

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

61378-3

Première édition
First edition
2006-04

Transformateurs de conversion –

**Partie 3:
Guide d'application**

Converter transformers –

**Part 3:
Application guide**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 61378-3:2006

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/searchpub) 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/online_news/justpub) 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/searchpub) 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/online_news/justpub) 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**

61378-3

Première édition
First edition
2006-04

Transformateurs de conversion –

**Partie 3:
Guide d'application**

Converter transformers –

**Part 3:
Application guide**

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

Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

No part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from the publisher.

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



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE **XC**

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

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	6
INTRODUCTION	10
1 Domaine d'application	16
2 Références normatives	16
3 Termes et définitions	18
4 Symboles et abréviations	18
5 Caractéristiques assignées	20
6 Configurations d'enroulement	20
6.1 Généralités	20
6.2 Applications industrielles	24
6.3 Applications CCHT	32
7 Prises de réglage et impédances – Applications CCHT	38
7.1 Valeur de l'impédance	38
7.2 Variabilité de l'impédance	38
8 Aspects liés à l'isolation et essais diélectriques	40
8.1 Systèmes d'isolation hybrides	40
8.2 Essais diélectriques	44
9 Pertes	52
9.1 Généralités	52
9.2 Essais thermiques	74
10 Noyau et aspects liés au niveau de bruit	76
10.1 Noyau	76
10.2 Niveau de bruit	78
11 Spécification du transformateur	82
11.1 Généralités	82
11.2 Spécification technique contre spécifications fonctionnelles	84
11.3 Spécifications de transformateurs CCHT	84
11.4 Notes et commentaires relatifs aux éléments des spécifications à fournir séparément par l'acheteur et le fournisseur	86
11.5 Informations exigées du fournisseur	86
11.6 Assurance qualité et programme d'essai	94
11.7 Disponibilité et mesures permettant de réduire le temps d'arrêt de service	94
11.8 Informations à fournir par l'acheteur ou par le concepteur du réseau	94
12 Considérations relatives au court-circuit	112
13 Eléments constitutifs	120
13.1 Changeurs de prises en charge	120
13.2 Traversées du côté valve	122
14 Maintenance	130
14.1 Généralités	130
14.2 Huile	132
14.3 Qualité de l'isolation	134
14.4 Changeurs de prises	144
14.5 Accessoires et dispositifs	146

CONTENTS

FOREWORD.....	7
INTRODUCTION.....	11
1 Scope.....	17
2 Normative references	17
3 Terms and definitions	19
4 Symbols and abbreviations.....	19
5 Rating data.....	21
6 Winding configurations	21
6.1 General.....	21
6.2 Industrial applications.....	25
6.3 HVDC applications	33
7 Tappings and impedances – HVDC applications.....	39
7.1 Value of impedance.....	39
7.2 Variability of impedance	39
8 Insulation aspects and dielectric tests	41
8.1 Hybrid insulation systems.....	41
8.2 Dielectric tests	45
9 Losses.....	53
9.1 General.....	53
9.2 Thermal tests	75
10 Core and sound aspects.....	77
10.1 Core.....	77
10.2 Sound.....	79
11 Transformer specification	83
11.1 General.....	83
11.2 Technical specification versus functional specifications.....	85
11.3 HVDC transformer specifications.....	85
11.4 Notes and comments on specification items to be provided individually by purchaser and supplier.....	87
11.5 Information to be provided by the supplier	87
11.6 Quality assurance and test programme	95
11.7 Availability and measures to minimize service downtime	95
11.8 Information to be provided by the purchaser or by the system designer	95
12 Short circuit considerations	113
13 Components	121
13.1 On-load tap-changers.....	121
13.2 Valve-side bushings	123
14 Maintenance.....	131
14.1 General.....	131
14.2 Oil.....	133
14.3 Insulation quality	135
14.4 Tap-changers	145
14.5 Accessories and fittings.....	147

15 Surveillance	148
15.1 Généralités.....	148
15.2 Transformer condition assessment in service	148
15.3 Types de dispositifs de surveillance	150
15.4 Résumé.....	158
Bibliographie.....	160
Figure 1 – Montage de pont hexaphasé	22
Figure 2 – Montage de pont dodécaphasé	22
Figure 3 – Couplages de transformateur en étoile-delta et étoile-étoile ou en remplacement en delta-delta et delta-étoile pour donner une séparation de 30 degrés électriques entre les tensions du côté valve.....	22
Figure 4 – Décalage de phase de 15° réalisé de préférence par couplage en zigzag ou en delta étendu.....	24
Figure 5 – Montage de bobines d'inductance auto-saturées.....	26
Figure 6 – Concept d'autotransformateur pour phases ouvertes.....	28
Figure 7 – Concept d'autotransformateur classique pour phases fermées, avec régulation grossière et fine pour de petits échelons de régulation	28
Figure 8 – Dispositif survolteur pour concept d'autotransformateur pour phases fermées, avec réglage grossier et fin pour de petits échelons de régulation	30
Figure 9 – Couplage en delta avec enroulements à prise.....	30
Figure 10 – Conception à deux enroulements avec enroulement à prise	32
Figure 11 – Deux dispositions de base des enroulements d'un transformateur à deux enroulements.....	34
Figure 12 – Impédance mutuelle.....	38
Figure 13 – Modèle d'impédance type.....	40
Figure 14 – Composants d'un système d'isolation d'un transformateur de conversion industriel type	42
Figure 15 – Système d'isolation, circuit R-C équivalent.....	46
Figure 16 – Répartition des tensions avant et immédiatement après inversion de la polarité.....	48
Figure 17 – Conversion c.a./c.c. – Schéma simplifié	50
Figure 18 – Champs de fuite pour transformateur à trois enroulements avec enroulements de valve à couplage serré.....	62
Figure 19 – Champs de fuite pour un transformateur à trois enroulements avec enroulements de valve sans couplage	64
Figure 20 – Champs de fuite pour un transformateur à trois enroulements avec enroulements de valve biconcentriques à couplage lâche	66
Figure 21 – Champs de fuite pour un transformateur à trois enroulements avec enroulements de valve double étage à couplage lâche	68
Figure 22 – Etats de défaut de court-circuit.....	114
Figure 23 – Disposition des traversées des valves.....	126
Figure 24 – Exemples de champs électriques c.a, c.c. et combinés adjacents aux traversées CCHT et systèmes d'isolation électriques associés.....	128
Tableau 1 – Disposition des deux enroulements	34

15 Monitoring	149
15.1 General	149
15.2 Transformer condition assessment in service	149
15.3 Types of monitor	151
15.4 Summary	159
Bibliography	161
Figure 1 – Bridge connection for six-pulse arrangement	23
Figure 2 – Bridge connection for twelve-pulse arrangement	23
Figure 3 – Transformer connections star-delta and star-star or alternatively, delta-delta and delta-star to give a 30 electrical degree separation between the valve-side voltages	23
Figure 4 – 15° phase shifting is preferably realized by extended delta or zigzag connection	25
Figure 5 – Connection of self-saturated reactors	27
Figure 6 – Autotransformer concept for open phases	29
Figure 7 – Conventional autotransformer concept for closed phases with coarse and fine regulation for small regulating steps	29
Figure 8 – Booster arrangement for autotransformer concept for closed phases with coarse and fine regulation for small regulating steps	31
Figure 9 – Delta connection with tapped windings	31
Figure 10 – Two winding design with tapped winding	33
Figure 11 – Two basic arrangements of the individual windings of a two-winding transformer	35
Figure 12 – Mutual impedance	39
Figure 13 – Typical impedance pattern	41
Figure 14 – Components of a typical industrial converter transformer insulating system	43
Figure 15 – Insulation system, equivalent R-C circuit	47
Figure 16 – Voltage distribution before and immediately after polarity reversal	49
Figure 17 – AC/DC conversion – Simplified sketch	51
Figure 18 – Leakage fields for a three-winding transformer with closely coupled valve windings	63
Figure 19 – Leakage fields for a three-winding transformer with decoupled valve windings	65
Figure 20 – Leakage fields for a three winding transformer with loosely coupled double concentric valve windings	67
Figure 21 – Leakage fields for a three winding transformer with loosely coupled double-tier valve windings	69
Figure 22 – Short-circuit fault conditions	115
Figure 23 – Arrangement of valve bushings	127
Figure 24 – Examples of a.c., d.c. and combined electric field dispositions adjacent to HVDC bushings and associated electric insulation systems	129
Table 1 – Arrangements of two windings	35

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

TRANSFORMATEURS DE CONVERSION –**Partie 3: Guide d'application****AVANT-PROPOS**

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de la CEI"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de la CEI intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de la CEI se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de la CEI. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que la CEI s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; la CEI ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de la CEI dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de la CEI et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) La CEI n'a prévu aucune procédure de marquage valant indication d'approbation et n'engage pas sa responsabilité pour les équipements déclarés conformes à une de ses Publications.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à la CEI, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de la CEI, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de la CEI ou de toute autre Publication de la CEI, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de la CEI peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 61378-3 a été établie par le comité d'études 14 de la CEI: Transformateurs de puissance.

Le texte de cette Norme est basé sur les documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
14/529/FDIS	14/534/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 2.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

CONVERTER TRANSFORMERS –**Part 3: Application guide****FOREWORD**

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as "IEC Publication(s)"). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with an IEC Publication.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 61378-3 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
14/529/FDIS	14/534/RVD

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

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

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

Partie 1: Transformateurs pour applications industrielles

Partie 2: Transformateurs pour applications CCHT

Partie 3: Guide d'application

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

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

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 61378-3:2006

Withdrawn

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

Part 1: Transformers for industrial applications

Part 2: Transformers for HVDC applications

Part 3: Application guide

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

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

Withdrawn
IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 61378-3:2006

INTRODUCTION

0.1 Généralités

La CEI 61378 est constituée de trois parties:

- La partie 1 s'applique aux transformateurs associés à des convertisseurs pour applications «industrielles» générales. (Fabrication du cuivre, élaboration de l'aluminium et électrolyse de certains gaz).
- La partie 2 s'applique aux transformateurs utilisés pour des applications CCHT.
- La partie 3 est constituée du présent guide d'application qui comporte les rubriques décrites dans les paragraphes 0.2 à 0.13.

La CEI 61378-1 s'applique aux transformateurs convertisseurs utilisés dans des «applications industrielles» et aux transformateurs qui alimentent des applications de fabrication électrolytique pour l'élaboration de l'aluminium, le raffinage du cuivre et la production de certains gaz. Elle s'applique également aux entraînements électriques tels que ceux utilisés dans les laminoirs et les systèmes de propulsion des navires. Elle ne s'applique pas aux entraînements électriques des applications de traction embarqués sur des locomotives mais par contre aux applications de conversion d'énergie liées à des systèmes statiques de traction. Il existe par ailleurs une large gamme de services en conversion de caractéristiques assignées moindres à laquelle la partie 1 ainsi que la présente partie de la CEI 61378 s'appliquent également.

La CEI 61378-2 couvre les transformateurs de conversion utilisés dans des «applications CCHT». Il existe deux types de systèmes de transmission de puissance CCHT, connus sous l'appellation générique de procédés «en opposition» et «de transmission». Le fonctionnement et l'évaluation des transformateurs fonctionnant au sein de ces deux systèmes sont couverts par la partie 2 ainsi que par la présente partie de la CEI 61378.

0.2 Caractéristiques assignées (Article 5)

Dans la CEI 61378-1 et la CEI 61378-2, la méthode d'établissement des caractéristiques assignées des transformateurs de conversion est différente de la méthode conventionnelle habituellement utilisée. La méthode conventionnelle utilise la valeur efficace du courant pour définir le régime assigné de plaque du transformateur. La CEI 61378 a introduit une modification fondamentale de la méthode de définition des caractéristiques assignées des transformateurs. Elle explique le concept d'utilisation des composantes fondamentales de tension et de courant comme base du régime assigné de plaque du transformateur. Le régime assigné de plaque déduit de ces composantes fondamentales devient la base de calcul des impédances et des pertes garanties.

0.3 Configurations d'enroulement (Article 6)

Il existe un grand nombre de couplages et de configurations d'enroulement spécifiques aux transformateurs de conversion tant pour des applications industrielles que pour des applications CCHT. Ceux-ci ont été développés sur de nombreuses années. Les caractéristiques fonctionnelles des divers couplages de redresseurs sont pour la plupart traitées dans la CEI 60146. La présente partie de la CEI 61378 traite des couplages dans la mesure où ils influencent la construction et certains aspects fonctionnels du transformateur.

Il est courant d'utiliser des mécanismes de régulation dans les applications industrielles. La présente partie de la CEI 61378 couvre les principes applicables à certains de ces mécanismes.

INTRODUCTION

0 General

IEC 61378 is written in three parts:

- Part 1 applies to transformers associated with general "Industrial" converter uses. (Copper making, aluminium smelting and the electrolysis of certain gases).
- Part 2 applies to transformers required for HVDC applications.
- Part 3 is this application guide which contains the topic headings described in 0.2 to 0.12.

IEC 61378-1 applies to converter transformers used in "industrial applications" and applies to transformers that supply electrolysis applications for aluminium smelting, copper refining and the production of certain gases. It also applies to electrical drives as used in rolling mill and ship propulsion systems. It does not apply to electrical drives in traction applications that are mounted on board locomotives but does apply to converter applications associated with static traction systems. In addition, there is a wide range of smaller rating converter duties to which Part 1 and the present part of IEC 61378 are equally applicable.

IEC 61378-2 covers converter transformers used in "HVDC Applications". There are two types of HVDC power transmission systems known generically as "back to back" and "transmission" schemes. The operation and evaluation of transformers operating within these two systems are covered by Part 2 and the present part of IEC 61378.

0.1 Rating data (Clause 5)

In both IEC 61378-1 and IEC 61378-2, the method of rating converter transformers is different to that used historically. In the traditional method, the r.m.s. value of current was used in defining the nameplate rating of the transformer. IEC 61378 has introduced a fundamental change in the method of defining the rating of transformers. The concept of using the fundamental components of voltage and current as the basis for the transformer nameplate rating is explained. The nameplate rating derived from these fundamental components becomes the basis for the guaranteed impedances and losses.

0.2 Winding configurations (Clause 6)

There are a large number of winding connections and configurations that are specific to converter transformers for both industrial and HVDC applications. They have been developed over many years. The operating characteristics of the various rectifier connections are mostly covered in IEC 60146. In the present part of IEC 61378, the connections are discussed in so far as they affect the construction and some operational aspects of the transformer.

The use of regulating schemes is common in industrial applications. The present part of IEC 61378 covers the principles for a number of these schemes.

0.4 Prises de réglage et impédances (Article 7)

L'impédance des transformateurs utilisés pour des applications CCHT nécessite une attention et des solutions de conception particulières. Les exigences sont principalement liées à la limitation de la variabilité de l'impédance sur l'ensemble de la gamme de prises, la limitation de la différence d'impédance entre transformateurs et, dans certaines applications, la différence d'impédance entre enroulements à couplage étoile et à couplage delta. Le présent document traite de ces exigences et de leurs aspects pratiques.

En général, la gamme de prises des transformateurs de conversion est plus large que celle des transformateurs conventionnels. La présente norme traite des impacts de cette gamme de prises plus large sur le transformateur proprement dit et sur le changeur de prise.

0.5 Aspects liés à l'isolation et essais diélectriques (Article 8)

L'Article 8 traite de deux aspects. En premier lieu, l'utilisation croissante des systèmes d'isolation «hybrides» dans les transformateurs pour applications industrielles. En second lieu, la capacité des structures d'isolation des transformateurs CCHT lorsqu'ils sont soumis à des essais en tension continue et en service.

Les principes fondamentaux, les méthodes d'essai et les niveaux de tension d'essai utilisés sont traités, à la fois pour les essais en courant alternatif et pour ceux en courant continu. Les marges de sécurité liées au régime d'essai proposé sont également examinées.

0.6 Pertes (Article 9)

La présente partie de la CEI 61378 décrit de manière détaillée les éléments qui résultent de l'application des principes, des méthodes d'essai et de calcul utilisés, en tenant compte des effets des courants de charge non sinusoïdaux sur tous les types de transformateur de conversion.

Les principes d'essai à deux fréquences pour les applications CCHT sont également examinés en détail sur la base d'un exemple de calcul pratique. Les pertes résultant de ces essais et les calculs sont utilisés comme base de spécification des pertes et courants d'essai à utiliser pour établir les gradients de l'huile et des enroulements lors des essais thermiques.

0.7 Noyau et aspects liés au niveau de bruit (Article 10)

Les effets des harmoniques de tension et d'un courant circulant de polarisation continue sur les performances et la construction du noyau sont discutés et résumés.

Les causes de bruit et les différences qui peuvent exister entre des mesures acoustiques conventionnelles effectuées en usine et celles qui sont attendues et observées sur site sont examinées.

Cet Article traite des dernières méthodes d'évaluation du niveau acoustique lié aux transformateurs de conversion.

0.8 Spécification du transformateur (Article 11)

Les transformateurs de conversion présentent des différences significatives par rapport aux transformateurs de puissance en termes de spécification. Le guide comprend une présentation des éléments de détails exigés dans tous les types de spécifications techniques et fonctionnelles.

Il fournit également des lignes directrices quant aux éléments à spécifier par l'acheteur et à fournir par le fabricant lors des processus d'appel d'offres et des commandes.

0.3 Tappings and impedances (Clause 7)

The impedance of transformers for HVDC applications requires special attention and design solutions. The requirements primarily concern the limitation of the impedance variability over the whole tapping range, the limitation of the impedance difference between transformers and in some applications, the impedance difference between star and delta windings. This document discusses these requirements and their practical aspects.

In general, the tapping range in converter transformers is wider than in conventional transformers. The impact of the wider tapping range on the transformer and the tap-changer is discussed in this document.

0.4 Insulation aspects and dielectric tests (Clause 8)

Two aspects are covered in this Clause. First, the increasing use of “hybrid” insulation systems in transformers for industrial applications. Secondly, the ability of transformer insulation structures of HVDC transformers when tested with d.c. voltage and in service.

The basic principles, the methods of testing and the test voltage levels used for both a.c. and d.c. testing are discussed. The safety margins associated with the proposed testing regime are also reviewed.

