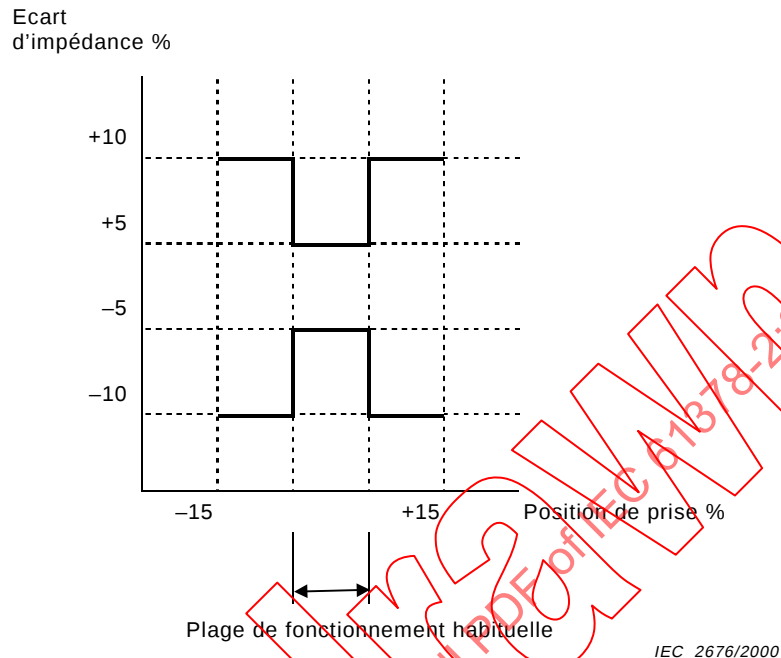


Figure 1 – Profil de tolérances d'impédance de court-circuit pour gammes de prises $\leq 30\%$

6.3 Garanties

La valeur d'impédance à la prise de réglage principale doit être garantie. Les impédances aux autres positions de prises de réglage peuvent aussi être garanties par l'accord entre l'acheteur et le fournisseur.

7 Pertes

7.1 Généralités

Les pertes totales d'un transformateur de conversion doivent représenter la somme des pertes à vide et des pertes dues à la charge aux valeurs assignées. Les pertes garanties doivent se situer dans le cadre des tolérances du tableau 1 de la CEI 60076-1.

7.2 Perte à vide

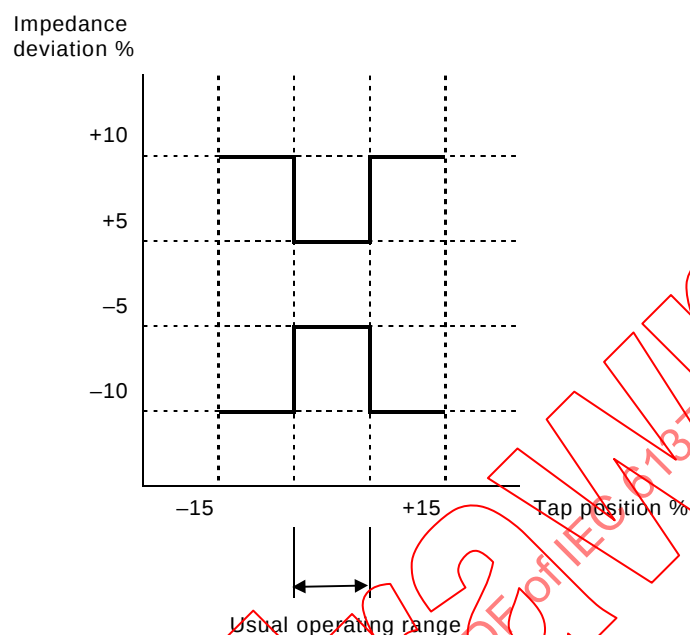
La perte à vide et le courant à vide sont mesurés de la même manière que pour les transformateurs à courant alternatif conventionnels selon 10.5 de la CEI 60076-1. Il doit s'agir des pertes à vide garanties.

NOTE Les tensions harmoniques et les courants de polarisation continus présentent un effet sur les pertes à vide et le courant à vide. Cependant, en pratique, les différences dues à cet effet peuvent être ignorées en comparaison aux pertes totales du transformateur.

7.3 Pertes dues à la charge dans des conditions de fréquence industrielle assignée

Les pertes dues à la charge doivent être mesurées selon 10.4 de la CEI 60076-1.

The impedance at the principal tapping and the variation of impedance over tapping range for transformers of duplicate or similar design for the purpose of identical application in service or interchangeability shall not exceed $\pm 3\%$ of the mean test values.



IEC 2676/2000

Figure 1 – Profile of short-circuit impedance tolerances for tapping ranges $\leq 30\%$

6.3 Guarantees

The value of impedance at the principal tap shall be guaranteed. Impedances at other tap positions may also be guaranteed by agreement between purchaser and supplier.

7 Losses

7.1 General

The total losses of a converter transformer shall be the sum of the no-load loss and the load loss at rated values. The guaranteed losses shall be within the tolerances of table 1 of IEC 60076-1.

7.2 No-load loss

No-load loss and no-load current are measured in the same way as for conventional a.c. transformers according to 10.5 of IEC 60076-1. This shall be the guaranteed no-load loss.

NOTE The harmonic voltages and d.c. bias currents have an effect on no-load loss and no-load current. However, in practice the differences due to this effect can be disregarded in comparison to the total losses of the transformer.

7.3 Load loss under rated power-frequency conditions

The load loss shall be measured in accordance with 10.4 of IEC 60076-1.

7.4 Pertes dues à la charge dans des conditions en service

Les courants parcourant les enroulements des transformateurs de conversion contiennent certaines harmoniques dont les amplitudes dépendent des paramètres du poste de convertisseur. La détermination des pertes réelles dues à la charge en service ne peut être déduite d'une mesure de pertes dues à la charge simple. La procédure destinée à déterminer les pertes dues à la charge selon cette norme comprend deux mesures de pertes dues à la charge, certaines hypothèses sur la répartition des pertes et un programme de calculs spécifiques (voir 10.3).