0.5 Losses (Clause 9)

The present part of IEC 61378 details the derivation of the principles, testing and calculation methods used that take into account the effects of non-sinusoidal load currents on converter transformers of all types.

The principles of testing at two frequencies for HVDC applications are detailed along with a worked example of the calculation. The losses derived from these tests and calculations are used as the base for specifying the test losses and currents to be used in establishing the oil and winding gradients during the thermal testing.

0.6 Core and sound aspects (Clause 10)

The effects of voltage harmonics and a d.c.-bias circulating-current on the performance and construction of the core are discussed and summarized.

The causes of sound and the differences that may be expected between conventional factory sound measurements and those to be expected and experienced at site are reviewed.

The latest methods of assessment of sound associated with converter transformers are discussed.

0.7 Transformer specification (Clause 11)

Transformers for converters differ significantly from power transformers with respect to the transformer specification. An outline of the details required in any specification is included as part of the guide for both technical and functional types of specification.

Some guidance as to what should be specified by the purchaser and what should be expected from the manufacturer during the tender and order process is given.

0.9 Considérations relatives aux courts-circuits (Article 12)

Pour les transformateurs de puissance conventionnels, le calcul des courants de court-circuit dans les enroulements dépend uniquement des composantes de l'impédance et de la résistance du transformateur et de l'alimentation à laquelle il est connecté.

Dans le cas de transformateurs utilisés pour alimenter des applications de conversion, il existe dans le convertisseur des conditions de défaut qu'il est nécessaire de prendre en compte lorsque la valeur de crête des courants de défaut risque d'être supérieure à celles qui résultent des transformateurs de puissance conventionnels. Ces conditions sont décrites en détails dans la présente partie de la CEI 61378.

0.10 Composants (Article 13)

Pour la conception des transformateurs, qu'ils soient destinés à des applications industrielles ou à des applications de conversion CCHT, le choix et le fonctionnement du changeur de prises en charge sont déterminants. La présente partie de la CEI 61378 présente certains principes qui décident de l'utilisation des changeurs de prises en charge dans ces applications.

Dans les applications CCHT, le choix et l'intégration des traversées du côté de la valve dans la conception globale sont d'une importance vitale.

Les exigences générales et les recommandations relatives à la construction, à l'intégration des traversées au transformateur et aux essais requis sont décrites en détail. Une norme CEI spécifique aux traversées CCHT est en cours d'élaboration et les recommandations de la présente partie de la CEI 61378 utilisent des exigences de la nouvelle norme.

0.11 Maintenance (Article 14)

Les statistiques indiquent que les transformateurs CCHT exigent un niveau élevé de maintenance. Les éléments qui nécessitent une attention particulière sont les changeurs de prises en charge et les traversées du côté valve. Le présent document prête une attention toute particulière aux exigences de maintenance.

0.12 Surveillance et analyses sur site (Article 15)

Il est recommandé de surveiller les transformateurs, si les problèmes sur site doivent être réduits et c'est dans ce cadre que la surveillance de condition est traitée. La présente partie de la CEI 61378 présente également des recommandations quant aux procédures et pratiques à suivre en cas de défaillance sur site. Ces recommandations sont faites pour ne pas détruire ou affecter les preuves et données vitales au cours des étapes initiales de l'analyse.

L'Article 15 traite également de l'utilisation du contrôle d'état pour cette application.

0.13 Autres sources d'information

L'élaboration de la présente partie de la CEI 61378 qui couvre particulièrement les applications de conversion CCHT de la CEI 61378-2 a été influencée de manière significative par les travaux sur divers sujets du groupe de travail mixte 12/14.10 du CIGRE (Conseil International des Grands Réseaux Electriques).

0.8 Short circuit considerations (Clause 12)

In conventional power transformers, the calculation of the short circuit currents within the windings are dependent solely on the impedance and resistance components of the transformer and supply to which it is connected.

In the case of transformers used to supply converter applications, there are fault conditions within the converter that need to be considered where the peak value of the fault currents may be higher than those derived for conventional power transformers. These conditions are detailed in the present part of IEC 61378.

0.9 Components (Clause 13)

In the design of transformers for both industrial and HVDC converter applications, the choice and operation of the on-load tap-changer is crucial. The present part of IEC 61378 outlines some of the principles governing the use of tap-changers in these applications.

In the HVDC application, the choice and integration of the valve-side bushings into the overall design is of vital importance.

The general requirements and recommendations for the construction, integration of the bushings with the transformer and testing are detailed. An IEC standard specifically for HVDC bushing is in preparation and the recommendations in the present part of IEC 61378 draws upon the requirements of the new standard.

0.10 Maintenance (Clause 14)

Statistics suggest that the HVDC transformer requires maintenance to a high standard. Those items that require particular attention are on-load tap-changers and valve-side bushings. Attention is drawn in this document to maintenance requirements.

0.11 Monitoring and on-site investigations (Clause 15)

Transformer monitoring is recommended if on-site problems are to be minimized and in this respect, condition monitoring is discussed. The present part of IEC 61378 also presents recommendations for the procedure and practices to be followed in the event of a failure at site. These recommendations are made so that vital evidence and data are not destroyed or contaminated at the initial stages of the investigation.

The use of condition monitoring for this application is also discussed in this clause.

0.12 Additional sources of information

The preparation of the present part of IEC 61378, specifically for IEC 61378-2 HVDC converter applications, was significantly influenced by the working papers on various topics of CIGRE Joint Working Group 12/14.10.

TRANSFORMATEURS DE CONVERSION –

Partie 3: Guide d'application

1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 61378 fournit aux utilisateurs des informations sur des sujets spécifiques pour lesquels il existe des différences de conception, de construction, d'essais et de conditions de fonctionnement entre les transformateurs industriels et de conversion CCHT d'une part et les transformateurs conventionnels utilisés dans les systèmes de puissance d'autre part. En outre l'objectif de la présente partie de la CEI 61378 est de fournir aux fabricants les éléments techniques de fond qui constituent la base des principes utilisés dans la CEI 61378-1 et la CEI 61378-2.

La présente partie de la CEI 61378 est prévue pour compléter et non pour remplacer ou annuler le guide d'application pour les transformateurs de puissance, la CEI 60076-8, dans la mesure où nombre des principes généraux contenus dans ladite publication s'appliquent également aux transformateurs de conversion.

2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

CEI 60076-1:1993, *Transformateurs de puissance – Partie 1: Généralités*
Amendement 1 (1999)

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

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

CEI 60214-1, *Changeurs de prises – Partie 1: Prescriptions de performances et méthodes d'essai*

CEI 60214-2, *Tap-changers – Part 2: Application guide* (disponible en anglais seulement)

CEI 60296, *Fluides pour applications électrotechniques – Huiles minérales isolantes neuves pour transformateurs et appareillages de connexion*

CEI 60422, *Guide de maintenance et de surveillance des huiles minérales isolantes en service dans les matériels électriques*

CEI 60567, *Matériels électriques immergés – Echantillonnage de gaz et d'huile pour analyse des gaz libres et dissous – Lignes directrices*

CEI 60599, *Matériels électriques imprégnés d'huile minérale en service – Guide pour l'interprétation de l'analyse des gaz dissous et des gaz libres*

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

CEI 61378-2:2001, *Transformateurs de conversion – Partie 2: Transformateurs pour applications CCHT*

CONVERTER TRANSFORMERS –

Part 3: Application guide

1 Scope

This part of IEC 61378 provides information to users about specific topics related to industrial and HVDC converter transformers with design, construction, testing and operating conditions differing from conventional transformers used in power systems. In addition, it is the aim of the present part of IEC 61378 to provide manufacturers with the technical background that forms the basis for the principles used within IEC 61378-1 and IEC 61378-2.

It is intended that this part of IEC 61378 is used to supplement and not replace or supersede the application guide for power transformers, IEC 60076-8, since many of the general principles contained within it are equally applicable to converter transformers.

2 Normative references

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

IEC 60076-1:1993, *Power transformers – Part 1: General*
Amendment 1 (1999)

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

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

IEC 60214-1, *Tap-changers – Part 1: Performance requirements and test methods*

IEC 60214-2, *Tap-changers – Part 2: Application guide*

IEC 60296, *Fluids for electrotechnical applications – Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear*

IEC 60422, *Supervision and maintenance guide for mineral insulating oils in electrical equipment*

IEC 60567, *Oil-filled electrical equipment – Sampling of gases and of oil for analysis of free and dissolved gases – Guidance*

IEC 60599, *Mineral oil impregnated electrical equipment in service – Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis*

IEC 61378-1:1997, *Converter transformers – Part 1: Transformers for industrial applications*

IEC 61378-2:2001, *Converter transformers – Part 2: Transformers for HVDC applications*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions utilisées dans la CEI 61378-1 et la CEI 61378-2 s'appliquent.

4 Symboles et abréviations

Symbole	Signification	Unités
I_1	Courant assigné	A
I_x	Courant d'essai de pertes dues à la charge à la fréquence f_x	A
I_{LN}	Valeur du courant de charge en service dans l'enroulement à l'étude	A
I_h	Courant en harmonique d'indice de rang h	A
I_{eq}	Courant efficace sinusoïdal équivalent donnant des pertes dues à la charge en service des enroulements	A
h	Rang de l'harmonique	
U_1	Tension assignée	V
S_R	Puissance assignée du transformateur	VA
P_1	Pertes totales dues à la charge à la fréquence fondamentale (50 Hz ou 60 Hz)	W
P_x	Perte due à la charge mesurée à la fréquence f_x	W
$I_1^2 R$	Pertes ohmiques au courant assigné	W
R	Résistance d'enroulements en courant continu, y compris les conducteurs internes	Ω
P_{WE1}	Pertes par courants de Foucault dans les enroulements à la fréquence fondamentale	W
P_{SE1}	Pertes parasites dans les parties mécaniques (à l'exclusion des enroulements) à la fréquence fondamentale	W
P_N	Valeur totale des pertes dues à la charge en service	W
f_1	Fréquence assignée et également la fréquence fondamentale	Hz
f_x	Fréquence ≥ 150 Hz utilisée pour déterminer la répartition des pertes par courants de Foucault	Hz
f_h	Fréquence en harmonique d'indice de rang h	Hz
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)	V
U_m	Tension du réseau la plus élevée de l'enroulement de ligne	V
U_{dm}	Tension continue la plus élevée par pont à valve	V
U_{DC}	Tension d'essai de source séparée à courant continu, pour les enroulements de valve	V
U_{pr}	Tension d'essai de l'inversion de polarité pour les enroulements de valve (tension à courant continu)	V
U_{vm}	Tension de fonctionnement maximale entre phases à courant alternatif des enroulements de valve du transformateur de conversion	V
N	Nombre de ponts hexaphasés en série à partir du neutre de la ligne à courant continu au pont à redresseur connecté au transformateur	

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC 61378-1 and IEC 61378-2 apply.

4 Symbols and abbreviations

Symbol	Meaning	Units
I_1	rated current	A
I_x	Load loss test current at frequency f_x	A
I_{LN}	Value of the in-service load current in the winding under consideration	A
I_h	Current at harmonic order number h	A
I_{eq}	Equivalent sinusoidal r.m.s. current giving the winding in-service load loss	A
h	Harmonic order number	
U_1	Rated voltage	V
S_R	Rated power of the transformer	VA
P_1	Total load losses at fundamental frequency (50 Hz or 60 Hz)	W
P_x	Load loss measured at frequency f_x	W
$I_1^2 R$	Ohmic losses at rated current	W
R	d.c. resistance of windings including internal leads	Ω
P_{WE1}	Eddy losses in windings at fundamental frequency	W
P_{SE1}	Stray losses in structural parts (excluding windings) at fundamental frequency	W
P_N	Total service load loss	W
f_1	Rated frequency and also the fundamental frequency	Hz
f_x	Frequency ≥ 150 Hz used to determine the distribution of eddy losses	Hz
f_h	Frequency at harmonic order number h	Hz
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.)	V
U_m	Highest system voltage of the line winding	V
U_{dm}	Highest d.c. voltage per valve bridge	V
U_{DC}	d.c. separate source test voltage for the valve windings	V
U_{pr}	Polarity reversal test voltage for the valve windings (d.c. voltage)	V
U_{vm}	Maximum phase to phase a.c. operating voltage of the valve windings of the converter transformer	V
N	Number of six-pulse bridges in series from the neutral of the d.c. line to the rectifier bridge connected to the transformer	

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.

5 Caractéristiques assignées

La CEI 61378-1 et la CEI 61378-2 stipulent que les caractéristiques assignées du transformateur sont exprimées en grandeurs sinusoïdales en régime établi de courant et de tension à la fréquence fondamentale assignée. Les pertes, les impédances et les niveaux de bruit garantis doivent correspondre à ces valeurs. La tension assignée et le courant assigné font référence aux grandeurs fondamentales, tension entre phases et courant de ligne.

Les composantes fondamentales sont choisies de manière à établir une plate-forme commune pour les grandeurs garanties telles que les pertes et les impédances, indépendamment des conditions de fonctionnement et donc du spectre de résidu harmonique. Il convient de noter que les essais permettant d'établir les caractéristiques de fonctionnement ne peuvent être réalisés qu'avec des grandeurs sinusoïdales. Lorsque des appareils munis de transducteurs (inductances saturables) sont soumis aux essais, il est possible que les performances de l'essai avec des grandeurs sinusoïdales ne soient pas satisfaites. Dans ce cas, un accord sur les modalités d'essai doit être recherché entre le fournisseur et l'acheteur avant signature du contrat.

Les valeurs d'échauffement garanties sont pertinentes pour une condition de charge spécifique, comme définie par accord entre l'acheteur et le fabricant. Un transformateur de conversion étant exposé à un courant ayant certains résidus harmoniques, les pertes réelles ne correspondront pas aux pertes calculées avec un courant sinusoïdal vrai. En général, les harmoniques du courant accentuent les pertes dues à la charge en comparaison au fonctionnement avec un vrai courant sinusoïdal.

En général, la tension appliquée au cours du fonctionnement en convertisseur s'écarte à peine d'une tension sinusoïdale vraie. Ainsi en fonctionnement normal, les pertes à vide sont définies de manière suffisante par la tension assignée.

En fonctionnement en convertisseur, l'estimation des pertes réelles dues à la charge est suffisamment précise si l'on utilise la procédure de calcul donnée en 5.1 de la CEI 61378-1:1997 ainsi que dans la CEI 61378-2. Le courant d'essai correspondant qui permet d'établir l'échauffement qui en résulte peut être déduit à partir de cet ensemble de formules (voir 6.4 de la CEI 61378-1:1997, ou 10.5 de la CEI 61378-2:2001).

Il convient également de noter que le courant de charge réel en fonctionnement peut être supérieur au courant assigné lorsqu'il est mesuré au moyen d'un instrument qui donne des valeurs efficaces du courant puisque le courant assigné de plaque fait référence à la composante fondamentale du courant de charge.

6 Configurations d'enroulement

6.1 Généralités

Le présent article décrit les différentes dispositions d'enroulement qui peuvent exister dans les applications industrielles et CCHT.

En général, les enroulements seront disposés de manière à fournir, à partir d'un système triphasé symétrique, un pont de conversion hexaphasé. Le convertisseur transportera le courant deux fois à partir de chaque phase, pendant une durée maximale de 120 degrés électriques ou un tiers de cycle, une fois dans le sens positif et une fois dans le sens négatif. Voir la Figure 1.

“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 Rating data

IEC 61378-1 and IEC 61378-2 state that the rating characteristics of the transformer are expressed in steady state sinusoidal quantities of current and voltage at the rated fundamental frequency. The guaranteed losses, impedances and sound level shall correspond to these values. The rated voltage and current refer to the fundamental quantities, line-to-line voltage and line current.

Fundamental components are selected to establish a common platform for guaranteed quantities such as losses and impedances independent of the operating conditions and thus the spectrum of harmonic content. It should be noted that the tests in establishing the operating characteristics can only be carried out with sinusoidal quantities. When testing units provided with transductors (saturable reactors), the performance of the test with sinusoidal quantities might be not conformed to. In this case, an agreement on the test modalities shall be reached between the supplier and the purchaser before signing of the contract.

Guaranteed temperature rise values are relevant for a specific loading condition as defined by agreement between purchaser and manufacturer. As a converter transformer is exposed to a current with a certain harmonic content, the actual losses will deviate from the losses developed with a true sinusoidal current. In general, harmonics in the current will give rise to an enhancement in load losses as compared to operation with true sinusoidal current.

In general, the applied voltage in converter operation has a negligible deviation from a true sinusoidal voltage. Thus the no-load loss in normal operation is sufficiently defined by the rated voltage.

The actual load loss in converter operation is estimated with sufficient accuracy by the calculation procedure presented in IEC 61378-1:1997, 5.1 and in IEC 61378-2. From this set of formulae the corresponding test current for establishing the corresponding temperature rise can be deduced (see IEC 61378-1:1997, 6.4 or IEC 61378-2:2001, 10.5).

It should also be noted that the actual load current in operation may be higher than the rated current, when measured by an instrument reading r.m.s. values of current, since the rated current on the nameplate refers to the fundamental component of the load current.

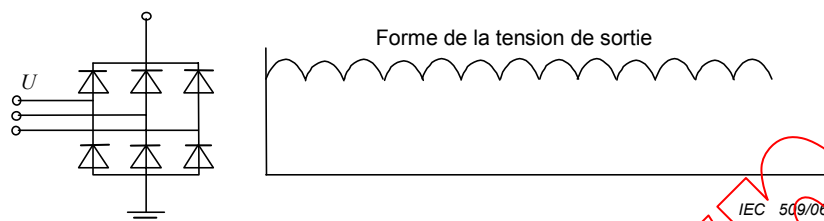
6 Winding configurations

6.1 General

This clause describes the different versions of arrangement of windings that can exist in both industrial and HVDC applications.