Le fournisseur doit calculer la valeur des pertes réelles totales dues à la charge en service fondées sur un spectre harmonique pour le courant de charge. Ce spectre doit être fourni par l'acheteur. Le calcul doit être effectué pour les positions de prises principales et extrêmes. Les pertes calculées peuvent constituer une base pour la garantie dans le but d'une évaluation des pertes.

Selon la CEI 61378-1,

- les pertes par courants de Foucault et parasites sont supposées être proportionnelles au carré du courant;
- les pertes par courants de Foucault des enroulements sont supposées dépendre de la fréquence à exposant 2, et les pertes parasites dans les parties mécaniques sont supposées suivre la fréquence à exposant 0,8.

Pertes par courants de Foucault et pertes parasites:

$$\Delta P \propto I^2 \times f^k$$

où

$$k = \begin{cases} 2 & \text{pour les pertes par courants de Foucault des enroulements,} \\ 0,8 & \text{pour les pertes parasites.} \end{cases}$$

Fondées sur un spectre harmonique donné, les pertes totales dues à la charge en service peuvent être calculées comme suit:

$$P_N = I_{LN}^2 R + P_{WE1} \times F_{WE} + P_{SE1} \times F_{SE}$$

où

$$I_{LN} = \sqrt{\sum_{h=1}^{25} I_h^2} \quad (25 \text{ est l'harmonique la plus élevée devant être évaluée})$$

$$F_{WE} = \sum_{h=1}^{25} k_h^2 \times h^2$$

$$F_{SE} = \sum_{h=1}^{25} k_h^2 \times h^{0,8}$$

$$\text{avec } k_h = \frac{I_h}{I_1} \text{ et } h = \frac{f_h}{f_1}$$

En cas de transformateurs à trois enroulements, la disposition des enroulements doit être prise en compte pour le calcul des pertes par courant de Foucault dans les enroulements et celui des pertes parasites dans les parties mécaniques; voir aussi la CEI 60146-1-1, la CEI 60146-1-2 et la CEI 60076-8.

7.4 Load loss under service conditions

The currents flowing through the windings of convertor transformers contain certain harmonics whose magnitudes depend on the parameters of the convertor station. The determination of actual load loss in service cannot be deduced from one single load-loss measurement. The procedure to determine the load loss in accordance with this standard includes two load-loss measurements, certain assumptions on loss distribution and a specific calculation scheme (see 10.3).

The supplier shall calculate the value of the actual service total load loss based on a given harmonic spectrum for the load current. This spectrum shall be provided by the purchaser. The calculation shall be made for the principal and the extreme tap positions. The calculated losses may form a basis for guarantee for the purpose of loss evaluation.

According to IEC 61378-1,

- eddy and stray losses are assumed to be proportional to the square of the current,
- winding eddy losses are assumed to depend on the frequency with the exponent 2, and stray losses in structural parts are assumed to follow the frequency with the exponent 0,8.

Eddy loss and stray loss:

$$\Delta P \propto I^2 \times f^k$$

where

$$k = \begin{cases} 2 & \text{for winding eddy losses,} \\ 0,8 & \text{for stray losses.} \end{cases}$$

Based on a given harmonic spectrum, the total service load loss can be calculated as follows:

$$P_N = I_{LN}^2 R + P_{WE1} \times F_{WE} + P_{SE1} \times F_{SE}$$

where

$$I_{LN} = \sqrt{\sum_{h=1}^{25} I_h^2} \quad (25 \text{ is the highest harmonic to be evaluated})$$

$$F_{WE} = \sum_{h=1}^{25} k_h^2 \times h^2 \quad \text{and}$$

$$F_{SE} = \sum_{h=1}^{25} k_h^2 \times h^{0,8}$$

$$\text{with } k_h = \frac{I_h}{I_1} \quad \text{and } h = \frac{f_h}{f_1}$$

In case of three-winding transformers, the winding arrangement shall be considered for the calculation of the eddy current losses in windings and of the stray losses in structural parts; see also IEC 60146-1-1, IEC 60146-1-2 and IEC 60076-8.

7.5 Détermination de la température en un point chaud

La procédure pour déterminer la température en un point chaud doit être conforme à la section 2 de la CEI 60354. Il convient de noter que l'échauffement en un point chaud déterminé par cette procédure peut ne pas être le même que la valeur susceptible d'être obtenue en service normal parce que les pertes supplémentaires en service dues au courant harmonique sont principalement concentrées aux extrémités des enroulements, tandis que celles se produisant au cours de l'essai sont réparties à travers l'enroulement. En conséquence, le point chaud engendré au cours de l'essai peut être inférieur à celui développé lors d'un fonctionnement normal de convertisseur. Afin de compenser cette différence de qualité de fonctionnement, un facteur d'accroissement pour les pertes par courants de Foucault sera calculé pour le résidu harmonique spécifique du courant de charge.

8 Niveaux d'isolement

8.1 Enroulements de ligne

Les niveaux d'isolement pour les bornes de lignes, enroulements et neutres sont définis à l'article 5 de la CEI 60076-3:

- la tension la plus élevée pour le matériel applicable à un enroulement de transformateur, U_m ;
- niveau d'isolement assigné: tensions de tenue aux chocs de foudre et aux chocs de manoeuvre assignées (phase à la terre);
- source séparée à courant alternatif correspondant à un niveau d'isolement de borne neutre.

NOTE Il importe que la tension transférée ne dépasse pas le niveau de tension de choc de manoeuvre spécifié de l'enroulement de valve.

8.2 Enroulements de valves

L'acheteur doit spécifier les niveaux de tension de chocs de foudre et de chocs de manoeuvre conformément aux tableaux 2, 3 et 4 de la CEI 60076-3.

NOTE Il convient que les niveaux d'isolement soient coordonnés de façon qu'il y ait une marge appropriée dépassant les contraintes diélectriques qui surviennent au cours du service réel.

8.2.1 Niveaux de tension de chocs de foudre

Le niveau de chocs de foudre des enroulements de valve doit être spécifié pour chaque borne à la terre et à travers le ou les enroulements.

Si les essais d'ondes coupées sont prescrits, la tension d'essai doit être conforme à la prescription de l'article 14 de la CEI 60076-3.

8.2.2 Niveaux de tension de chocs de manoeuvre

Le niveau de tension de chocs de manoeuvre des enroulements de valve doit être spécifié pour chaque borne à la terre.

Cependant, il convient que les enroulements pour les procédés en opposition ne soient pas soumis à l'essai, parce que ce sont normalement des enroulements à basse tension, et il n'y a aucune possibilité pour un transfert de la tension de choc de manoeuvre à partir du système à courant continu.

Les enroulements de valve sont soumis à la tension de choc de manoeuvre transférée au cours de l'essai de l'enroulement de ligne.

7.5 Determination of hot-spot temperature

The procedure to determine the hot-spot temperature shall be in accordance with section 2 of IEC 60354. It should be noted that the hot-spot temperature rise determined by this procedure may not be the same as the value likely to be obtained in normal service because the extra losses in service due to the harmonic current are mainly concentrated at the ends of the windings whereas those occurring during the test are distributed throughout the winding. As a result, the hot-spot generated during the test may be less than that developed in normal convertor operation. In order to compensate for this difference in performance, an enhancement factor for eddy losses will be calculated for the specific harmonic content of the load current.

8 Insulation levels

8.1 Line windings

The insulation levels for the line terminals, windings and neutrals are defined in clause 5 of IEC 60076-3:

- highest voltage for equipment applicable to a transformer winding, U_m ;
- rated insulation level: rated lightning and switching impulse withstand voltages (phase to earth);
- separate source a.c. corresponding to insulation level of neutral terminal.

NOTE It is important that the transferred voltage does not exceed the specified switching impulse level of the valve winding.

8.2 Valve windings

The purchaser shall specify the lightning and switching impulse levels in accordance with tables 2, 3 and 4 of IEC 60076-3.

NOTE The insulation levels should be coordinated in such a way that there is an adequate margin in excess of the dielectric stresses that appear in actual service.

8.2.1 Lightning impulse levels

The lightning impulse level of the valve winding shall be specified for each terminal to earth and across the winding(s).

If chopped wave tests are required, the test voltage shall be as prescribed in clause 14 of IEC 60076-3.

8.2.2 Switching impulse levels

The switching impulse level of the valve winding shall be specified for each terminal to earth.

However, windings for back-to-back schemes should not be tested, because they are normally low-voltage windings, and there is no possibility for transferred switching impulse from the d.c. system.

The valve windings are subjected to a transferred switching impulse during the test of the line winding.

8.2.3 Niveau de tenue à la tension de source séparée à courant continu

Ces essais doivent être appliqués aux bornes du ou des enroulements de valve. La tension d'essai doit être donnée par $U_{dc} = 1,5 ((N - 0,5) U_{dm} + 0,7 U_{vm})$.

La polarité positive doit être utilisée.

8.2.4 Niveau d'inversion de polarité

Ces essais doivent être appliqués aux bornes du ou des enroulements de valve.

La tension d'essai est donnée par $U_{pr} = 1,25 ((N - 0,5) U_{dm} + 0,35 U_{vm})$.

Une explication au sujet de l'essai d'inversion de polarité est donnée dans la CEI 61378-3.

8.2.5 Niveau de tenue à la tension de source séparée à courant alternatif

Toutes les bornes des enroulements de valve doivent recevoir un essai de tenue à la tension de source séparée à courant alternatif. Le niveau d'essai est donné par

$$U_{ac} = \frac{1,5((N - 0,5)U_{dm} + \sqrt{2}U_{vm}/\sqrt{3})}{\sqrt{2}} \quad (\text{valeur efficace})$$

8.3 Niveau de tension induite avec mesures de décharges partielles

Le transformateur étant connecté et excité comme en service, il est nécessaire de réaliser un essai individuel de série de tension induite, conforme à la description de l'article 12 de la CEI 60076-3, fondé sur la tension la plus élevée, U_m , de l'équipement.

9 Niveau acoustique

9.1 Généralités

Contrairement aux transformateurs de puissance à courant alternatif qui présentent normalement un niveau de puissance acoustique dans des conditions de service pratiquement identique à celui obtenu à vide au cours des essais en usine, le niveau de puissance acoustique d'un transformateur de conversion ne peut pas être aisément déterminé en charge sur son lieu d'implantation et il est probablement considérablement supérieur à celui dérivé des essais à vide. Ce fait est dû au résidu harmonique du courant de charge et aux courants de polarisation continus dans les enroulements reliés aux valves.

9.2 Niveaux de puissance acoustique garantis

Les niveaux garantis doivent être clairement fondés sur une excitation à vide sinusoïdale ou une excitation de courant de charge sinusoïdale au moment de passer la commande. En reconnaissance de la différence entre ce niveau de puissance acoustique et celui qui est mesuré sur le lieu d'implantation dans des conditions de charge (voir 9.3), l'acheteur doit aussi spécifier les niveaux de puissance acoustique maximaux individuels et globaux du transformateur principal et du matériel de refroidissement déterminés en usine à vide, ou il doit convenir des valeurs avec le fournisseur avant le contrat.

8.2.3 DC separate source-voltage withstand level

These tests shall be applied to the terminals of the valve winding(s). The test voltage shall be given by $U_{dc} = 1,5 ((N - 0,5) U_{dm} + 0,7 U_{vm})$.

Positive polarity shall be used.

8.2.4 Polarity-reversal level

These tests shall be applied to the terminals of the valve winding(s).

The test voltage is given by $U_{pr} = 1,25 ((N - 0,5) U_{dm} + 0,35 U_{vm})$.

For an explanation concerning the polarity-reversal test, see IEC 61378-3.