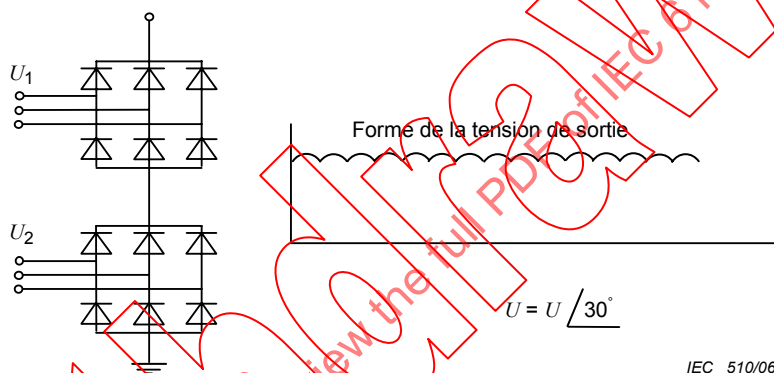
In general, the windings will be arranged to provide a six-pulse converter bridge from a balanced three-phase system. The converter will carry current twice from each phase for a maximum duration of 120 electrical degrees or one third of a cycle, once in positive and once in negative direction. See Figure 1.

Deux ponts hexaphasés ou plus peuvent être montés en série ou en parallèle. Lorsque chaque pont est alimenté du côté ligne par des tensions triphasées décalées dans le temps, on réduit le résidu harmonique des courants du côté ligne d'une part et des tensions et des courants du côté valve d'autre part. Si deux ponts hexaphasés sont connectés dans ce que l'on appelle un montage dodécaphasé, les deux alimentations triphasées doivent être séparées de 30 degrés électriques. Des indices de pulsation encore plus élevés sur les convertisseurs nécessitent moins de séparation entre les systèmes. Voir les Figures 2 et 3 .



NOTE Le symbole du redresseur signifie un type à diode ou à thyristor.

Figure 1 – Montage de pont hexaphasé



NOTE Le symbole du redresseur signifie un type à diode ou à thyristor.

Figure 2 – Montage de pont dodécaphasé

NOTE Un indice de pulsation élevé réduit le résidu harmonique des tensions et des courants.

Un montage commun qui permet d'obtenir deux systèmes triphasés ayant une séparation de 30 degrés électriques consiste à utiliser deux transformateurs reliés à un bus commun du côté ligne. L'un des transformateurs a le même couplage d'enroulement du côté ligne et du côté valve, étoile-étoile ou delta-delta. L'autre transformateur a un couplage étoile-delta ou delta-étoile.

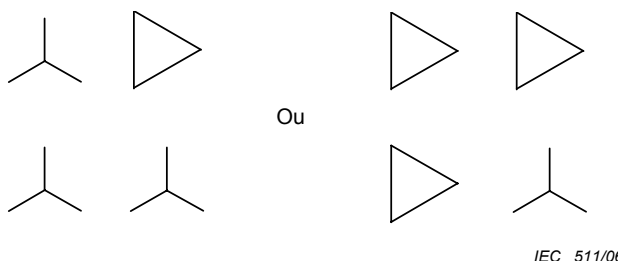
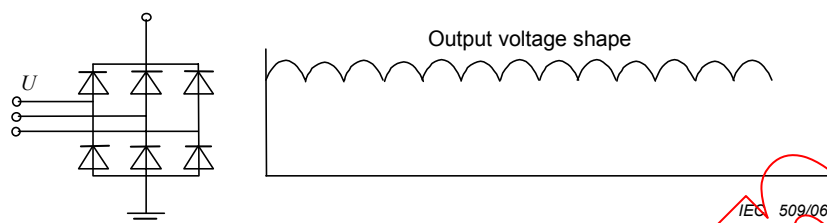


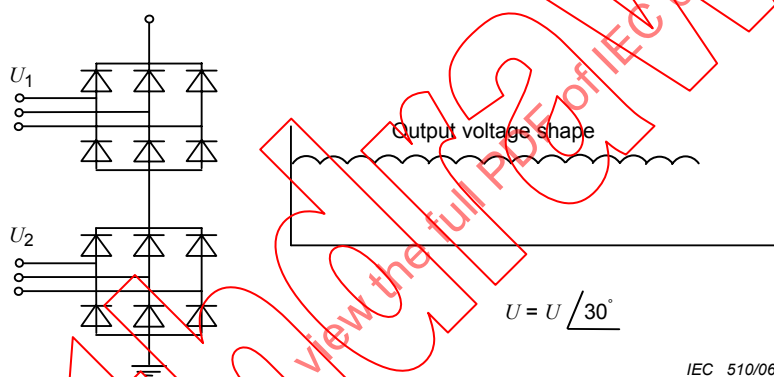
Figure 3 – Couplages de transformateur en étoile-delta et étoile-étoile ou en remplacement en delta-delta et delta-étoile pour donner une séparation de 30 degrés électriques entre les tensions du côté valve

Two or more six-pulse bridges may be connected in series or parallel. When supplying the individual bridges with line-side, three-phase voltages displaced in time, the harmonic content in line-side currents and valve-side voltages and currents will be reduced. With two six-pulse bridges connected in a so-called twelve-pulse arrangement, the two three-phase supplies shall be separated by 30 electrical degrees. Still higher pulse numbers on the converters require less separation between the systems. See Figures 2 and 3.



NOTE The symbol of rectifier means either diode or thyristor.

Figure 1 – Bridge connection for six-pulse arrangement



NOTE The symbol of rectifier means either diode or thyristor.

Figure 2 – Bridge connection for twelve-pulse arrangement

NOTE Increased pulse number reduces the harmonic content in voltage and currents.

A common arrangement to reach two three-phase systems with a 30-electrical-degree separation is two transformers connected to a common bus on the line side. One transformer has the same winding connection on the line and valve sides, star-star or delta-delta. The other transformer has the connection star-delta or delta-star.

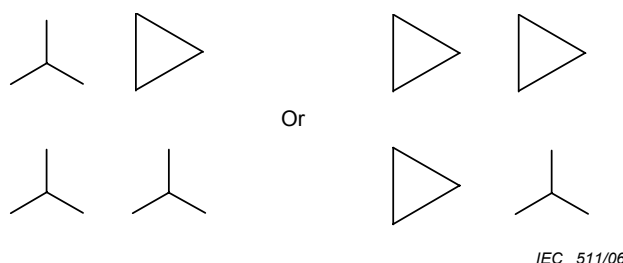


Figure 3 – Transformer connections star-delta and star-star or alternatively, delta-delta and delta-star to give a 30 electrical degree separation between the valve-side voltages

Deux transformateurs identiques ayant un couplage d'enroulement réalisant un décalage de 15 degrés électriques entre les tensions du côté ligne et du côté valve peuvent être utilisés pour donner un décalage de 30 degrés entre les deux tensions du côté valve. Un transformateur est monté pour une rotation positive (A-R, B-S et C-T) et l'autre pour une rotation négative (A-S, B-R et C-T). Cette disposition donnera +15 et –15 degrés électriques du côté valve par rapport au côté ligne.

Il est préférable d'obtenir un décalage de 15 degrés électriques en utilisant l'un des deux enroulements couplés en zigzag ou en delta étendu. Voir la Figure 4.

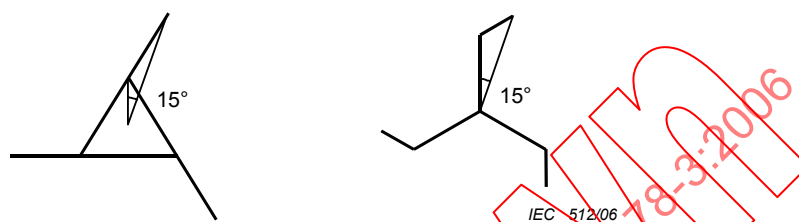


Figure 4 – Décalage de phase de 15° réalisé de préférence par couplage en zigzag ou en delta étendu

NOTE Les deux couplages peuvent également être utilisés pour d'autres déplacements angulaires comme par exemple 7,5 degrés électriques pour des ponts d'indice de pulsation vingt-quatre.

6.2 Applications industrielles

6.2.1 Redresseur

En général, les transformateurs de conversion pour application industrielle seront conçus pour une valeur de courant relativement élevée du côté valve. En conséquence, les enroulements de valve doivent avoir des couplages simples, tels qu'étoile ou delta.

Le transformateur de conversion à pont hexaphasé est un appareil triphasé dont les enroulements de valve sont couplés en étoile ou en delta.

Des réactions dodécaphasées peuvent être obtenues en utilisant deux appareils d'indice de pulsation six avec différents groupes de couplage ou en utilisant un transformateur à deux enroulements de valve, couplé en étoile et en delta. Cette dernière solution nécessite un circuit magnétique triphasé normal.

Des cas plus complexes exigent un montage différent, en étoile et en delta, du côté primaire et des enroulements de valve en étoile ou en delta. Ces montages particuliers peuvent également exiger une conception spéciale du circuit magnétique.

Des installations de conversion d'indice de pulsation supérieur à douze nécessitent différents angles de décalage parmi les divers appareils. Ceci est obtenu en utilisant des couplages en zigzag ou en delta étendu du côté primaire des divers transformateurs.

Le montage physique du transformateur est de préférence réalisé en utilisant l'enroulement de valve comme étant l'enroulement extérieur pour pouvoir placer les sorties du côté valve et ainsi simplifier le montage. Le montage avec sortie du côté valve dépend de la structure du convertisseur.

Si le convertisseur nécessite la présence de transducteurs, ces derniers sont généralement placés dans la même cuve que le transformateur et dans ce cas, il est nécessaire de prévoir deux sorties de conducteur par phase. Les bobines d'inductance auto-saturées, lorsqu'elles sont utilisées, sont connectées selon la Figure 5.

Two identical transformers with a winding connection making a 15 electrical degrees shift between line-side and valve-side voltages can be used to provide a 30 degree shift between the two valve-side voltages. One transformer is connected for positive rotation (A-R, B-S and C-T) and the other with negative rotation (A-S, B-R and C-T). This arrangement will give +15 and –15 electrical degrees on the valve side as compared to the line side.

A 15 electrical degree shift can preferably be reached by one of the two windings connected in zigzag or as an extended delta. See Figure 4.

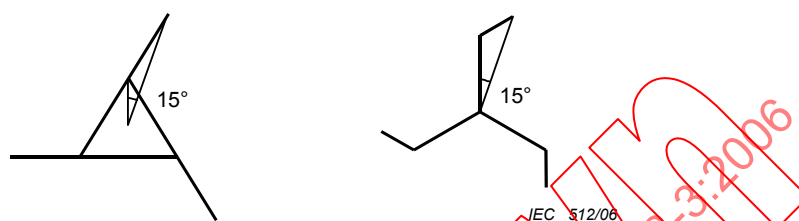


Figure 4 – 15° phase shifting is preferably realized by extended delta or zigzag connection

NOTE The two connections can also be used for other shifting angles such as 7.5 electrical degrees for twenty-four-pulse bridges.

6.2 Industrial applications

6.2.1 Rectifier

In general, converter transformers for industrial application will be designed for a fairly high current on the valve side. The valve windings shall therefore have simple connections such as star or delta.

The transformer for a six-pulse bridge converter is a three phase unit with the valve windings connected in star or delta.

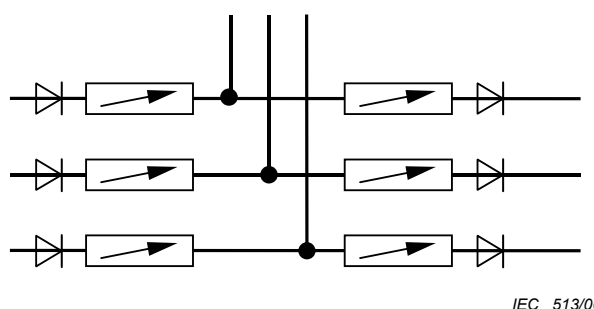
Twelve-pulse reactions can be obtained by using two six-pulse units with different connection groups or by using a transformer with two valve windings, connected in star and delta. This last solution requires a normal three phase core.

More complex cases require a different arrangement with star and delta on the primary side and valve windings connected in star or delta. These particular arrangements may also require a special design core.

Converter plants with more than twelve-pulses require the use of different shifting angles among the various units. This is obtained by using a zigzag or extended delta connection on the primary side of the various transformers.

The physical arrangement of the transformer is preferably done with the valve winding as the outer winding to cater for the simple arrangement of the valve-side exits. The valve-side exit arrangement depends upon the converter structure.

If the converter requires the presence of transducers, they are generally located in the same tank of the transformer and in this case, it is necessary to provide two lead exits by phase. Saturated reactors, if used, are connected according to Figure 5.



Indique une bobine d'inductance auto-saturée

NOTE Le symbole du redresseur signifie un type à diode ou à thyristor.

Figure 5 – Montage de bobines d'inductance auto-saturées

Les principales difficultés techniques qui résultent de cette solution, en termes de disposition globale des enroulements, sont liées à la réalisation du couplage à l'intérieur de la cuve du transformateur. Il est difficile de contrôler les conséquences de la valeur élevée de courant liée à la géométrie comme l'échauffement dû au magnétisme et aux valeurs d'impédance.

6.2.2 Régulation de la tension

En général, une régulation de la tension est nécessaire entre l'alimentation et les tensions de la valve; la plage de régulation est souvent suffisamment large, de quelques pour-cent jusqu'à et au-delà de la tension de plaque. Une gamme de prises large permet de réduire la consommation de puissance réactive ainsi que la pollution due aux harmoniques, liées au fonctionnement en conversion. Pour des raisons pratiques, une plage de conversion importante nécessite souvent un transformateur de régulation séparé entre la borne en courant alternatif et le transformateur de conversion.

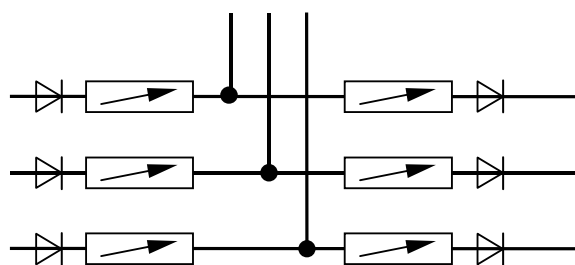
Selon la tension de ligne, l'appareil de régulation peut être construit soit comme un auto-transformateur soit avec deux enroulements séparés afin de réduire les risques d'introduction de transitoires élevés dans le transformateur de conversion.

6.2.3 Conception de l'autotransformateur

Divers types de couplage communs sont illustrés dans les Figures 6 à 10.

6.2.3.1 Couplage en étoile – phases ouvertes

Le schéma de l'enroulement correspondant est illustré à la Figure 6.



IEC 513/06



Indicates a self saturated reactor

NOTE The symbol of rectifier means either diode or thyristor

Figure 5 – Connection of self-saturated reactors

The main technical difficulties derived from this solution for the global arrangement of the windings are linked to the realization of the connection inside the transformer tank. It is difficult to control the consequences of the high value of current connected to geometry such as heating due to magnetism and the impedance values.

6.2.2 Voltage regulation

In general, there is a need for voltage regulation between the supply and valve voltages and often the regulation range is fairly large from a few percent up to and above the nameplate voltage. The purpose of the wide tapping range is to reduce the consumption of reactive power and harmonic pollution related to converter operation. For practical reasons, the large regulating range often requires a separate regulating transformer between the a.c. terminal and the converter transformer.

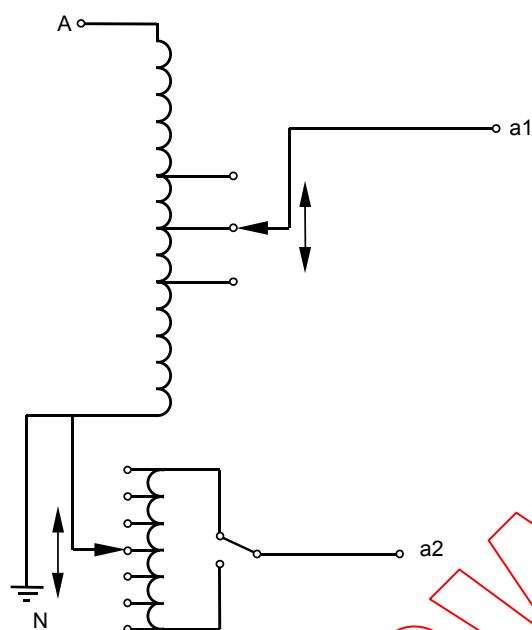
Depending on the line voltage, the regulating unit can be built either as an autotransformer or with two separate windings to reduce the risks from high transients entering the converter transformer.

6.2.3 Autotransformer design

Various common connections are shown in Figures 6 to 10.

6.2.3.1 Star connection – open phases

The schematic constitution of the winding is shown in Figure 6.



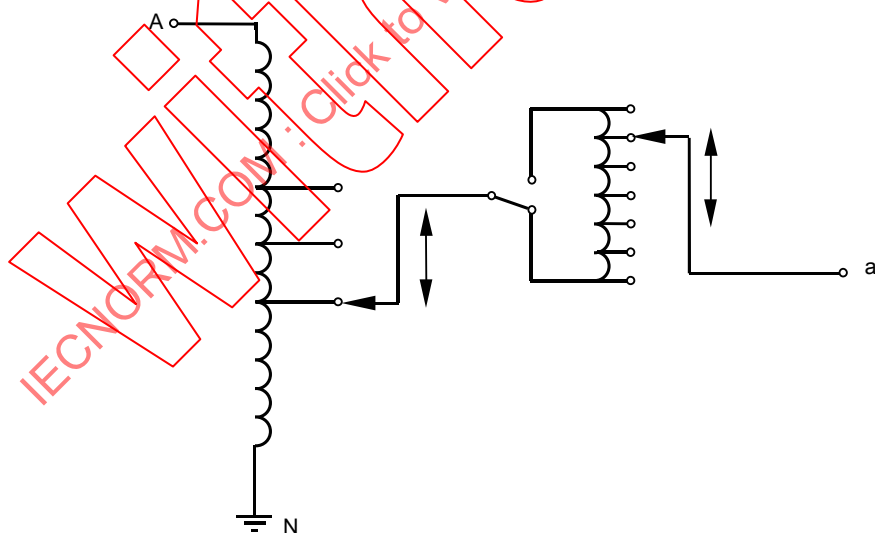
IEC 514/06

Légende

A – Ligne N – Neutre de la ligne a1 – Transformateur de conversion a2 – Transformateur de conversion

Figure 6 – Concept d'autotransformateur pour phases ouvertes

6.2.3.2 Couplage en étoile – phases fermées

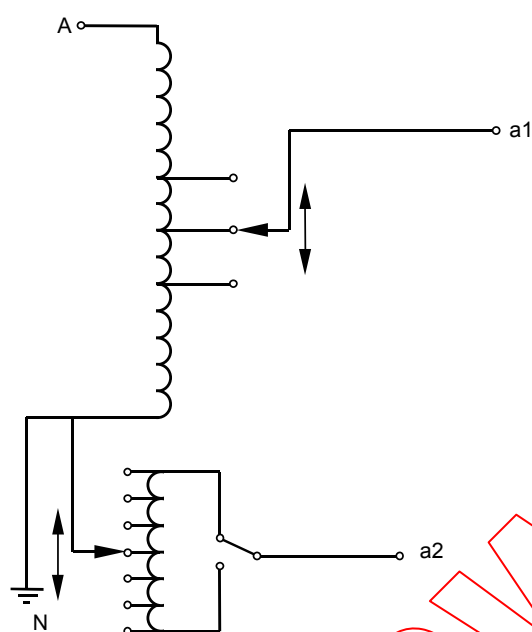


IEC 515/06

Légende

A – Ligne N – Neutre de la ligne a – Transformateur de conversion

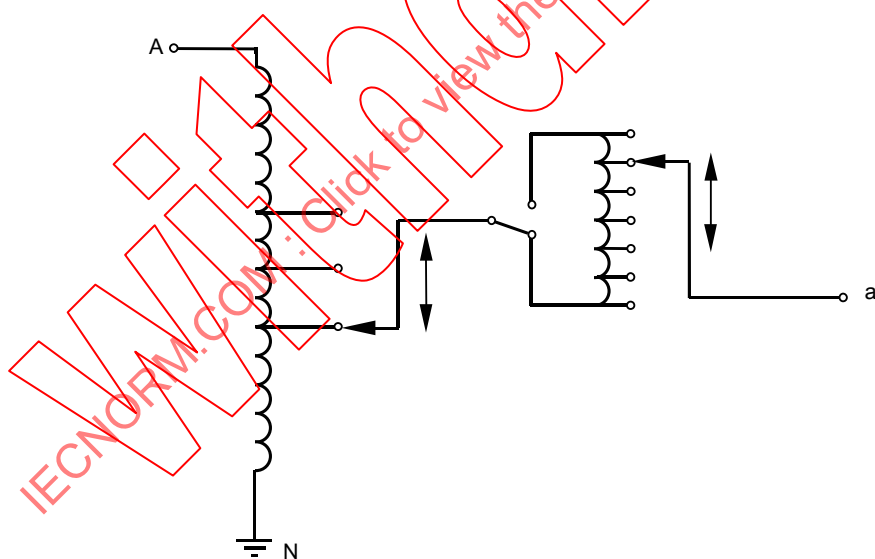
Figure 7 – Concept d'autotransformateur classique pour phases fermées, avec régulation grossière et fine pour de petits échelons de régulation



IEC 514/06

Key

A – Line N – Line neutral a1 – Converter transformer a2 – Converter transformer

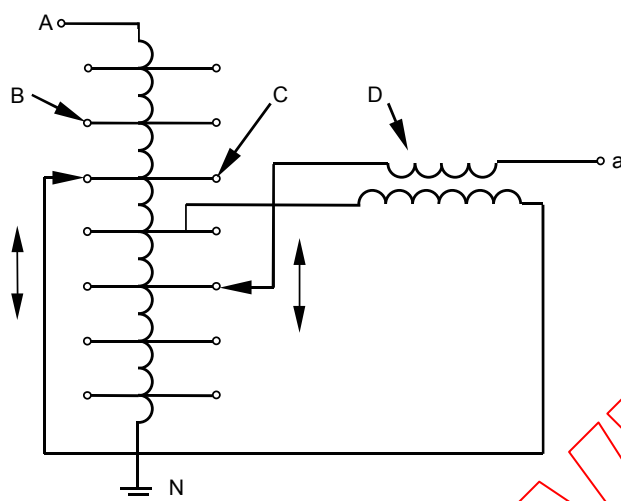
Figure 6 – Autotransformer concept for open phases**6.2.3.2 Star connection – closed phases**

IEC 515/06

Key

A – Line N – Line neutral a – Converter transformer

Figure 7 – Conventional autotransformer concept for closed phases with coarse and fine regulation for small regulating steps

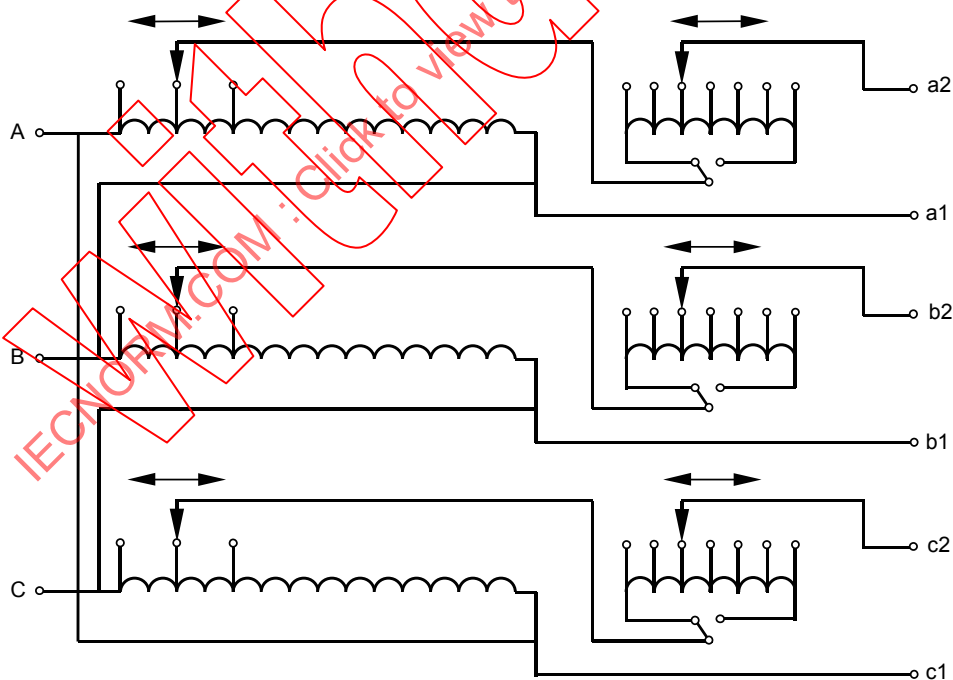


Légende

A – Ligne	a – Transformateur de conversion	B – Réglage fin
D – Survolteur	N – Neutre de la ligne	C – Réglage grossier

Figure 8 – Dispositif survolteur pour concept d'autotransformateur pour phases fermées, avec réglage grossier et fin pour de petits échelons de régulation

6.2.3.3 Couplage delta

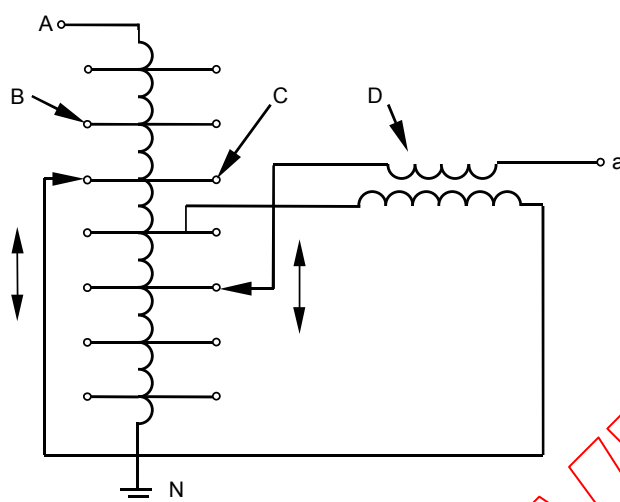


IEC 517/06

Légende

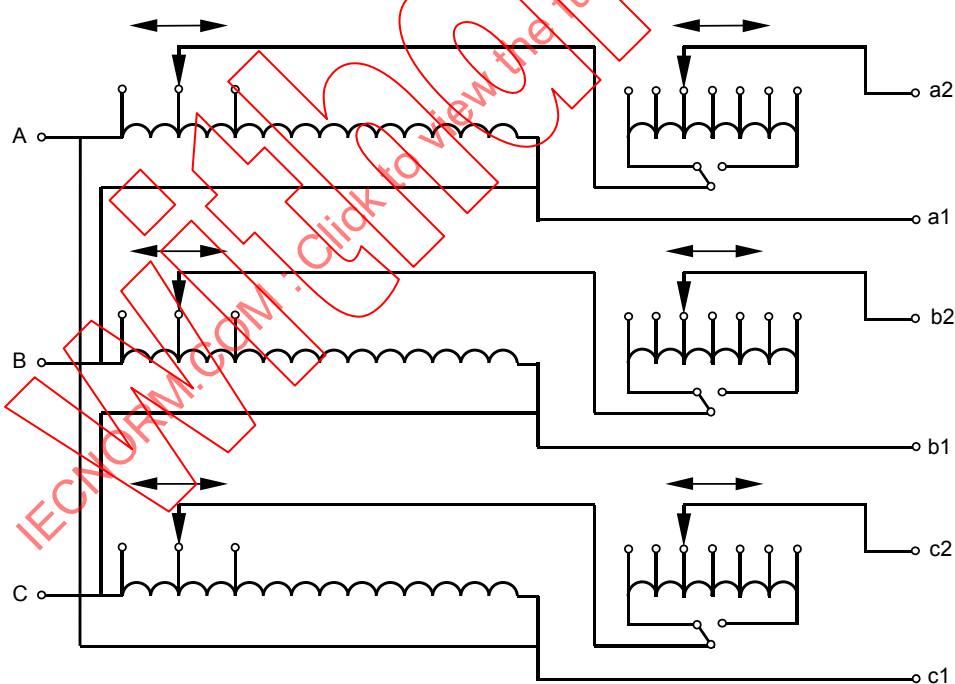
A – Ligne	a1 – Transformateur de conversion	a2 – Transformateur de conversion
B – Ligne	b1 – Transformateur de conversion	b2 – Transformateur de conversion
C – Ligne	c1 – Transformateur de conversion	c2 – Transformateur de conversion

Figure 9 – Couplage en delta avec enroulements à prise

**Key**

A – Line a – Converter transformer B – Fine tapings
D – Booster N – Line neutral C – Coarse tapings

Figure 8 – Booster arrangement for autotransformer concept for closed phases with coarse and fine regulation for small regulating steps

6.2.3.3 Delta connection

IEC 517/06

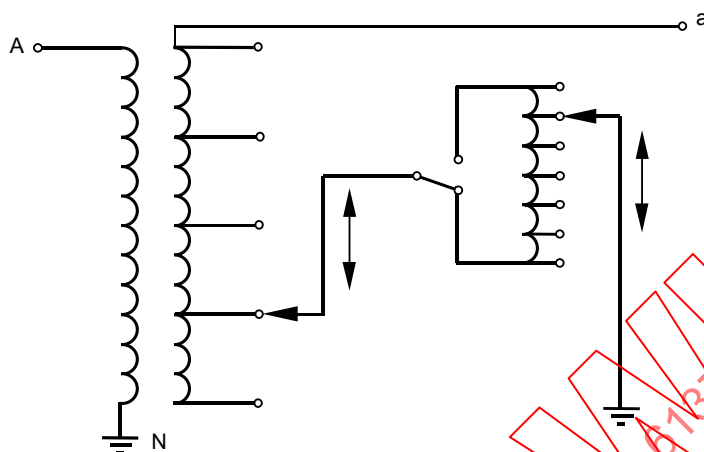
Key

A – Line a1 – Converter transformer a2 – Converter transformer
B – Line b1 – Converter transformer b2 – Converter transformer
C – Line c1 – Converter transformer c2 – Converter transformer

Figure 9 – Delta connection with tapped windings

6.2.3.4 Conception à deux enroulements

En général, la régulation est réalisée du côté BT.



Légende

A – Ligne a – Transformateur de conversion N – Neutre de la ligne

Figure 10 – Conception à deux enroulements avec enroulement à prise

6.3 Applications CCHT

6.3.1 Différents types de montages de transformateurs

En général, les systèmes de transport CCHT sont construits pour des puissances assignées significatives avec connexions à des réseaux haute tension alternative. Afin de réduire les harmoniques présents dans les réseaux de courant alternatif et de courant continu, on utilise en général des ponts dodécaphasés. La plupart du temps, les enroulements des transformateurs sont couplés en étoile du côté ligne pour tirer profit des exigences d'isolation non uniforme et d'une régulation de la tension proche de la terre. Les besoins du réseau ainsi que le fonctionnement efficace du convertisseur nécessitent souvent des régulations de tension larges pour s'inscrire dans une plage allant jusqu'à environ 40 % de la tension de plaque.

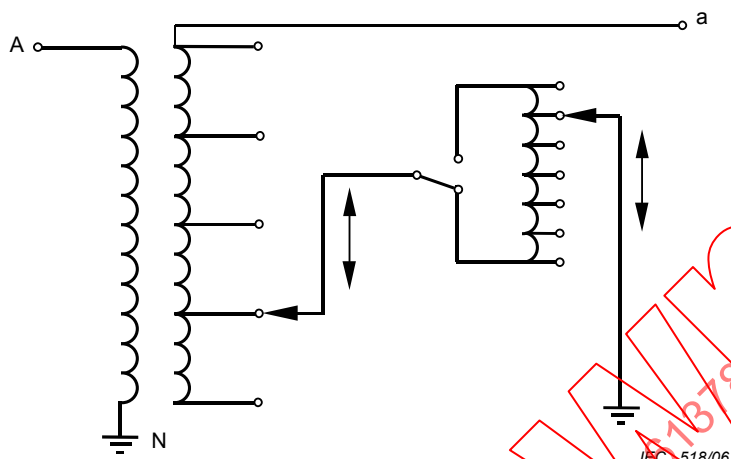
Selon la puissance assignée, les tensions et les contraintes physiques, les transformateurs de conversion peuvent être des appareils monophasés ou triphasés.

Les solutions suivantes sont possibles pour réaliser des transformateurs CCHT avec ponts dodécaphasés.

- a) Transformateurs hexaphasés à deux enroulements.
 - Trois couplés en étoile/delta.
 - Trois couplés en étoile/étoile.
- b) Trois monophasés à trois enroulements.
 - Tous connectés en étoile/delta – étoile.
- c) Deux transformateurs triphasés.
 - Un couplé en étoile/delta.
 - Un couplé en étoile/étoile.
- d) Un transformateur à trois enroulements.
 - Couplé en étoile/delta – étoile.

6.2.3.4 Two winding design

In general, the regulation is realized on the LV side.



Key

A – Line

a – Converter transformer

N – Line neutral

Figure 10 – Two winding design with tapped winding

6.3 HVDC applications

6.3.1 Different types of transformer arrangement

In general, HVDC transmissions are built for substantial power ratings with connections to high voltage a.c. systems. In order to reduce the harmonics in the a.c. and d.c. systems the bridges are usually built for twelve-pulse arrangements. Most often the transformers have the windings star-connected on the line side to take advantage of non-uniform insulation requirements and a voltage regulation close to earth. System needs and efficient operation of the converter often require fairly large voltage regulations to be in the range of up to about 40 % of nameplate voltage.

Depending on power rating, voltages and physical constraints, the converter transformers can be built as single phase or three-phase units.

The following solutions are possible to realize HVDC transformers with twelve-pulse bridges.

- a) Six single-phase, two-winding transformers.
 - Three connected in star/delta.
 - Three connected in star/star.
- b) Three single-phase, three-winding transformers.
 - All connected star/delta-star.
- c) Two three-phase transformers.
 - One connected star/delta.
 - One connected star/star.
- d) One three-winding transformer.
 - Connected star/delta-star.

En général, un transformateur de conversion utilise deux ou trois enroulements principaux. Un enroulement tertiaire n'est exigé que dans des cas spécifiques comme par exemple l'injection d'une tension d'essai ou la connexion à un dispositif de filtrage particulier.

6.3.2 Dispositions d'enroulement

6.3.2.1 Généralités

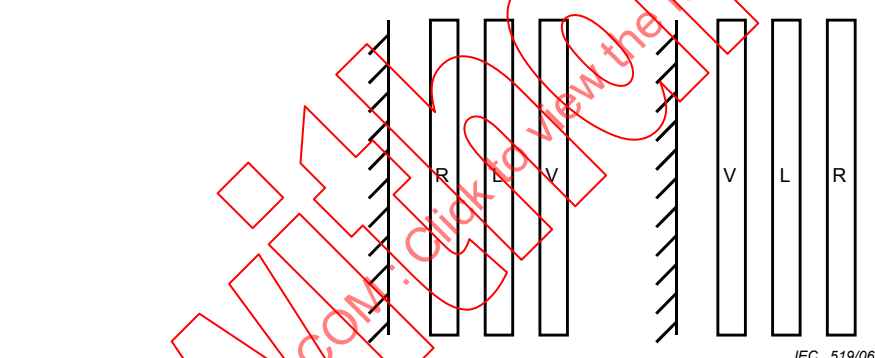
Dans les transformateurs du type à noyau, les enroulements sont de forme cylindrique et disposés de manière concentrique autour de la colonne du noyau. En général, la partie munie de prise du côté ligne constitue son propre enroulement, physiquement séparé: l'enroulement de réglage. Les différents enroulements sont quasiment de hauteur égale et disposent également d'une répartition ampère-tour égale sur l'enroulement.

En général, l'enroulement de réglage est physiquement placé à côté de la partie principale de l'enroulement de ligne, mais non entre les enroulements de valve et de ligne (voir l'Article 7 «prises de réglage et impédances» et l'Article 9 «pertes»).

S'il est installé, l'enroulement tertiaire est en général placé à proximité du noyau.

6.3.2.2 Deux enroulements

Il y a généralement deux manières de disposer les enroulements individuels d'un transformateur à deux enroulements, comme indiqué sur la Figure 11. Les enroulements principal et de réglage constituent l'enroulement du côté ligne. L'enroulement du côté valve est constitué d'un seul enroulement.