8.2.5 AC separate source-voltage withstand level

All terminals of the valve windings shall receive an a.c. separate source-voltage withstand test. The test level is given by

$$U_{ac} = \frac{1,5((N - 0,5)U_{dm} + \sqrt{2}U_{vm}(\sqrt{3}))}{\sqrt{2}} \text{ (r.m.s. value)}$$

8.3 Induced voltage level with partial discharge measurements

With the transformer connected and excited as in service, a routine induced voltage test as described in clause 12 of IEC 60076-3, based on the highest voltage for equipment, U_m , shall be performed.

9 Sound level

9.1 General

Unlike a.c. power transformers which normally exhibit a sound-power level under service conditions virtually the same as the one obtained at no-load during factory tests, the sound-power level of a converter transformer cannot be determined easily for the load condition at site and is likely to be substantially greater than that derived from tests at no-load. This is due to the harmonic content of the load current and to the d.c. bias currents in the windings connected to the valves.

9.2 Guaranteed sound-power levels

Guaranteed levels shall be clearly based on sinusoidal no-load excitation or sinusoidal load-current excitation at the time of placing the order. In recognition of the difference between this sound-power level and that which is measured on site under load conditions, (see 9.3), the purchaser shall also specify the individual and aggregate maximum sound-power levels of the main transformer and cooling equipment determined at the factory at no-load, or agree on the values with the supplier before contract.

9.3 Puissance acoustique sur le lieu d'implantation

Une corrélation entre les niveaux acoustiques du transformateur de conversion mesurés en usine et ceux sur le lieu d'implantation n'a pas été identifiée. La différence peut être de 10 dB(A) à 20 dB(A). Il importe que cette différence soit reconnue par l'acheteur lors de la spécification des niveaux acoustiques.

10 Essais

10.1 Généralités

Les essais et mesures doivent être effectués conformément à la CEI 60076-1, à l'exception des essais décrits de 10.3 à 10.6.

10.2 Essais

10.2.1 Essais individuels de série

Les essais suivants doivent être réalisés sur tous les transformateurs, et pas nécessairement dans l'ordre donné:

- groupe vectoriel (10.3 de la CEI 60076-1);
- rapport des tensions (10.3 de la CEI 60076-1);
- résistance d'enroulements (10.2 de la CEI 60076-1);
- pertes et courants à vide;
- pertes et impédances (prises de réglage principales) (10.4 et 10.5 de la CEI 60076-1);
- échantillons d'huile (CEI 60567);
- essai de tension de choc de manoeuvre (article 15 de la CEI 60076-3);
- essai de tension de choc de foudre (article 13 de la CEI 60076-3);
- essai de tenue à la tension de source séparée à courant continu, y compris les mesures de décharges partielles et de détections acoustiques;
- inversion de polarité, y compris les mesures de décharges partielles;
- essai de tenue à la tension de source séparée à courant alternatif et mesures de décharges partielles (article 11 de la CEI 60076-3);
- essai de surtension induite et mesure de décharges partielles (article 12 de la CEI 60076-3);
- résistances d'isolement;
- essai d'isolement du circuit magnétique et isolement associé.

Les échantillons d'huile doivent être prélevés pour analyse au début, au cours et à la fin de chaque séquence d'essais. Les échantillons prélevés au cours de la séquence d'essais doivent être prélevés à la fin des essais principaux, comme convenu entre le fabricant et le client. Les échantillons prélevés au début et à la fin de la séquence d'essais doivent être analysés. Si une différence dans l'analyse de l'huile est détectée, il convient alors d'analyser les échantillons intermédiaires.

10.2.2 Essais de type

Les essais suivants doivent être réalisés sur l'un de chaque type de transformateur, pas nécessairement dans l'ordre donné:

- essai d'échauffement (CEI 60076-2);
- niveau de puissance acoustique (CEI 60076-10);
- niveau de puissance acoustique du matériel de refroidissement (CEI 60076-10).

9.3 Sound-power level at site

A correlation between the convertor transformer sound levels measured at the factory and those on site has not been identified. The difference may be 10 dB(A) to 20 dB(A). It is important that this difference is recognized by the purchaser when specifying sound levels.

10 Testing

10.1 General

The tests and measurements shall be made in accordance with IEC 60076-1 except for those tests described in 10.3 to 10.6.

10.2 Tests

10.2.1 Routine tests

The following tests shall be performed on all transformers, not necessarily in the order given:

- vector group (10.3 of IEC 60076-1);
- voltage ratio (10.3 of IEC 60076-1);
- winding resistance (10.2 of IEC 60076-1);
- no-load losses and currents;
- losses and impedances (main taps) (10.4 and 10.5 of IEC 60076-1);
- oil samples (IEC 60567);
- switching impulse test (clause 15 of IEC 60076-3);
- lightning impulse test (clause 13 of IEC 60076-3);
- d.c. separate source-voltage withstand test including partial discharge and acoustic detection measurements;
- polarity reversal including partial discharge measurements;
- a.c. separate source-voltage withstand test and partial discharge measurements (clause 11 of IEC 60076-3);
- induced overvoltage test and partial discharge measurements (clause 12 of IEC 60076-3);
- insulation resistances;
- test of the magnetic circuit insulation and associated insulation.

Oil samples shall be taken for analysis at the beginning, during and at the end of the test sequence. The samples taken during the test sequence shall be taken at the end of major tests as agreed between purchaser and supplier. The samples taken at the beginning and end of the test sequence shall be analysed. If a difference in the analysis of the oil is detected, the intermediate samples should then be analysed.

10.2.2 Type tests

The following tests shall be performed on one of each type of transformer, not necessarily in the order given:

- temperature-rise test (IEC 60076-2);
- sound-power level (IEC 60076-10);
- sound-power level of cooling equipment (IEC 60076-10).

10.2.3 Essais spéciaux

Les essais suivants doivent être réalisés, pas nécessairement dans l'ordre donné, lorsque qu'ils sont spécifiquement demandés par l'acheteur:

- mesures à l'oscillographe des pointes de tension récurrentes (RSO);
- essai de tenue aux courts-circuits (article 2 de la CEI 60076-5);
- pertes et impédances (autres prises de réglage) (10.4 et 10.5 de la CEI 60076-1 et CEI 61378-1);
- impédances de séquence zéro-phase (10.7 de la CEI 60076-1);
- essai de courant de charge.