Légende

R – Enroulement de réglage (à prise) L – Enroulement principal (ligne) V – Enroulement de valve

Figure 11 – Deux dispositions de base des enroulements d'un transformateur à deux enroulements

Tableau 1 – Disposition des deux enroulements

Position relative de l'enroulement	Avantages	Inconvénients
Réglage – ligne – valve	Sorties de connecteur c.c. faciles à disposer Réglage du côté neutre	Réalisation mécanique des sorties de conducteurs pour l'enroulement de réglage Sorties de connexion c.a. Solution limitée pour l'enroulement de réglage
Valve – ligne – réglage	Sorties de connecteur c.a. faciles à disposer Sorties de conducteurs de réglage faciles à réaliser Réglage du côté neutre	Sorties de connecteur c.c. plus délicates à réaliser

A converter transformer is generally built with two or three main windings. A tertiary winding is required only in some specific cases, e.g. injection of test voltage, connection to special filter arrangements.

6.3.2 Winding arrangements

6.3.2.1 General

In core type transformers, the windings are cylinder shaped and arranged concentrically around the core limb. The tapped part of the line-side winding generally forms its own physically separated winding, the regulating winding. The individual windings are almost close to equal height and have equal ampere-turn distribution along the winding height.

In general, the regulating winding is located physically close to the main part of the line winding but not in between valve and the line windings (see Clause 7 for tapping and impedances and Clause 9 for losses).

A tertiary winding, if installed, is generally located closest to the core.

6.3.2.2 Two windings

In general, there are two ways to arrange the individual windings in a two-winding transformer as indicated in Figure 11. The main and regulating windings form the line-side winding. The valve-side winding consists of one single winding.

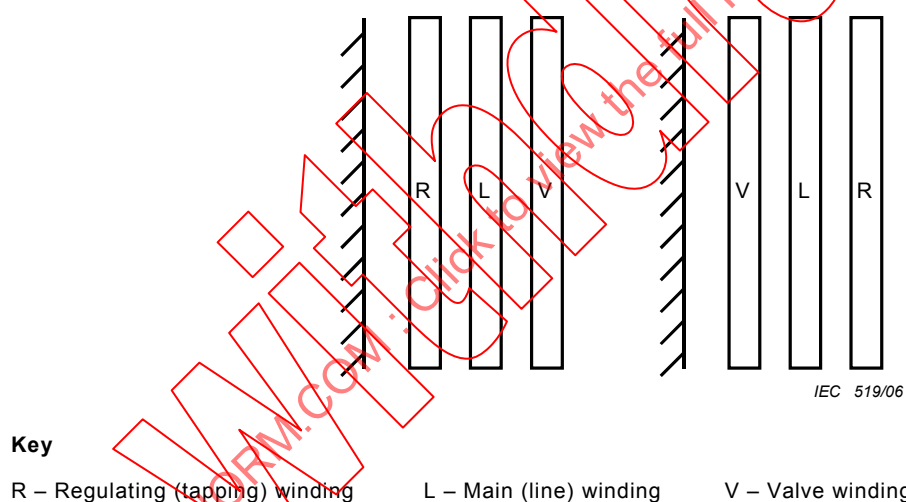


Figure 11 – Two basic arrangements of the individual windings of a two-winding transformer

Table 1 – Arrangements of two windings

Relative winding position	Advantages	Disadvantages
Regulating – line – valve	DC lead exits easy to arrange Regulation by the neutral side	Mechanical realization of lead exits for regulation winding AC lead exits Limited solution for regulation winding
Valve – line – regulating	AC lead exits easy to arrange Regulation lead exits easy to arrange Regulation by the neutral side	DC lead exits more delicate to realize

6.3.2.4 Trois enroulements

La solution principale est détaillée ci-après.

Pour les conceptions de transformateurs monophasés, il existe généralement deux colonnes d'enroulement, une pour le couplage en étoile/delta et la seconde pour le couplage étoile/étoile. Ce qui signifie que le nombre de spires de l'enroulement de valve à couplage delta est égal à $\sqrt{3}$ fois le nombre de spires de l'enroulement à couplage en étoile, mais avec un courant de charge qui est égal à $1/\sqrt{3}$ du courant de charge de l'enroulement à couplage en étoile.

Les positions relatives de chaque carcasse d'enroulement sont les mêmes que les positions correspondantes sur un transformateur à deux enroulements (voir le Tableau 1).

Lorsque la taille physique le permet, pour des puissances assignées et des tensions de ligne limitées, par exemple un convertisseur en opposition de moyenne taille, il est admis que le transformateur soit un transformateur triphasé à trois enroulements. Les exigences relatives à la proximité des valeurs d'impédances entre la borne du côté ligne et les deux bornes de valve nécessitent souvent une conception à deux enroulements, en position axiale sur la même colonne, appelée «à enroulements séparés». Les deux enroulements du côté ligne ainsi que leurs enroulements de réglage sont couplés en parallèle, et l'un des deux enroulements de valve est couplé en delta et l'autre en étoile. La position relative de chaque enroulement, physiquement séparé, doit être telle qu'illustrée à la Figure 11.

Des configurations dans lesquelles les deux enroulements du côté valve occupent chacun deux positions concentriques, souvent sur des côtés opposés de l'enroulement de ligne, ne sont généralement pas une solution viable. Pour un transformateur avec chute de tension, il sera difficile d'obtenir la même impédance aux deux enroulements du côté valve, pour toutes les positions de prise.

6.3.3 Prise en compte de l'impédance – impédance mutuelle

6.3.3.1 Généralités

Le modèle d'impédance entre une borne de ligne et deux bornes de valve, peut être représenté par trois impédances réunies ensemble en un seul et même point avec deux branches dirigées vers les deux bornes de valve et une branche dirigée vers la borne de ligne; c'est ce que l'on appelle l'impédance mutuelle commune.

En général, l'impédance mutuelle commune doit être aussi faible que possible pour éviter les interactions entre tensions lors des commutations.

Pour les transformateurs à deux enroulements, l'impédance mutuelle commune due au transformateur est inexistante; cet apport à l'impédance mutuelle ne peut être réalisé qu'à partir du bus commun. L'impédance mutuelle de transformateurs à trois enroulements, dont les deux enroulements de valve sont placés sur des colonnes différentes, sera égale à zéro. De la même manière, des transformateurs à trois enroulements utilisant des enroulements séparés, auront une impédance mutuelle commune faible.

6.3.2.3 Three windings

The main solution is as follows.

In single-phase transformer designs, there are generally two wound limbs, one for star/delta and the second one for star/star connections. This means that the valve winding for a delta connection has $\sqrt{3}$ times the number of turns for the star-connected winding but a load current of $1/\sqrt{3}$ of the current in the star-connected winding.

The relative positions of the individual winding shells are the same as the positions for a two-winding transformer (see Table 1).

When the physical size permits for limited power ratings and line voltages, e.g. a medium size back-to-back converter, the transformer may be built as a three-phase, three-winding transformer. Requirements for the impedances to be similar between the line-side terminal and the two valve terminals often require a design with two winding arrangements located axially on the same limb – a so called axial split. The two line-side windings with their regulating windings are connected in parallel and one of the valve windings is connected for delta and the other for star. The relative position of the individual physically separated windings shall be in accordance with Figure 11.

Arrangements where the two valve-side windings each occupy two concentric positions, often on opposite sides of the line winding, are generally not a viable alternative. For a transformer with voltage regulation, it will be difficult to reach the same impedance to the two valve-side windings for all tap positions.

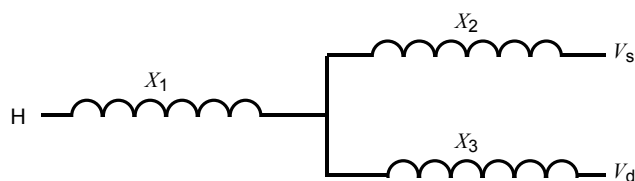
6.3.3 Consideration of impedance – mutual impedance

6.3.3.1 General

The impedance pattern between one line and two valve terminals can be visualized by three impedances connected together in one and the same point with two branches towards the two valve terminals and one towards the line terminal, also called the common mutual impedance.

In general, the common mutual impedance shall be as low as possible to avoid interaction between the voltages during commutations.

In two-winding transformers, the common mutual impedance by the transformer is non-existent; contribution to the mutual impedance can only be achieved from the common bus. Three-winding transformers where the two valve windings are located on different limbs will also have zero mutual impedance. Three-winding transformers using an axial split will also exhibit a low common mutual impedance.



IEC 520/06

Légende

$X_1 + X_2 = X_1 + X_3$ = Impédance du transformateur

X_1 idéalement égale à zéro, mais toujours bien inférieure à X_2 et X_3

Les indices 's' et 'd' indiquent respectivement, étoile et delta.

Figure 12 – Impédance mutuelle

7 Prises de réglage et impédances – Applications CCHT

7.1 Valeur de l'impédance

L'impédance sélectionnée résulte des effets d'un certain nombre d'exigences. Bien qu'elle réduise les niveaux de courant harmonique, une impédance élevée augmente la réactance de commutation et par conséquent l'absorption d'énergie réactive du convertisseur, ce qui entraîne des coûts plus accrus pour l'ensemble circuit de filtrage et valve.

Une impédance faible affecte la tenue au court-circuit et augmente la taille et le poids du transformateur avec les effets qui en résultent pour le coût et le transport.

7.2 Variabilité de l'impédance

Il est essentiel que l'impédance réelle et mesurée du transformateur s'inscrive dans des tolérances données par rapport à une valeur spécifiée. Les écarts peuvent être de nature systématique autant qu'aléatoire.

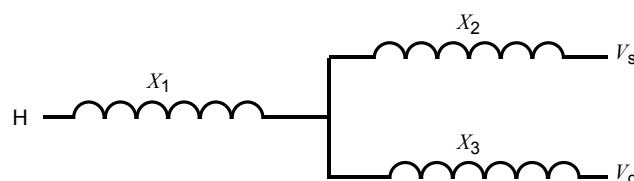
Les écarts systématiques peuvent avoir pour origine des contraintes de conception et de fabrication. Les écarts aléatoires dépendent de variations en termes de fabrication et d'incertitude de mesure. Les variations d'impédance en fonction de la position de la prise peuvent être considérées comme des écarts systématiques dans lesquels le type de configuration de prise – par exemple linéaire ou réversible – influence l'évolution de l'écart.

Les écarts d'impédance admissibles par rapport aux valeurs spécifiées peuvent concerner:

- l'écart par rapport à une valeur d'impédance spécifiée au niveau de la prise principale;
- la variabilité entre phases individuelles;
- la variabilité entre transformateurs;
- la variabilité au sein de la gamme de prises;
- les écarts entre enroulements à couplage étoile et delta.

L'acheteur peut spécifier des limites pour les cinq caractéristiques définies ci-dessus.

Sauf spécification contraire, les règles de tolérance admissible, établies dans la CEI 60076-1 s'appliqueront et seront complétées par les exigences suivantes.



IEC 520/06

Key

$X_1 + X_2 = X_1 + X_3 =$ Transformer impedance

X_1 ideally zero, but always much less than X_2 and X_3

The subscripts 's' and 'd' refers to star and delta respectively.

Figure 12 – Mutual impedance

7 Tappings and impedances – HVDC applications

7.1 Value of impedance

The selected impedance is the result of influences from a number of requirements. Although it reduces harmonic current levels, high impedance increases the commutating reactance leading to increased reactive power absorption of the converter, thus increasing the costs of the filter circuit and valve assembly.

Low impedance has an influence on short-circuit force consideration and increases the size and weight of the transformer with consequential effects on cost and transport.

7.2 Variability of impedance

It is essential that the actual and measured transformer impedance remain within a given deviation from a specified value. Deviations may be of systematic as well as random nature.

Systematic deviations may have their origin in design and manufacturing constraints. Random deviations depend on variations in manufacturing and measurement uncertainty. Impedance variations as a function of tap position can be regarded as systematic deviations where the type of tap arrangement influences the course of deviation, e.g. linear or reversing taps.

Permissible impedance deviations from specified values may concern:

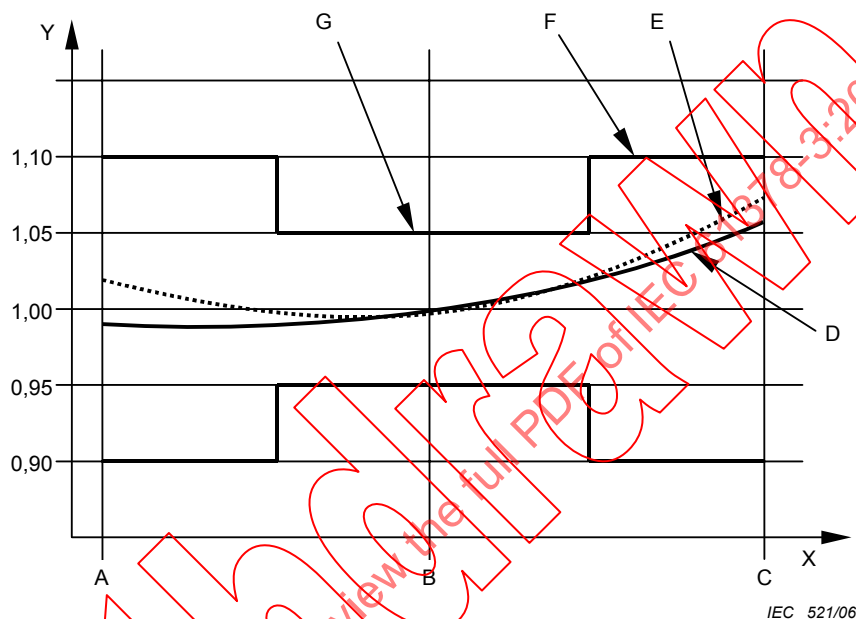
- deviation from a specified impedance value at the principal tap;
- variability between individual phases;
- variability between transformer units;
- variability within the tapping range;
- deviations between star- and delta-connected windings.

The purchaser may specify limits for all five properties.

If not otherwise specified, rules for permissible tolerances laid down in IEC 60076-1 will apply together with the requirements below.

L'écart par rapport à l'impédance spécifiée par l'acheteur ne doit pas dépasser 5 % dans la plage de fonctionnement habituelle du changeur de prise. Hors de cette plage, l'écart peut atteindre 10 % (voir la Figure 13).

Il convient que les variations d'impédance entre phases individuelles, transformateurs et enroulements à couplage en étoile/delta ne dépassent pas 3 % pour la même position de prise. Une légère variabilité de l'impédance est nécessaire pour pouvoir supprimer efficacement les harmoniques dans une configuration à pont dodécaphasé. Les variations importantes entre phases, appareils et enroulements à couplage étoile/delta entraîneront une augmentation du dimensionnement des filtres.



Légende

A – Nombre minimal de spires
B – Nombre normal de spires
C – Nombre maximal de spires

D – Prises linéaires
E – Prises réversibles
F – Bande de tolérance de $\pm 10 \%$

G – Bande de tolérance de $\pm 5 \%$
X – Spires
Y – Impédance de transformateur unitaire

Figure 13 – Modèle d'impédance type

8 Aspects liés à l'isolation et essais diélectriques

8.1 Systèmes d'isolation hybrides

8.1.1 Généralités

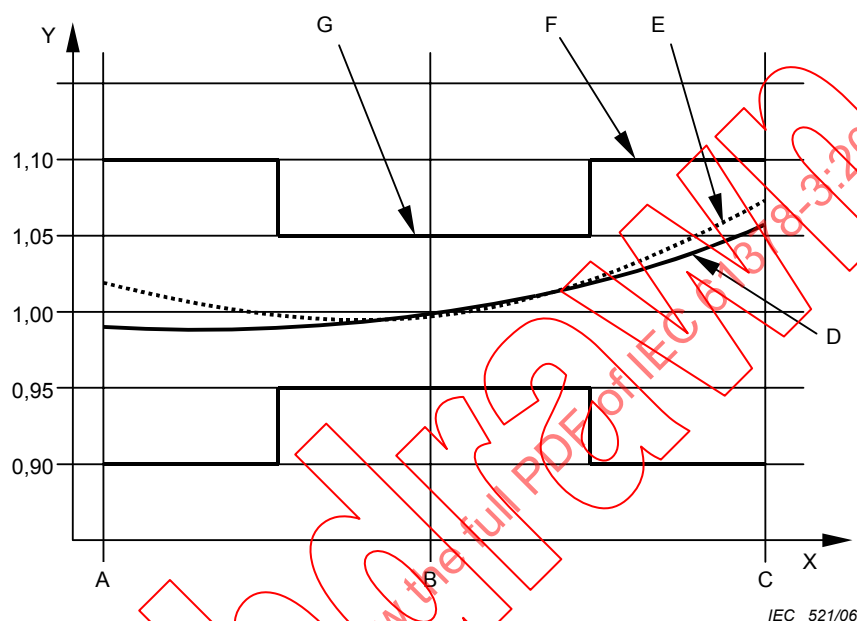
Les systèmes d'isolation hybrides sont principalement utilisés dans les transformateurs de conversion industriels dans la mesure où ils présentent l'avantage de fonctionner à des températures élevées dans de tels transformateurs.

Lorsque le terme «hybride» est utilisé en référence à un système d'isolation, il signifie que des matériaux d'isolation haute température (tels que le papier aramide ou l'émail haute température) sont associés à des matériaux basse température (tels que la cellulose).

Des matériaux isolants sont utilisés pour plusieurs des différents constituants d'un enroulement de transformation: isolants de conducteurs, cales, cylindres, collerettes, etc. (voir la Figure 14).

The deviation from the impedance specified by the purchaser shall not exceed 5 % in the usual operating range of tap-changer. Outside this range, the deviation may go up to 10 % (see Figure 13).

The impedance variations between individual phases, transformer units and star- and delta-connected windings should not exceed 3 % for the same tap position. Efficient cancelling of harmonics in a twelve-pulse bridge connection requires small impedance variability. Large variations between phases, units and star- and delta-connected windings will increase the size of the filters.



Key

A – Minimum turns	D – Linear taps	G – $\pm 5\%$ tolerance band
B – Normal turns	E – Reversing taps	X – Turns
C – Maximum turns	F – $\pm 10\%$ tolerance band	Y – Transformer impedance p.u.

Figure 13 – Typical impedance pattern

8 Insulation aspects and dielectric tests

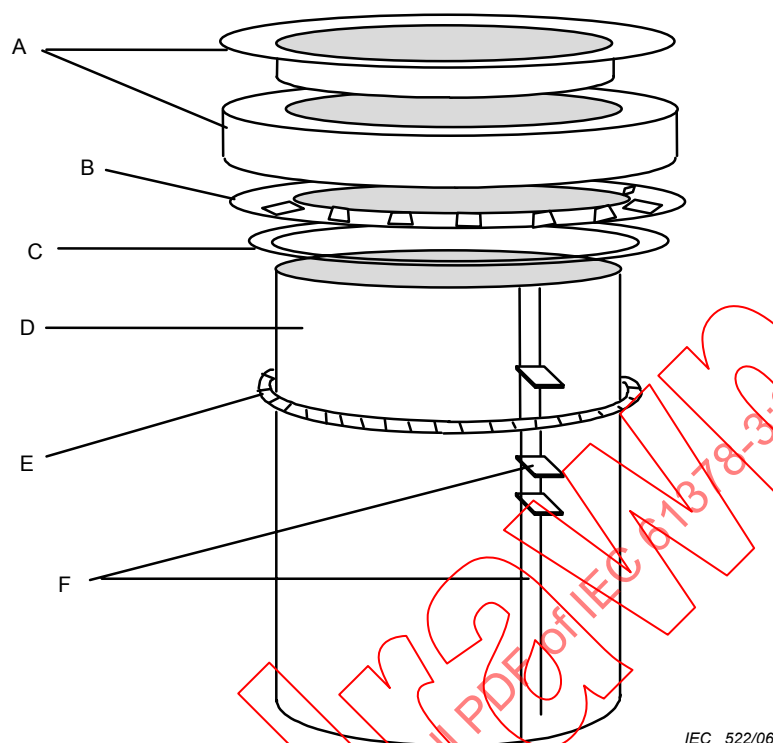
8.1 Hybrid insulation systems

8.1.1 General

Hybrid insulation systems are primarily used in industrial converter transformers since there are advantages of working at elevated temperatures in such transformers.

Whenever the term “hybrid” is used with reference to an insulation system, it means that high-temperature-insulating materials (such as aramide paper or high temperature enamel) are combined with low temperature materials (such as cellulose).

Insulating materials are used in several of the different components that make up a transformer's winding: conductor insulation, spacers, cylinders, angle rings, etc. (see Figure 14).



Légende

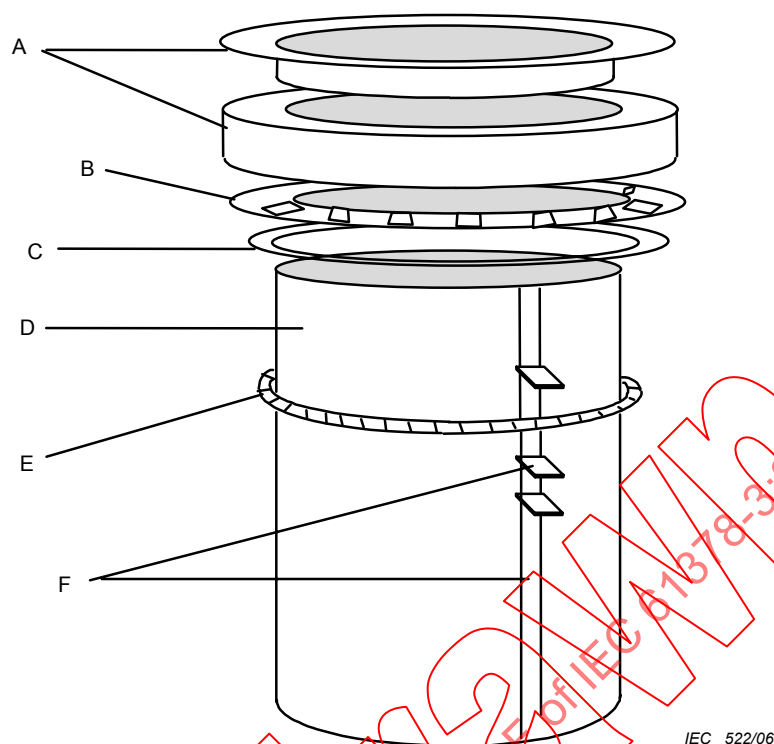
- | | | |
|---|----------------------|-------------------------------|
| A – Collerettes et capots de protection | C – Joints statiques | E – Isolant de conducteur |
| B – Rondelle support | D – Cylindres | F – Cales axiales et radiales |

Figure 14 – Composants d'un système d'isolation d'un transformateur de conversion industriel type

Pendant de nombreuses années, l'isolation hybride a été appliquée aux transformateurs refroidis à l'huile. Des matériaux haute température sont utilisés dans les pièces qui sont en contact direct (isolant de conducteur) ou à proximité (cales) du cuivre, tandis que les autres isolants sont en cellulose. Les enroulements à isolation hybride ont été conçus pour un échauffement moyen supérieur à celui qui est admissible pour la cellulose (sans réduction de la durée de vie du transformateur), ce qui permet ainsi d'augmenter la puissance par unité de volume.

8.1.2 Isolation hybride pour transformateurs de conversion industriels

Lorsqu'un transformateur est utilisé conjointement à un convertisseur, des courants harmoniques sont injectés dans ses enroulements. Les courants harmoniques entraîneront une augmentation des pertes par courants de Foucault des enroulements d'un facteur défini dans la CEI 61378-1 et la CEI 61378-2. Dans un transformateur classique, les pertes par courants de Foucault dépendent des composantes radiales et axiales du flux magnétique de fuite ainsi que des dimensions géométriques du conducteur sous ce flux (voir la CEI 61378-1). Les pertes par courants de Foucault varient sur la hauteur d'enroulement. Elles sont plus faibles à la partie centrale de l'enroulement où le flux de fuite est en grande partie parallèle à l'épaisseur du conducteur et elles augmentent aux extrémités de l'enroulement où le flux de fuite est presque perpendiculaire à la largeur du conducteur. La répartition non uniforme des pertes donne lieu à une répartition non uniforme de la température sur la hauteur de l'enroulement. La différence entre la température de point chaud et la température moyenne de l'enroulement augmente par conséquent au-delà de celle qui est engendrée par le mécanisme de refroidissement normal.



Key

A – Angle rings and caps

C – Static rings

E – Conductor insulation

B – Support washer

D – Cylinders

F – Axial and radial spacers

Figure 14 – Components of a typical industrial converter transformer insulating system

For many years, hybrid insulation was applied for oil-cooled transformers. High temperature materials are utilized in parts in direct contact with the copper (conductor insulation) or close to it (spacers), while all the other insulating components consist of cellulose. Windings with hybrid insulation have been designed with an average temperature rise higher than the one allowable for cellulose (without reduction of the transformer life), thus increasing the power per unit of volume.

8.1.2 Hybrid insulation for industrial converter transformers

Whenever a transformer is used in conjunction with a converter, harmonic currents are injected in its windings. The harmonic currents will increase the eddy losses of the windings by a factor defined in IEC 61378-1 and IEC 61378-2. In a conventional transformer, the eddy losses depend on the radial and axial components of the magnetic leakage flux and on the geometric dimensions of the conductor subjected to this flux (see IEC 61378-1). The eddy losses vary along the winding height. They are lower in the central part of the winding where the leakage flux is mostly parallel to the thickness of the conductor and increase at the ends of the winding where the leakage flux is almost perpendicular to the width of the conductor. This non-uniform distribution of losses results in a non-uniform distribution of the temperature along the winding's height. The difference between the hot spot and average winding temperature is therefore increased beyond that caused by the normal cooling mechanism.

Dans les transformateurs de conversion, lorsqu'on tient compte des courants harmoniques, il risque d'y avoir une augmentation supplémentaire de la différence entre la température de point chaud et la température moyenne de l'enroulement, du fait de l'augmentation correspondante des pertes par courants de Foucault (voir la CEI 60076-8:1997, 9.6).

Un certain nombre de solutions à ce problème sont disponibles. En accord avec l'acheteur, l'adoption de matériaux isolants haute température dans la zone du point chaud constitue une solution lorsqu'il est impossible de réduire la température en un point chaud donné à la température limite de classe 105 admissible.

Dans les transformateurs de puissance, l'isolation hybride permet généralement d'augmenter la température moyenne admissible de l'enroulement et par conséquent les caractéristiques assignées de puissance. Des matériaux d'isolation haute température sont donc utilisés à proximité de tous les conducteurs d'enroulement. Sur les transformateurs de conversion, l'isolation hybride pourrait également être utilisée dans les zones proches de points chauds localisés à température élevée, tout en maintenant dans des limites correctes les échauffements moyens des enroulements. De la même manière, il convient d'utiliser un matériau isolant haute température sur les conducteurs d'enroulement dans les zones de point chaud.

8.2 Essais diélectriques

8.2.1 Généralités

Les essais diélectriques et les aspects liés à l'isolation concernent en premier lieu les transformateurs de conversion CCHT. Les essais diélectriques et les aspects liés à l'isolation, pour les transformateurs de conversion industriels, sont identiques à ceux des transformateurs de puissance classiques et sont traités dans la CEI 60076-3.

Le système d'isolation dans un transformateur de conversion CCHT est exposé aux contraintes dues à la tension appliquée et aux tensions induites. Pour l'enroulement de ligne et ses bornes, les tensions sont de la même nature que celles d'un transformateur conventionnel, c'est-à-dire des tensions alternatives en régime établi, et des tensions transitoires telles que les tensions de choc de foudre et de manœuvre. Outre les tensions présentes dans un transformateur conventionnel, les enroulements de valve et leurs bornes seront également soumis à des tensions continues. Ils devront donc faire face à des contraintes combinées de tension alternative et continue.

La répartition des tensions constamment variables sur le système d'isolation est bien définie par la géométrie et la permittivité des matériaux impliqués. On suppose ci-après que ces matériaux sont principalement l'huile du transformateur et la cellulose. La répartition d'une tension continue en régime établi dans l'isolation huile/cellulose présente des différences significatives par rapport à celle des tensions variables dans le temps (tension de choc et tension alternative). La répartition est principalement régie par des résistivités apparentes. Ces résistivités dépendent dans une large mesure de la mobilité des charges d'espace dans le système d'isolation. En conséquence, la résistivité n'est pas une valeur constante et varie en fonction d'un certain nombre de paramètres, tels que la température, les contraintes électriques, l'humidité, la vitesse du débit d'huile, la durée d'application de la tension, le vieillissement et la structure chimique. Ces phénomènes sont représentés de préférence par un modèle temporel de la charge d'espace.

D'un point de vue pratique, il est conventionnellement accepté de modéliser une structure isolante comme un réseau R-C, afin de déterminer son comportement dans des conditions de courant continu. Lorsqu'une tension continue est initialement appliquée, la répartition de la tension est capacitive, alors que le champ de courant continu final ou en régime établi dans une structure complexe est déterminé par les résistivités relatives des matériaux concernés. Dans la plupart des cas, l'utilisation d'un modèle R-C permet d'obtenir une marge de conception conservatrice est sûre. Les rapports de résistivité entre isolants solides et huile peuvent aller de 10:1 à 500:1 à température ambiante. De manière générale, si la température augmente, le rapport de résistivité peut décroître jusqu'à un ordre de grandeur.

In converter transformers, when harmonic currents are taken into account, the difference between the hot spot and the average winding temperature may further increase because of the corresponding increase in eddy losses (see IEC 60076-8:1997, 9.6).

A number of solutions to this problem are available. In agreement with the purchaser, adoption of high-temperature-insulation materials in the hot spot region is a solution whenever it is not possible to reduce the hot spot temperature to permitted class 105 temperature limits.

In power transformers, hybrid insulation is generally intended to increase the allowable average winding temperature and hence the power rating. Therefore, high temperature insulation material is used near to all the winding conductors. In converter transformers, hybrid insulation could also be used in the areas near to local high hot spot temperatures, while average winding rises remain within limits. It also follows that high-temperature-insulation material should be applied to the winding conductors in the hot spot regions.

8.2 Dielectric tests

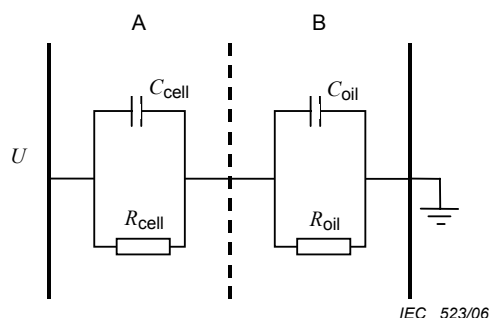
8.2.1 General

Dielectric tests and insulation aspects primarily refer to HVDC converter transformers. The dielectric tests and insulation aspects for industrial converter transformers are identical to those of conventional power transformers and are covered in IEC 60076-3.

The insulation system in a HVDC converter transformer is exposed to the stresses caused by the applied voltage and induced voltages. For the line winding and its terminals, the voltages are of the same nature as for a conventional transformer, that is, steady state a.c. voltages and transitory voltages such as lightning and switching surges. The valve windings and their terminals will in addition to the voltages in a conventional transformer also be subjected to d.c. voltages. This will in turn give rise to a combined a.c. and d.c. stress.

The distribution of all time variable voltages across the insulation system is well defined by the geometry and permittivity of the materials involved. In the following paragraph it is assumed that these materials are mainly transformer oil and cellulose. The distribution of a steady state direct voltage in oil/cellulose insulation deviates significantly from that of time variable voltages (impulse and a.c. voltages). The distribution is mainly governed by apparent resistivities. These resistivities are to a great extent dependent on the mobility of space charges in the insulation system. As a consequence, the resistivity is not a constant value and varies with a number of parameters, such as temperature, electrical stress, moisture, speed of oil flow, duration of voltage application, ageing and chemical structure. These phenomena are better represented by a space-charge time model.

From a practical point of view, it is generally accepted that an insulation structure can be modelled as an R-C network to determine its behaviour under d.c. conditions. When a d.c. voltage is initially applied, the voltage distribution is capacitive, while the final or steady state d.c. field in a complex structure is determined by the relative resistivities of the involved materials. In most cases, the use of an R-C model gives a conservative and safe design margin. Resistivity ratios between solid insulation and oil may range from 10:1 up to 500:1 at room temperature. As the temperature is increased, the resistivity ratios typically decrease up to one order of magnitude.



Légende

A – Cellulose

B – Huile

U – Tension

C – Capacité

R – Résistance

Figure 15 – Système d'isolation, circuit R-C équivalent

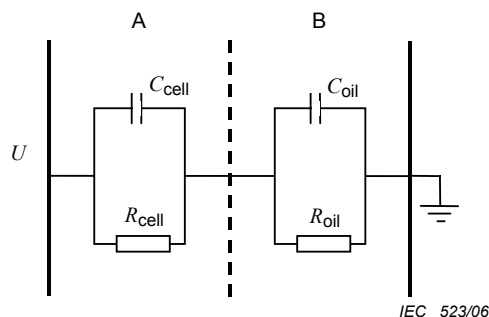
La Figure 15 représente un modèle utilisé pour simuler le système d'isolation. L'interface entre l'huile et la barrière de cellulose est supposée être une surface équipotentielle.

Les contraintes de courant continu et alternatif étant principalement déterminées par des paramètres indépendants, il est possible de supposer que tout champ de tension complexe peut être séparé en composantes alternatives et continues. Les contraintes liées à chaque tension peuvent être calculées séparément, et les deux contraintes peuvent être combinées pour donner une mesure de la contrainte réelle.

La Figure 16 donne une indication des contraintes de tension continue en régime établi et immédiatement après inversion de la polarité, c'est-à-dire les deux schémas de contrainte critique. Les contraintes maximales apparaissent lorsque le rapport de résistivité cellulose/huile est élevé.

En régime établi, la répartition de la tension continue est principalement résistive. En général, la résistivité est telle que la majeure partie de la chute de tension totale s'effectuera à travers la cellulose. Associée à la composante alternative, la répartition dans le système composite sera similaire à la ligne inférieure de la Figure 16. Ainsi, il se développera dans l'isolant solide une contrainte significative, principalement due à la tension continue appliquée.

Immédiatement après une inversion de polarité (la ligne supérieure de la Figure 16), la charge de la cellulose dans le sens opposé demeure mais sera réduite par la répartition de la tension capacitive à l'échelon $2U$ ($-U$ à $+U$). Il en résulte une augmentation significative de la tension à travers l'huile. Les valeurs de résistivité et de permittivité impliquées régissent cette tension temporaire à travers l'huile. Cette tension est normalement plus élevée que la tension à travers l'huile immédiatement après application de $+U$ ou $-U$, mais elle sera réduite à une valeur plus faible (principalement en tension alternative) en régime établi.

**Key**

A – Cellulose

B – Oil

U – Voltage

C – Capacitance

R – Resistance

Figure 15 – Insulation system, equivalent R-C circuit

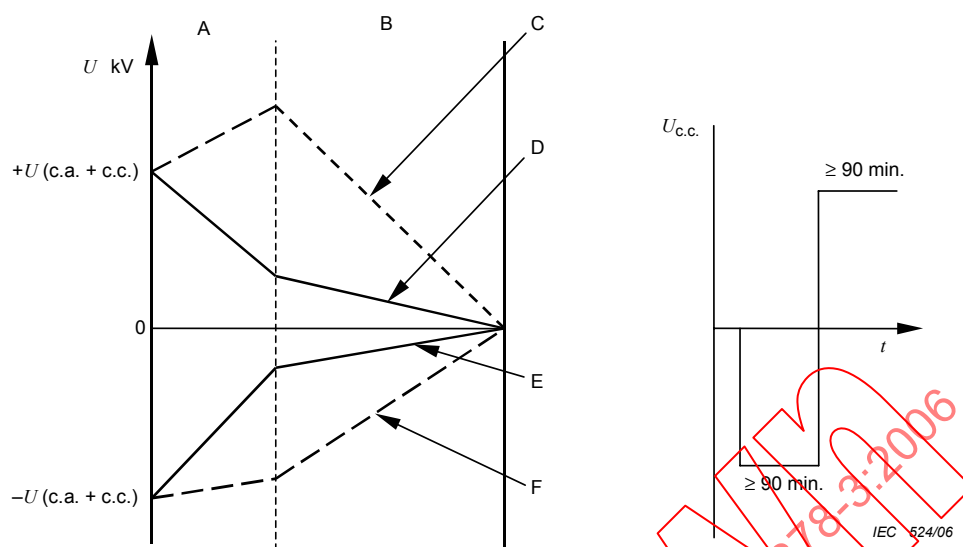
A model shown in Figure 15 can be used to simulate the insulation system. The interface between the oil and the cellulose barrier is assumed to be an equipotential surface.