10.2.4 Essais de mise en service

Les essais de mise en service, comme convenu entre l'acheteur et le fournisseur, doivent être effectués sur le lieu d'implantation.

10.3 Mesures des pertes dues à la charge

10.3.1 Généralités

Les essais de pertes dues à la charge doivent être effectués avec des courants de forme sinusoïdale. Afin d'établir les pertes en conditions de service, deux mesures de pertes sont prescrites. Une mesure doit être effectuée à la fréquence assignée et la seconde à une fréquence d'au moins 150 Hz. Un calcul peut être effectué en se fondant sur ces mesures avec pour but

- a) d'établir la répartition des pertes parasites supplémentaires à l'intérieur et à l'extérieur des enroulements;
- b) de déterminer les pertes de charge au cours du service.

La méthode de mesures de pertes doit être telle qu'elle est prescrite en 10.4 de la CEI 60076-1, avec l'amplitude de courant à la fréquence assignée égale au courant assigné et celle à une fréquence élevée entre 10 % et 50 % du courant assigné. Les mesures aux deux fréquences permettent de séparer les pertes parasites en deux composants, l'un lié aux pertes parasites dans les enroulements, P_{WE} , et l'autre dans les parties mécaniques, P_{SE} .

NOTE 1 On peut supposer que la proportionnalité entre les composants de pertes individuelles est constante pour les harmoniques de courant dans le courant des enroulements supérieur à 10 % du courant assigné.

NOTE 2 La pratique en Amérique du Nord peut admettre une méthode alternative de détermination de pertes dues à la charge, fondée sur la mesure des pertes à des fréquences multiples.

10.3.2 Procédure de calcul

Les pertes dues à la charge obtenues à partir de mesures avec les deux différentes fréquences f_1 et f_x et les courants correspondants I_1 et I_x sont indiquées P_1 et P_x , ce qui donne

$$P_1 = RI_1^2 + P_{WE1} + P_{SE1}$$

$$P_x = RI_x^2 + \left(\frac{I_x}{I_1}\right)^2 \left(\frac{f_x}{f_1}\right)^2 P_{WE1} + \left(\frac{I_x}{I_1}\right)^2 \left(\frac{f_x}{f_1}\right)^{0,8} P_{SE1}$$

Les deux équations ci-dessus permettent l'évaluation des deux composants de pertes par courants de Foucault P_{WE1} et P_{SE1} .

10.2.3 Special tests

The following tests shall be performed, not necessarily in the order given, when specifically requested by the purchaser:

- recurrent surge oscillograph (RSO) measurements;
- short-circuit withstand test (clause 2 of IEC 60076-5);
- losses and impedances (other taps) (10.4 and 10.5 of IEC 60076-1 and IEC 61378-1);
- zero-phase sequence impedances (10.7 of IEC 60076-1);
- load-current test.

10.2.4 Commissioning tests

Commissioning tests, as agreed between purchaser and supplier, shall be performed on site.

10.3 Load-loss measurements

10.3.1 General

The load-loss test shall be made with currents of sinusoidal shape. In order to establish the loss under service conditions, two loss measurements are required. One measurement shall be made at rated frequency and the second one at a frequency not less than 150 Hz. Based on these measurements a calculation shall be made:

- a) to establish the distribution of additional stray losses inside and outside the windings;
- b) to determine the load loss during service.

The method of loss measurements shall be as prescribed in 10.4 of IEC 60076-1, with the current magnitude at rated frequency equal to rated current and that at elevated frequency between 10 % and 50 % of the rated current. The measurements with the two frequencies make it possible to separate the stray losses into two components, one related to the stray losses in the windings, P_{WE} , and the other in structural parts, P_{SE} .

NOTE 1 The proportionality between the individual loss components can be assumed to be constant for current harmonics in the winding current above 10 % of rated current.

NOTE 2 North American practice may allow an alternative method of load-loss determination based on the measurement of losses at multiple frequencies.

10.3.2 Calculation procedure

The load losses obtained from measurements with the two different frequencies, f_1 and f_x , and the corresponding currents, I_1 and I_x , are denoted P_1 and P_x giving

$$P_1 = RI_1^2 + P_{WE1} + P_{SE1}$$

$$P_x = RI_x^2 + \left(\frac{I_x}{I_1}\right)^2 \left(\frac{f_x}{f_1}\right)^2 P_{WE1} + \left(\frac{I_x}{I_1}\right)^2 \left(\frac{f_x}{f_1}\right)^{0.8} P_{SE1}$$

The two above equations permit the evaluation of the two eddy loss components, P_{WE1} and P_{SE1} .

Au moyen des règles de calcul de l'article 7, les pertes réelles dues à la charge en service peuvent être déterminées.

Pertes totales en service = pertes à vide + pertes dues à la charge en service calculées.

10.4 Essais diélectriques en usine

L'objet des essais diélectriques est de démontrer que le transformateur de conversion a été conçu et fabriqué selon des prescriptions d'isolement spécifiées pour les enroulements de ligne et de valve. Les essais diélectriques doivent être réalisés dans l'ordre donné ci-dessous.

10.4.1 Essais de tension de choc de manoeuvre

Lorsqu'un essai de tension de choc de manoeuvre est spécifié pour l'enroulement côté ligne, il doit être effectué selon l'article 15 de la CEI 60076-3, au niveau spécifié pour la valeur de crête. La position de prise de réglage utilisée pour cet essai doit être choisie avec soin, afin de ne pas dépasser le niveau d'isolement du ou des enroulements de valve.

Lorsque des tensions de choc de manoeuvre sont appliquées sur les enroulements côté valve, les extrémités de l'enroulement doivent être reliées ensemble et la tension de choc de manoeuvre doit être appliquée entre l'enroulement et la terre. Les bornes du ou des enroulements ne subissant pas d'essais doivent être mises à la terre. Un essai de tension de choc de manoeuvre au travers de l'enroulement de valve n'est pas applicable pour les besoins de cette norme.

10.4.2 Essais de tension de choc de foudre

La méthode d'essai de tension de choc de foudre doit être conforme à la prescription de l'article 13 de la CEI 60076-3. Les essais sur les enroulements de ligne doivent être appliqués, un à la fois, à chaque borne de ligne.

S'agissant de l'enroulement de valve, deux types d'essai s'appliquent en variante.

- a) Chaque extrémité de l'enroulement doit être soumise à la tension de choc, l'autre étant directement mise à la terre. La valeur du niveau de tension de choc de foudre est la valeur à travers l'enroulement définie à l'article 13 de la CEI 60076-3.
- b) Si différents niveaux d'isolement sont spécifiés à la terre et à travers l'enroulement, une méthode d'essai peut être envisagée dans laquelle l'extrémité de l'enroulement non soumise à l'essai est mise à la terre au moyen d'une résistance adaptée. La résistance est sélectionnée pour obtenir la tension d'essai demandée à travers l'enroulement en même temps que la tension demandée à la terre apparaît à la borne soumise à la tension de choc. L'essai doit être effectué depuis chaque extrémité de l'enroulement.

Pour un ou des enroulements ayant le même niveau de tension de choc de foudre à la terre qu'au travers du ou des enroulements, seul le premier essai est nécessaire. Lors des essais de tension de choc de l'enroulement de valve d'un transformateur de conversion, toutes les autres bornes doivent être directement mises à la terre.

Les essais de tension de choc de foudre sur des enroulements qui n'ont pas toutes leurs bornes à travers la cuve ou le couvercle doivent faire l'objet d'un accord entre l'acheteur et le fournisseur.

10.4.3 Essai de tenue à la tension de source séparée à courant continu

10.4.3.1 Température d'essai du transformateur

Au cours des essais de tenue à la tension de source séparée à courant continu, la température de l'huile doit être de $(20 \pm 10) ^\circ\text{C}$.

Using the calculation rules in clause 7, the actual service load loss can be determined.

Total in-service losses = no-load loss + calculated service load loss

10.4 Factory dielectric tests

The purpose of the dielectric tests is to demonstrate that the convertor transformer has been designed and manufactured in accordance with the specified insulation requirements for the line and valve windings. The dielectric tests shall be performed in the order given below.

10.4.1 Switching impulse tests

When a switching impulse test is specified for the line-side winding, it shall be made according to clause 15 of IEC 60076-3, at the specified level for the crest value. The tap position used for this test shall be carefully chosen in order not to exceed the insulation level of the valve winding(s).

When switching impulses are applied on the valve-side windings, the ends of the winding shall be connected together and the switching impulse shall be applied between the winding and earth. Terminals of winding(s) not being tested shall be earthed. A switching impulse test across the valve winding is not applicable for the purpose of this standard.

10.4.2 Lightning impulse tests

The lightning impulse test procedure shall be as prescribed in clause 13 of IEC 60076-3. The tests on the line windings shall be applied to each line terminal, one at a time.

For the valve winding, two alternative types of tests apply.

- a) Each end of the winding shall be impulsed with the other solidly earthed. The value of the lightning impulse level is the value across the winding as defined in clause 13 of IEC 60076-3.
- b) If different insulation levels are specified to earth and across the winding, a test procedure where the non-tested end of the winding is earthed via a suitable resistance may be considered. The resistance is selected to obtain the requested test voltage across the winding at the same time as the requested voltage to earth appears at the impulsed terminal. The test shall be carried out from each end of the winding.

For winding(s) having the same lightning impulse level to earth as across the winding(s), only the first test is needed. When impulse testing the valve winding of a convertor transformer, all other terminals shall be solidly earthed.

Lightning impulse tests on windings that do not have all their terminals brought out through the tank or cover shall be subject to agreement between the purchaser and the supplier.

10.4.3 DC separate source-voltage withstand test

10.4.3.1 Transformer test temperature

During the d.c. separate source-voltage withstand tests, the temperature of the oil shall be $(20 \pm 10) ^\circ\text{C}$.

10.4.3.2 Polarité

La polarité positive doit être utilisée.

10.4.3.3 Méthode d'essai

Les bornes non soumises à l'essai doivent être directement mises à la terre. Toutes les traversées doivent être à la terre pendant une période minimale de 2 h avant l'essai et aucun préconditionnement de la structure d'isolement du transformateur de conversion à un niveau de tension inférieur n'est permis. La tension doit être portée au niveau d'essai en 1 min et maintenue pendant 120 min, après quoi la tension doit être réduite à zéro en 1 min ou moins de 1 min.

Les mesures de décharges partielles doivent être effectuées tout au long de l'essai complet de tenue à la tension de source séparée à courant continu.

Une fois l'essai de tension à courant continu accompli, la structure d'isolement peut retenir une charge électrique considérable. Sauf dans le cas d'une décharge adaptée, les mesures de décharges partielles ultérieures peuvent être affectées.

NOTE L'utilisation de matériel pour détecter et localiser les décharges partielles est recommandée, en particulier pour effectuer la distinction entre les décharges partielles survenant dans le transformateur et celles qui peuvent se produire dans le circuit d'essai.

10.4.3.4 Critères de réception

Les mesures de décharges partielles doivent être effectuées selon les parties applicables de l'annexe A de la CEI 60076-3, au moyen du matériel de mesure spécifié dans la CEI 60270.

Les résultats doivent être considérés comme acceptables et aucun essai supplémentaire de décharges partielles n'est prescrit lorsque, au cours des 30 dernières minutes de l'essai, un nombre inférieur ou égal à 30 pulsations $\geq 2\,000$ pC est noté avec un nombre inférieur ou égal à 10 pulsations $\geq 2\,000$ pC au cours des 10 dernières minutes. Si cette condition n'est pas remplie, l'essai peut être prolongé pendant 30 min.

Il peut n'y avoir qu'une seule prolongation de 30 min et le transformateur doit être accepté lorsque le nombre de pulsations dans une telle période de 30 min ne dépasse pas 30 avec un nombre inférieur à 10 pulsations durant les 10 dernières minutes.