Because the a.c. and d.c. stresses are pre-dominantly determined by independent parameters, it may be assumed that any complex voltage field can be separated into its a.c. and d.c. components. The stress due to each voltage can be calculated separately, and the two stresses can be combined to give a measure of the actual stress.

Figure 16 gives an indication of the stresses at steady state d.c. voltage and immediately after a polarity reversal, which are the two critical stress patterns. The maximum stresses occur when the resistivity ratio of cellulose/oil is high.

In the steady state condition, a resistive distribution of the d.c. voltage dominates. Normally, the resistivity is such that the major part of the total voltage drop will be across the cellulose. Together with the a.c. component, the distribution in the composite system will be like the lower line in Figure 16. Thus, a significant stress in the solid insulation will develop and this is mainly due to the applied d.c. voltage.

Immediately after a polarity reversal (the upper line in Figure 16), the charge of the cellulose in the opposite direction remains, but will be reduced due to capacitive voltage distribution at the $2U$ step ($-U$ to $+U$). The consequence is a significant increase of the voltage across the oil. The value of resistivities and permittivities involved govern this temporary voltage across the oil. This voltage is normally higher than the voltage across the oil immediately after an application of $+U$ or $-U$, but it will be reduced to a low value (mainly a.c. voltage) in the steady state condition.



Légende

A – Cellulose

B – Huile

C – Répartition initiale après inversion

D – Répartition finale après inversion

E – Répartition finale avant inversion

F – Répartition initiale avant inversion

t – Temps

U – Tension

Figure 16 – Répartition des tensions avant et immédiatement après inversion de la polarité

8.2.2 Marges de sécurité diélectrique au cours des essais de courant continu à long terme et d'inversion de la polarité

Les résistivités de l'huile et de la cellulose varient de manière significative et ceci affecte également les rapports de résistivité qui apparaissent en fonctionnement. Ceci soulève la question de savoir si les essais en usine sont représentatifs de conditions qui permettent de démontrer que, pour la conception, la marge de sécurité diélectrique est suffisante.

L'objectif de l'essai de source séparée de courant continu à long terme est de démontrer qu'il existe une marge de sécurité suffisante sur les contraintes de fonctionnement en service à travers l'isolant en cellulose. L'essai est effectué à température ambiante et par conséquent le rapport de résistivité entre la cellulose et l'huile est comparativement élevé. Ceci donnera lieu à des contraintes qui sont pour l'essentiel supérieures aux contraintes les plus extrêmes rencontrées en service. Des essais à haute température donneront une marge de sécurité inférieure.

L'objectif de l'essai d'inversion de polarité est de démontrer qu'il existe une marge de sécurité suffisante sur les contraintes de fonctionnement en service dans les canalisations d'huile. Cependant, la durée des contraintes d'inversion de polarité dans les conditions d'essai est discutable. Il a été démontré que les rapports de résistivité proches de 1:1 en service peuvent générer dans les canalisations d'huile des contraintes que l'essai d'inversion de polarité ne peut pas vérifier correctement. De ce fait, un nouvel essai de source séparée de courant alternatif, d'une durée d'1 h, avec mesure des décharges partielles, a été introduit. Cet essai génère une contrainte à long terme dans les canalisations d'huile, suffisante pour démontrer qu'il existe une marge de sécurité adéquate dans les conditions les plus défavorables obtenues en cas d'inversion de la polarité en service.

Il est exigé que les essais de tension continue soient réalisés à une température de 20 ± 10 °C (voir 10.4.3.1 de la CEI 61378-2). Si les essais sont effectués immédiatement après l'essai d'un cycle de chaleur, les constantes de temps, pour le chargement et le rechargement du système d'isolation, seront plus courtes, du fait des températures élevées. Ceci peut avoir pour effet un résultat incorrect de la démonstration des marges diélectriques.

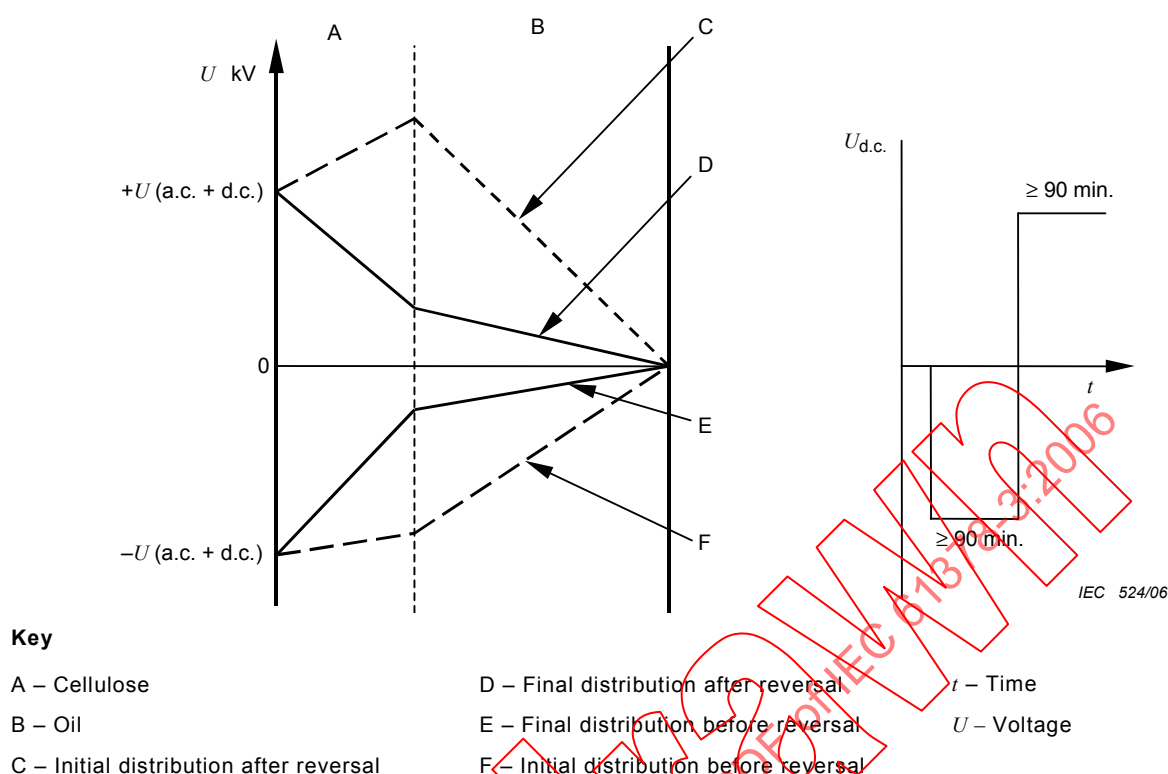


Figure 16 – Voltage distribution before and immediately after polarity reversal

8.2.2 Dielectric safety margins in long term d.c. and polarity reversal testing

Significant variations in resistivity for oil and cellulose, and hence resistivity ratios, will occur during service. This raises the question whether the factory testing represents conditions that demonstrate that there is a sufficient dielectric safety margin for the design.

The aim of the long term d.c. separate source test is to demonstrate that there is a sufficient safety margin over the operating stresses in service across the cellulose insulation. The test is made at room temperature, hence the resistivity ratio between cellulose and oil is comparatively high. This will achieve stresses that are essentially above the most extreme in service. Testing at high temperature will result in a lower safety margin.

The aim of the polarity reversal test is to demonstrate that there is a sufficient safety margin over the operating stresses in service in the oil ducts. However, the duration of the polarity reversal stress under testing conditions is questioned. It has been shown that resistivity ratios close to 1:1 in service may produce stresses in the oil ducts that are not adequately verified by the polarity reversal test. For this reason, a new 1 h separate source a.c. test with partial discharge measurement has been introduced. This test creates a long-term oil duct stress sufficient to demonstrate an adequate safety margin under the worst conditions obtained under polarity reversal in service.

The direct voltage testing shall be carried out at a temperature of $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$. (see 10.4.3.1 of IEC 61378-2). If the tests are carried out immediately after the heat run test, the time constants for charging and recharging of the insulation system will be shorter due to the high temperature. This may have the effect that the dielectric margins are not demonstrated in a proper way.

Il est fait référence à 8.2.3 et au rapport du GTM 12/14.10 du CIGRE, intitulé: «Relations entre essais et contraintes en service, en fonction du rapport de résistivité pour les transformateurs de conversion CCHT et les bobines d'inductance de lissage».

Les recommandations du rapport du CIGRE ont été incorporées dans les exigences d'essais diélectriques de la CEI 61378-2. En résumé, la CEI 61378-2 intègre trois essais diélectriques pour valider la structure d'isolation en courant continu des enroulements de valve:

- L'essai de longue durée de tenue à la tension de source séparée à courant continu;
- l'essai d'inversion de polarité;
- l'essai de tenue à la tension de source séparée à courant alternatif.

8.2.3 Commentaires sur les méthodes d'essais diélectriques

8.2.3.1 Généralités

La Figure 17 présente un schéma simplifié de la conversion c.a./c.c. ainsi que la définition des tensions U_{vm} et U_{dm} telles que données dans la CEI 61378-2.

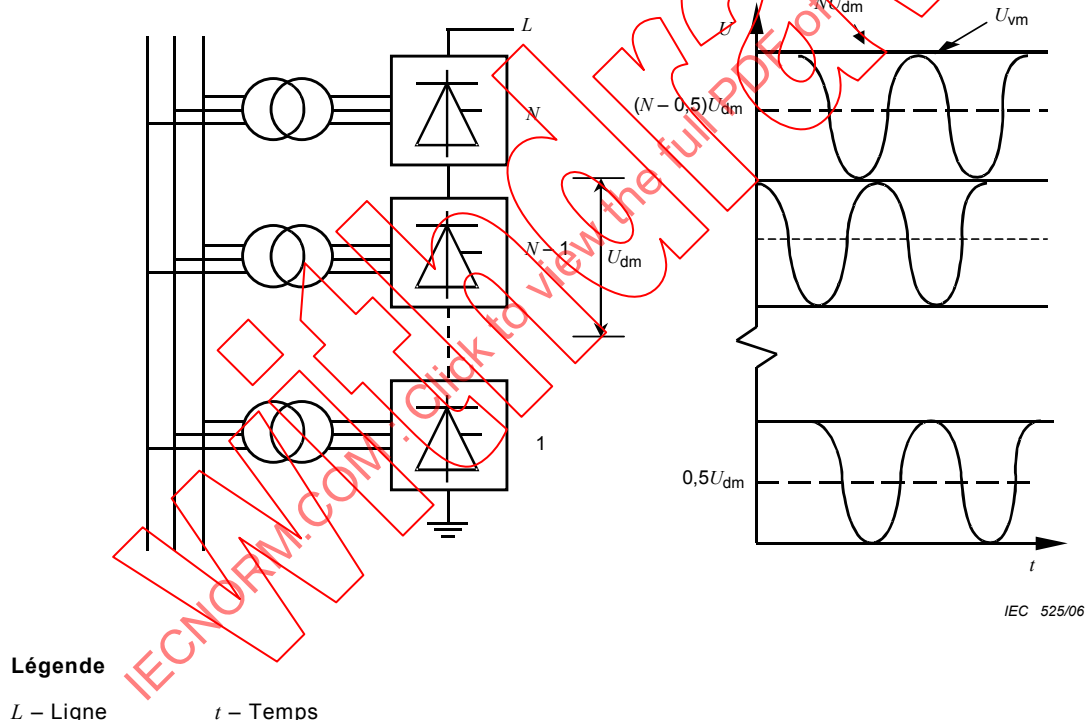


Figure 17 – Conversion c.a./c.c. – Schéma simplifié

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

Le niveau d'essai U_{dc} est exprimé dans l'équation de 8.3.2 de la CEI 61378-2:2001.

Selon la Figure 17, la composante $(N - 0,5)U_{dm}$ est le niveau de tension continue de l'enroulement du transformateur.

La valeur de crête du niveau de tension alternative superposée est de $0,7U_{vm}$. La constante 0,7 est le facteur de multiplication permettant d'obtenir cette valeur de crête de la tension alternative efficace entre phases.

Reference is made to 8.2.3 and CIGRE JWG 12/14.10 paper: “Relationship between test and service stresses as a function of resistivity ratio for HVDC converter transformers and smoothing reactors”.

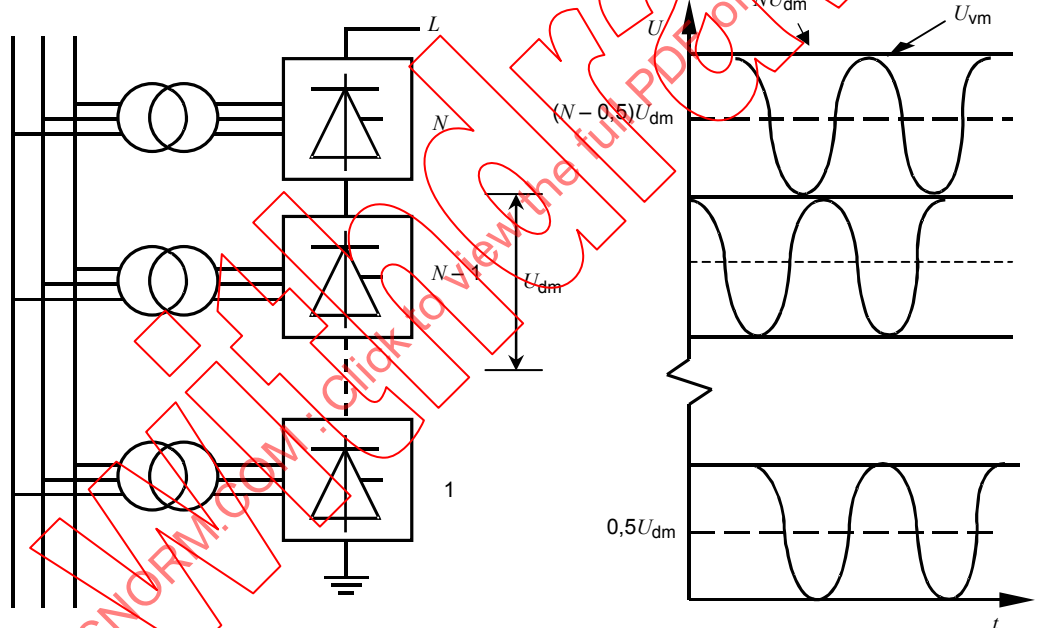
The recommendations from the CIGRE paper have been incorporated into the dielectric testing requirements of IEC 61378-2. In summary, IEC 61378-2 incorporates three dielectric tests to validate the d.c. insulation structure of the valve windings:

- long duration d.c. separate source voltage withstand test;
- the polarity reversal test;
- a.c. separate source voltage withstand test.

8.2.3 Comments on the dielectric test procedures

8.2.3.1 General

Figure 17 shows a simplified sketch of the a.c./d.c. conversion scheme and the definition of the voltages U_{vm} and U_{dm} as defined in IEC 61378-2.



IEC 525/06

Key

L – Line

t – Time

Figure 17 – AC/DC conversion – Simplified sketch

8.2.3.2 DC separate source voltage withstand test

The test level U_{DC} is expressed in the equation in IEC 61378-2:2001, 8.2.3.

According to Figure 17, the component $(N - 0,5)U_{dm}$ is the direct voltage level of the transformer winding.

The peak value of the superimposed a.c. voltage level is $0,7U_{vm}$. The constant 0,7 is the multiplication factor to obtain this peak value from the a.c. phase-to-phase r.m.s. voltage.

En se fondant sur la même méthode que celle qui est utilisée pour établir les valeurs normales de l'essai à long terme à courant alternatif, le multiplicateur 1,5 est appliqué pour obtenir la tension d'essai.

8.2.3.3 Essai d'inversion de polarité

Le niveau d'essai U_{pr} est exprimé dans l'équation de 8.2.4 de la CEI 61378-2.

Les principes mentionnés en 8.2.3.2 s'appliquent. Cependant, lorsque l'on considère la superposition d'un courant alternatif à la composante continue, cette dernière est doublée pour l'inversion de polarité et la composante alternative est additionnée mais non doublée. Ainsi, on additionne seulement la moitié de la composante alternative, ce qui donne le facteur de 0,35. Le résultat final est multiplié par 1,25 pour donner une marge de sécurité.

L'inversion de la polarité est effectuée dans les deux sens, positif vers négatif et vice versa. En effet, la structure d'isolation n'est pas parfaitement symétrique et les effets des contraintes transitoires pendant l'inversion seront différents selon la polarité.

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

Le niveau d'essai U_{ca} est exprimé dans l'équation de 8.2.5 de la CEI 61378-2.

Le niveau d'essai de tension alternative correspond à la somme du niveau de tension continue de l'enroulement de valve et de la valeur crête de la tension alternative phase – terre, le résultat étant divisé par $\sqrt{2}$ pour obtenir la valeur efficace. En se fondant sur la procédure de la CEI 60076-3 utilisée pour établir la valeur normale d'essai à long terme en courant alternatif, le multiplicateur 1,5 est appliqué pour obtenir la tension d'essai.

Il convient de noter que cet essai ne remplace pas l'essai d'inversion de polarité. Il s'agit d'un essai supplémentaire réalisé pour les raisons décrites ci-dessus.

9 Pertes

9.1 Généralités

9.1.1 Généralités

Lorsqu'un courant alternatif circule à travers l'enroulement d'un transformateur, outre les pertes I^2R , il produit les pertes suivantes:

- des pertes par courants de Foucault dans les enroulements;
- des pertes par courants de Foucault dans les barres à fort courant éventuellement présentes;
- des pertes parasites dans les parties métalliques.

NOTE 1 La connexion de court-circuit externe, à établir pour la mesure des pertes dues à la charge, influence les résultats de mesure. Avant de commencer l'essai, il convient que le fournisseur et l'acheteur conviennent de la méthode de correction des résultats de mesure pour tenir compte des pertes et impédances du circuit d'essai.

NOTE 2 Lorsque les appareils munis de transducteurs sont soumis aux essais de perte due à la charge, il est admis que les grandeurs électriques ne soient pas sinusoïdales. Avant le début de l'essai, il convient que le fournisseur et l'acheteur conviennent de la méthode de correction des résultats de mesure.