Si aucune défaillance ne se produit, l'essai doit être considéré comme non destructif. Un résultat infructueux des prescriptions de décharges partielles ne doit pas conduire à un rejet immédiat du transformateur, mais nécessite une consultation entre l'acheteur et le fournisseur en vue d'investigations et d'actions ultérieures.

10.4.4 Essai d'inversion de polarité

10.4.4.1 Température d'essai du transformateur

Au cours des essais d'inversion de polarité, la température de l'huile doit être de (20 ± 10) °C.

10.4.4.2 Méthode d'essai

Des bornes non soumises à l'essai doivent être directement mises à la terre. Un essai d'inversion double doit être utilisé, conformément à la figure 2.

10.4.3.2 Polarity

Positive polarity shall be used.

10.4.3.3 Test procedure

Terminals not being tested shall be solidly earthed. All bushings shall be earthed for a minimum of 2 h prior to the test and no preconditioning of the converter-transformer insulation structure at a lower voltage level is allowed. The voltage shall be brought up to the test level within 1 min and held for 120 min, after which the voltage shall be reduced to zero in 1 min or less.

Partial discharge measurements shall be performed throughout the entire d.c. separate source-voltage withstand test.

After the d.c. voltage test is complete, the insulation structure may retain a considerable electrical charge. Unless adequately discharged, subsequent partial discharge measurements may be affected.

NOTE The use of equipment to detect and locate partial discharges is recommended, in particular, to distinguish between any partial discharges occurring within the transformer from those that may occur in the test circuit.

10.4.3.4 Acceptance criteria

The partial discharge measurements shall be made according to applicable parts of annex A to IEC 60076-3, with measuring equipment as specified in IEC 60270.

The results shall be considered acceptable and no further partial discharge tests required when, during the last 30 min of the test, no more than 30 pulses $\geq 2\,000$ pC are noted with no more than 10 pulses $\geq 2\,000$ pC in the last 10 min. If this condition is not met, the test may be extended for 30 min.

There may be only one 30 min extension, and the transformer shall be accepted when the number of pulses in such a 30 min period is no more than 30 with no more than 10 pulses in the last 10 min.

If no failure occurs the test shall be regarded as non-destructive. A non-successful outcome of the partial discharge requirements shall not lead to an immediate rejection of the transformer but require a consultation between the purchaser and supplier with a view to further investigations and actions.

10.4.4 Polarity-reversal test

10.4.4.1 Transformer test temperature

During the polarity-reversal tests the temperature of the oil shall be $(20 \pm 10) ^\circ\text{C}$.

10.4.4.2 Test procedure

Terminals not being tested shall be solidly earthed. A double reversal test shall be used as shown in the figure 2.

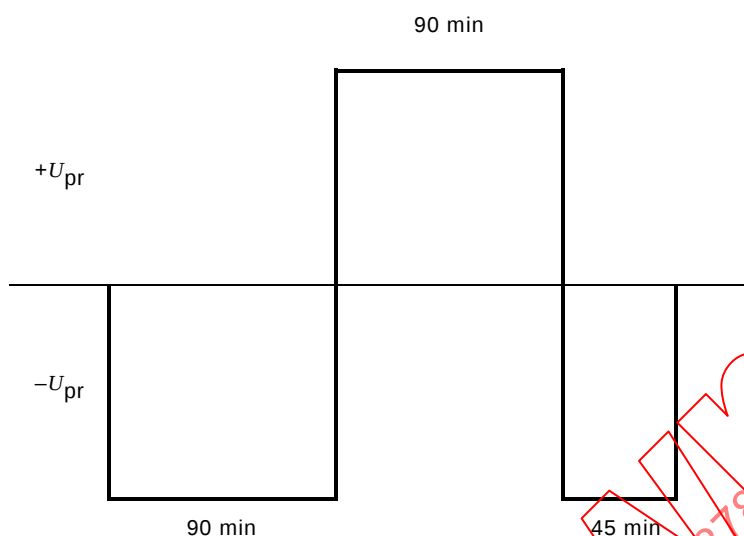


Figure 2 – Profil de tension d'essai à inversion double

Toutes les traversées doivent être à la terre pendant au moins 2 h avant l'essai et aucun préconditionnement de la structure d'isolement du transformateur de conversion à un niveau de tension inférieur n'est autorisé. L'essai doit être réalisé avec deux inversions. La séquence d'essais doit comprendre 90 min à une polarité négative suivies de 90 min à une polarité positive et, enfin, 45 min à une polarité négative. Chaque inversion de la tension d'une polarité à une autre doit être accomplie en 2 min. Les niveaux de décharges partielles doivent être contrôlés au cours de la séquence d'essais complète.

Une fois l'essai d'inversion de polarité accompli, la structure d'isolement peut retenir une charge électrique considérable. A moins que la décharge ne soit correctement effectuée, des mesures de décharges partielles ultérieures peuvent être affectées.

NOTE L'utilisation de matériel pour détecter et localiser les décharges partielles est recommandée, en particulier pour distinguer toutes décharges partielles survenant à l'intérieur du transformateur de celles susceptibles d'apparaître dans le circuit d'essai.

10.4.4.3 Critères de réception

Les mesures doivent être effectuées selon les parties applicables de l'annexe A de la CEI 60076-3, au moyen du matériel de mesure spécifié dans la CEI 60270. Les décharges partielles doivent être mesurées tout au long de l'essai d'inversion de polarité dans son ensemble.

Les résultats doivent être considérés comme acceptables lorsque, au cours des 30 min suivant l'accomplissement de chaque inversion, un nombre inférieur à 30 pulsations $> 2\,000\text{ pC}$ est noté, avec un nombre inférieur à 10 pulsations $> 2\,000\text{ pC}$ se produisant au cours des 10 dernières minutes.

L'inversion de polarité est atteinte lorsque la tension a atteint 100 % de la valeur d'essai.

Si aucune défaillance ne se produit, l'essai doit être considéré comme non destructif. Un résultat infructueux des prescriptions de décharges partielles ne doit pas conduire à un rejet immédiat du transformateur, mais nécessite une consultation entre l'acheteur et le fournisseur en vue d'investigations et d'actions ultérieures.

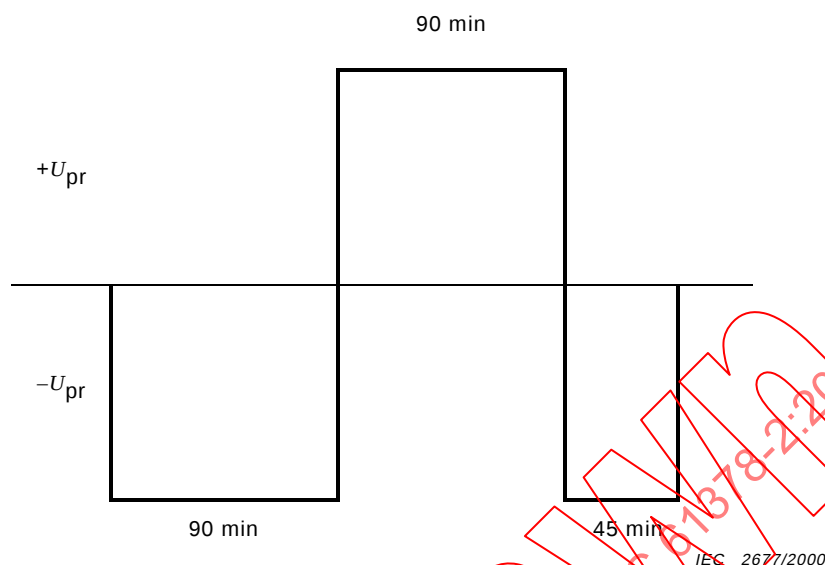


Figure 2 – Double reversal test voltage profile

All bushings shall be earthed for a minimum of 2 h prior to the test and no preconditioning of the converter-transformer insulation structure at a lower voltage level is allowed. The test shall be made with two reversals. The test sequence shall include 90 min at negative polarity followed by 90 min at positive polarity and finally 45 min at negative polarity. Each reversal of the voltage from one polarity to the other shall be completed within 2 min. The partial discharge levels shall be monitored during the entire test sequence.

After the polarity-reversal test is complete, the insulation structure may retain a considerable electrical charge. Unless adequately discharged, subsequent partial discharge measurements may be affected.

NOTE The use of equipment to detect and locate partial discharges is recommended, in particular, to distinguish between any partial discharges occurring within the transformer from those that may occur in the test circuit.

10.4.4.3 Acceptance criteria

The measurements shall be made according to applicable parts of annex A of IEC 60076-3, with measuring equipment as specified in IEC 60270. Partial discharges shall be measured throughout the entire polarity-reversal test.

The results shall be considered acceptable when, during the 30 min following the completion of each reversal, no more than 30 pulses > 2 000 pC are noted, with no more than 10 pulses > 2 000 pC occurring in the last 10 min.

The polarity reversal is completed when the voltage has reached 100 % of the test value.

If no failure occurs, the test shall be regarded as non-destructive. A non-successful outcome of the partial discharge requirements shall not lead to an immediate rejection of the transformer but shall require a consultation between the purchaser and supplier with a view to further investigations and actions.

10.4.5 Essai de tenue à la tension de source séparée à courant alternatif

L'essai doit être effectué à 50 Hz ou 60 Hz. La tension doit être appliquée sur chaque enroulement avec ses bornes disponibles connectées ensemble. Toutes les bornes non soumises à l'essai doivent être mises à la terre.

La mesure de décharges partielles doit être effectuée conformément aux parties applicables de l'annexe A de la CEI 60076-3, au moyen du matériel de mesure spécifié dans la CEI 60270.

La durée de l'essai doit s'élever à 1 h.

NOTE L'utilisation de matériel pour détecter et localiser les décharges partielles est recommandée, en particulier pour distinguer toutes décharges partielles survenant à l'intérieur du transformateur de celles susceptibles d'apparaître dans le circuit d'essai.

10.4.5.1 Critères de réception

Le niveau de décharges partielles maximal autorisé ne doit pas dépasser 500 pC.

L'annexe A de la CEI 60076-3 énumère les actions suggérées à suivre après un essai infructueux.

10.4.6 Essai induit

Les essais à courant alternatif induits de courte durée ou longue durée doivent être réalisés conformément à la CEI 60076-3, y compris les limites spécifiées de décharges partielles.

Il convient de prêter une attention particulière aux pulsations de décharges de haut niveau aléatoires et individuelles détectées par les émissions acoustiques au cours de l'essai induit. Si le nombre de pulsations de décharges de haut niveau dépasse un par minute à un niveau supérieur à 2 000 pC, il convient que le transformateur soit soumis à une période de préconditionnement, décrite dans la note suivante, et l'essai induit doit être renouvelé.

NOTE Les charges à courant continu peuvent donner lieu à des pulsations de décharges à haut niveau (>1 000 pC) aléatoires associées à la détection acoustique au cours de l'essai induit. La mise à la terre des enroulements pendant une longue période (24 h) peut ne pas être suffisante pour enlever ces charges résiduelles à courant continu dans l'isolement du transformateur du fait des essais à courant continu. Préablement aux essais induits, il est recommandé de mettre sous tension le transformateur à $1,1 \times U_m$ (enroulement de ligne) et à une fréquence assignée (50/60 Hz) pendant 1 h dans le but de supprimer les charges restantes à courant continu.

10.5 Essai d'échauffement

Sauf spécification contraire, la CEI 60076-2 doit être utilisée pour la détermination des caractéristiques d'échauffement.

S'agissant des transformateurs de conversion, les effets de courants harmoniques doivent être pris en considération dans la détermination (à l'aide de calculs et d'essais) de la température de fonctionnement de l'huile et des enroulements, ainsi que d'autres parties métalliques structurelles.

L'objet de cet essai est

- d'établir l'échauffement de l'huile supérieure;
- d'établir l'échauffement des enroulements.

La méthode d'essai pour les transformateurs immergés dans l'huile conformément à l'article 5 la CEI 60076-2 doit être modifiée, selon la description ci-dessous.