Ces pertes sont générées de la manière suivante.

Un courant alternatif s'écoulant à travers un enroulement produit un flux magnétique alternatif. Ce flux alternatif induit des forces électromotrices dans tous les matériaux conducteurs qu'il rencontre. Ces forces électromotrices produisent des courants de Foucault dans tous les matériaux conducteurs et par conséquent elles génèrent des pertes par courants de Foucault et des pertes parasites.

In line with the same procedure used to establish the normal a.c. long-term testing values, the multiplier 1,5 is applied to obtain the test voltage.

8.2.3.3 Polarity reversal test

The test level U_{pr} is expressed in the equation in IEC 61378-2, 8.2.4.

The same principles as mentioned in 8.2.3.2 apply. However, when d.c. with superimposed a.c. is considered, the d.c. component is doubled for the polarity reversal and the a.c. component is added but not doubled. Thus only half of the a.c. component is added, which gives the factor 0,35. The final result is multiplied by 1,25 to give a safety margin.

The polarity reversal is made from positive to negative polarity and *vice-versa*. The reason is that the insulation structure is not perfectly symmetrical and the impact of the transient stresses during the reversal will differ depending on polarity.

8.2.3.4 AC separate source voltage test

The test level U_{ac} is expressed in the equation given in IEC 61378-2, 8.2.5.

The a.c. voltage test level corresponds to the sum of the d.c. voltage level of the valve winding and the peak value of the a.c. phase-to-earth voltage and division by $\sqrt{2}$ gives the r.m.s. value. In line with the procedure of IEC 60076-3 used to establish the normal a.c. long term test value, the multiplier 1,5 is applied to obtain the test voltage.

It should be observed that this test is not a substitute to the polarity reversal test. It is only a supplementary test to be carried out for the reasons described above.

9 Losses

9.1 General

9.1.1 General considerations

Whenever an alternating current flows through the winding of a transformer, in addition to the I^2R losses, it produces:

- eddy losses in windings;
- eddy losses in high current busbars, when present;
- stray losses in structural steel parts.

NOTE 1 The external short circuit connection, to be set up for the measurement of the load losses, influences the measuring results. An agreement should be reached between the supplier and purchaser before starting the test on how to correct the measuring results owing to losses and impedances of the test circuit.

NOTE 2 When units provided with transducers are subject to load losses tests, the electrical quantities might not be sinusoidal. An agreement should be reached between the supplier and purchaser before starting the test on how to correct the measuring results.

These losses originate as follows.

An a.c. current flowing through a winding produces an alternating magnetic flux. This alternating flux induces electromotive forces in all conductive materials that it encounters. These electromotive forces produce eddy currents in all conductive materials and hence they generate eddy and stray losses.

Les forces électromotrices sont proportionnelles à la dérivée du flux magnétique. Si l'on considère un état sinusoïdal, les forces électromotrices sont proportionnelles à:

$$f \times B$$

où

f est la fréquence; et

B est la densité du flux magnétique.

L'amplitude des courants de Foucault induits est proportionnelle à:

$$(f \times B)/R$$

où R est la résistance rencontrée par les courants de Foucault.

Considérant que B est généralement proportionnelle au courant de l'enroulement I , dans ce cas les pertes par courants de Foucault sont proportionnelles à:

$$(f^2 \times B^2)/R \text{ et par conséquent } P_{\text{foucault}} = \text{constant} \times (f^2 \times I^2)/R \quad (1)$$

Ce rapport est valide pour les pertes parasites dans les parties métalliques également, si elles ne sont pas saturées.

9.1.2 Pertes et fréquence

Les courants de Foucault induits dans un matériau conducteur par un champ magnétique alternatif, se répartissent de manière non uniforme dans la section du conducteur et se concentrent à proximité de la surface. Ce phénomène est appelé effet de peau ou effet pelliculaire.

La profondeur de pénétration des courants de Foucault dépend des caractéristiques électriques et magnétiques du matériau ainsi que de la fréquence du champ magnétique alternatif. Ce rapport peut être exprimé par la relation suivante:

$$\text{Profondeur de pénétration} = \frac{1}{\sqrt{\mu \times \pi \times f \times \sigma}} \quad (2)$$

où

μ est la perméabilité magnétique du matériau;

f est la fréquence;

σ est la conductivité électrique.

L'effet pelliculaire influence à son tour la valeur de la résistance du conducteur à une fréquence donnée. Ainsi, l'équation (1) peut être reformulée de la manière suivante:

$$P_{\text{eddy}} = \text{constant} \times \frac{f^2 \times I^2}{R(f)} \quad (3)$$

La résistance du conducteur demeure constante jusqu'à une certaine fréquence (appelée fréquence de transition); si la fréquence augmente encore, la résistance augmente comme décrit par les formules données dans l'Annexe A de la CEI 61378-1:1997.

Electromotive forces are proportional to the derivative of the magnetic flux. If we consider a sinusoidal state, then electromotive forces are proportional to:

$$f \times B$$

where

f is the frequency; and

B is the magnetic flux density.

The magnitude of the induced eddy currents is proportional to:

$$(f \times B)/R$$

where R is the resistance encountered by the eddy currents.

Considering that B is generally proportional to the winding's current I , then the eddy losses are proportional to:

$$(f^2 \times B^2)/R \text{ and therefore } P_{\text{eddy}} = \text{constant} \times (f^2 \times I^2)/R \quad (1)$$

This relationship is also valid for stray losses in structural steel parts, providing they are unsaturated.

9.1.2 Losses and frequency

Eddy currents, induced in a conductive material by an alternating magnetic field, distribute themselves unevenly in the conductor section and concentrate near the conductor surface. This phenomenon is known as "skin effect".

The penetration depth of eddy currents depends on the material, electrical and magnetic properties together with the frequency of the alternating magnetic field. This relationship can be expressed as follows:

$$\text{skin depth} = \frac{1}{\sqrt{\mu \times \pi \times f \times \sigma}} \quad (2)$$

where

μ is the material magnetic permeability;

f is the frequency,

σ is the electrical conductivity.

The skin effect then influences the value of the conductor resistance at a given frequency. Thus equation (1) may be rewritten as:

$$P_{\text{eddy}} = \text{constant} \times \frac{f^2 \times I^2}{R(f)} \quad (3)$$

The conductor's resistance remains constant up to a certain frequency (called transition frequency), if the frequency is increased beyond this, the resistance increases in a manner described by the formulae given in Annex A of IEC 61378-1:1997.

Les pertes par courants de Foucault dans un conducteur donné augmenteront en fonction du carré de la fréquence jusqu'à la fréquence de transition. Pour les fréquences plus élevées, le rapport est:

$$P_{\text{eddy}} \propto f^x \quad (4)$$

où x est $0,5 < x \leq 2$ et décroît constamment en fonction de l'augmentation de la fréquence.

La valeur de la fréquence de transition d'un conducteur spécifique dépend en grande partie des dimensions géométriques du conducteur proprement dit et par conséquent plus ces dimensions sont importantes et plus la fréquence de transition est basse (voir l'Annexe A de la CEI 61378-1:1997).

Les différents matériaux conducteurs à l'intérieur du transformateur peuvent être divisés en deux groupes.

- Les conducteurs de l'enroulement, dont les dimensions sont en général¹ comparables à la profondeur de pénétration à la fréquence fondamentale.
- Les barres à fort courant et les parties en acier de construction, dont les dimensions sont significativement plus élevées que la profondeur de pénétration à la fréquence fondamentale.

Les différences de géométrie entre ces deux groupes s'expriment par une correspondance différente entre pertes par courants de Foucault et fréquence. Les pertes par courants de Foucault dans les conducteurs de l'enroulement varient en fonction de f^2 , tandis que les pertes par courants de Foucault dans les barres à fort courant et dans les parties en acier de construction varient en fonction de $f^{0,8}$.

L'utilisation de deux exposants uniquement constitue une simplification par rapport aux explications données dans l'Annexe A de la CEI 61378-1:1997. Toutefois, plusieurs mesures et simulations ont montré que ces exposants étaient à la fois sûrs et raisonnables.

9.1.3 Harmoniques de courant

Le courant harmonique augmentera les pertes par courants de Foucault et les pertes parasites du transformateur. Ces augmentations peuvent atteindre des niveaux tels qu'ils peuvent entraîner une défaillance du transformateur.

Les convertisseurs auxquels les transformateurs sont couplés, agissent comme des sources de courants harmoniques. La caractéristique de ces harmoniques dépend de:

- la configuration du circuit de puissance du convertisseur;
- la technique de commande du convertisseur;
- l'interaction entre le convertisseur et le système auquel il est appliqué;
- les caractéristiques des composants de l'électronique de puissance.

Le fabricant du transformateur ne dispose pas des informations et des connaissances nécessaires lui permettant de prédire les harmoniques de courant générés par le convertisseur. En conséquence, la CEI 61378-1 et la CEI 61378-2 exigent qu'un spectre harmonique soit inclus dans la spécification en terme d'amplitude et de phase. Il incombe d'une part à l'acheteur la responsabilité de spécifier les harmoniques auxquels le transformateur sera soumis, et d'autre part au fabricant du transformateur de concevoir le transformateur en tenant compte des harmoniques ainsi spécifiés.

¹ Les enroulements à feuilles sont une exception à cette règle (voir l'équation (A.4) dans l'Annexe A de la CEI 61378-1).

Eddy losses in a given conductor will increase with the square of the frequency up to the transition frequency. For higher frequencies, the relationship is:

$$P_{\text{eddy}} \propto f^x \quad (4)$$

where x is $0,5 < x \leq 2$ and constantly decreases with an increase in frequency.

The value of transition frequency of a specific conductor depends significantly on the geometric dimensions of the conductor itself, hence the larger the dimensions, the lower the transition frequency (see IEC 61378-1:1997, Annex A).

The different conductive materials inside the transformer may be divided into two groups.

- Winding conductors, the dimensions are usually¹ comparable with the skin depth at fundamental frequency.
- High current busbars and structural steel parts where at least one dimension is significantly greater than the skin depth at fundamental frequency.

The geometric differences between the two groups is reflected in a different relationship between eddy loss and frequency. Eddy losses in winding conductors vary as f^2 , while those in high current busbars and structural steel parts vary as $f^{0,8}$.

The use of just two exponents is a simplification in respect to what is described in IEC 61378-1:1997, Annex A. However, several measurements and simulations have shown that these exponents are both safe and reasonable.

9.1.3 Current harmonics

The harmonic current will increase the transformer eddy and stray losses. Such increases can reach levels that may lead to transformer failure.

Converters, to which transformers are connected, act as sources of harmonic currents. The characteristic of these harmonics depend on:

- the converter's power circuit configuration;
- the converter's control technique;
- interaction between the converter and the system to which it is applied;
- the characteristic of the power electronic components.

The transformer manufacturer does not have the necessary information and knowledge to predict the current harmonic generated by the converter. Accordingly, IEC 61378-1 and IEC 61378-2 require that a harmonic spectrum be included in the specification in terms of amplitude and phase. The purchaser has the responsibility of specifying the harmonics to which the transformer will be subjected, whilst the transformer manufacturer has the responsibility of designing the transformer taking into account the specified harmonics.

¹ Foil windings are an exception to this (see IEC 61378-1 Annex A equation (A.4)).

La CEI 60146 identifie les différentes configurations de circuit de puissance des convertisseurs. Il a été attribué à chacune de ces configurations un indice de pulsation p , de façon à pouvoir prédire les harmoniques qui seraient théoriquement présents.

Les développements actuels dans le domaine de l'électronique permettent d'appliquer des techniques de commande nouvelles, en temps réel, qui modifient de manière significative le comportement du convertisseur. Le résultat est qu'il est difficile d'établir avec certitude une relation claire entre la configuration du circuit de puissance du convertisseur et son indice de pulsation et par conséquent la valeur des harmoniques de courant.

9.1.4 Transformateurs à trois enroulements ou plus bobinés sur la même colonne de circuit magnétique

La description des dispositions d'enroulement et des champs de fuite est décrite en utilisant un exemple de transformateurs à noyau. Les mêmes considérations peuvent être appliquées aux transformateurs cuirassés.

Dans un transformateur à deux enroulements, s'il n'est pas tenu compte du courant de magnétisation, les ampère-tours sont équilibrés. Les courants harmoniques circulant dans l'enroulement de valve sont équilibrés par les harmoniques (ayant la même amplitude unitaire réduite) dans les enroulement de ligne; par conséquent le facteur d'accroissement des pertes par courants de Foucault est le même pour les enroulements de ligne et de valve.

Dans un transformateur à trois enroulements, il est notoire que la somme des ampères-tours de tous les enroulements est égale à zéro, et il est donc nécessaire d'étudier de manière détaillée la méthode de calcul du facteur d'accroissement des pertes par courants de Foucault de chaque enroulement.

Pour les transformateurs à trois enroulements de type à noyau, caractérisés par le couplage entre les enroulements de valve, il est possible d'identifier les configurations suivantes:

- a) couplage serré – deux enroulements de valve entrelacés et un enroulement de ligne;
- b) aucun couplage – deux paires d'enroulements de ligne-valve séparés par une culasse intermédiaire;
- c) couplage lâche -
 - transformateur biconcentrique avec un enroulement de ligne en position radiale entre les deux enroulements de valve;
 - deux enroulements de ligne en parallèle, l'un au-dessus de l'autre, chaque enroulement de ligne faisant face à un enroulement de valve.

Après avoir mesuré les harmoniques de courant au niveau des trois bornes du transformateur, il est possible d'observer que, alors que certains harmoniques injectés dans les enroulements de valve apparaissent sur la ligne avec une valeur réduite identique, d'autres harmoniques ne sont pas présents du côté ligne.

Par conséquent, il est possible de diviser les harmoniques injectés dans les enroulements de valve en deux groupes:

- 1) harmoniques en phase – il n'y a pas de déphasage entre ces harmoniques circulant dans les enroulements de valve; ils s'ajoutent et apparaissent du côté ligne;
- 2) les harmoniques en opposition de phase – il y a un déphasage de 180° entre ces harmoniques circulant dans les enroulements de valve; ils s'annulent et n'apparaissent pas du côté ligne ².

² Comme dans les harmoniques paires dans un redresseur monoalternance à couplage en étoile double.

IEC 60146 identifies different converter power circuit configurations. For each of these configurations, a pulse number p was assigned so that it would be possible to predict the harmonics that, theoretically, should be present.

Current developments in electronics make possible the application of new real-time control techniques that significantly alter the behaviour of the converter. The result is that a clear relationship between the converter power circuit configuration and its number of pulses, and hence the value of the current harmonics, is uncertain.

9.1.4 Transformers with three or more windings wound on the same core limb

Winding arrangements and leakage fields are described by use of an example of core-form transformers. The same consideration can be applied to shell-form transformers.

In a two-winding transformer, ampere-turns are balanced if the magnetizing current is neglected. The harmonic currents flowing in the valve winding are balanced by harmonics (with the same p.u. magnitude) in the line winding; therefore the eddy loss enhancement factor is the same for both the line and valve windings.

In a transformer with three windings, it is known that the sum of all windings ampere-turns adds up to zero and so it is necessary to consider in detail how to calculate each winding eddy-loss enhancement factor.

It is possible to identify the following configurations for three winding core-type transformers characterized by the coupling between valve windings:

- a) close coupling – two-valve windings interwoven and one line winding;
- b) no coupling – two pairs of valve-line windings separated by an intermediate yoke;
- c) loose coupling –
 - double concentric transformer with one line winding positioned radially between the two valve windings;
 - two line windings in parallel, one above the other, each line winding facing one valve winding.

After measuring current harmonics at all three transformer terminals, it is possible to observe that, while some harmonics injected into the valve windings appear on the line with an identical p.u. value, other harmonics are not present on the line side.

Therefore, it is possible to divide the harmonics injected into the valve windings into two groups:

- 1) harmonics in phase – there is no phase displacement between these harmonics flowing in the valve windings; they sum and appear on the line side;
- 2) harmonics in phase opposition – there is a 180° phase displacement between these harmonics flowing in the valve windings; they cancel each other out and do not appear on the line side².

² As in even harmonics in a double-star single-way rectifier.

Les courants harmoniques en phase contribuent toujours à la valeur totale des pertes par courants de Foucault.

L'effet des courants harmoniques en opposition de phase est lié au couplage de l'enroulement de valve (voir 5.2 de la CEI 61378-1:1997):

- a) couplage serré – les harmoniques en opposition de phase sont équilibrés entre les enroulements de valve entrelacés; ils génèrent un flux de fuite négligeable, de sorte qu'ils produisent uniquement des pertes I^2R dans les enroulements de valve (voir la Figure 18);
- b) aucun couplage – la culasse intermédiaire sépare les circuits magnétiques des deux paires d'enroulements valve-ligne; les harmoniques en opposition de phase sont équilibrés entre chaque couple d'enroulements valve-ligne de sorte qu'ils ne produisent que des pertes I^2R et des pertes par courants de Foucault, à la fois dans les enroulements de ligne et de valve (voir la Figure 19);
- c) couplage lâche obtenu avec des enroulements de valve biconcentriques – les harmoniques en opposition de phase ne circulent pas dans l'enroulement de ligne puisqu'ils sont équilibrés entre les enroulements de valve où ils produisent à la fois des pertes I^2R et des pertes par courants de Foucault (voir la Figure 20);
- d) couplage lâche obtenu avec deux enroulements de ligne en parallèle avec déplacement axial – les harmoniques en opposition de phase sont presque entièrement équilibrés entre chaque couple d'enroulements valve-ligne, de telle sorte que les mêmes considérations que pour les harmoniques sans couplage s'appliquent; voir la Figure 21.

Lorsque l'amplitude des harmoniques en opposition de phase est significative et que les enroulements dans lesquels ils circulent sont à couplage lâche, les champs de fuite en résultant (avec une composante radiale significative) peuvent générer des pertes locales par courants de Foucault qui sont ingérables. Dans de telles situations, il est fortement recommandé d'étudier les effets des harmoniques en opposition de phase en utilisant des outils de simulation appropriés.

Des considérations similaires, fondées sur le couplage mutuel des enroulements, s'appliquent lorsque plus de trois enroulements ou des transformateurs cuirassés sont étudiés.

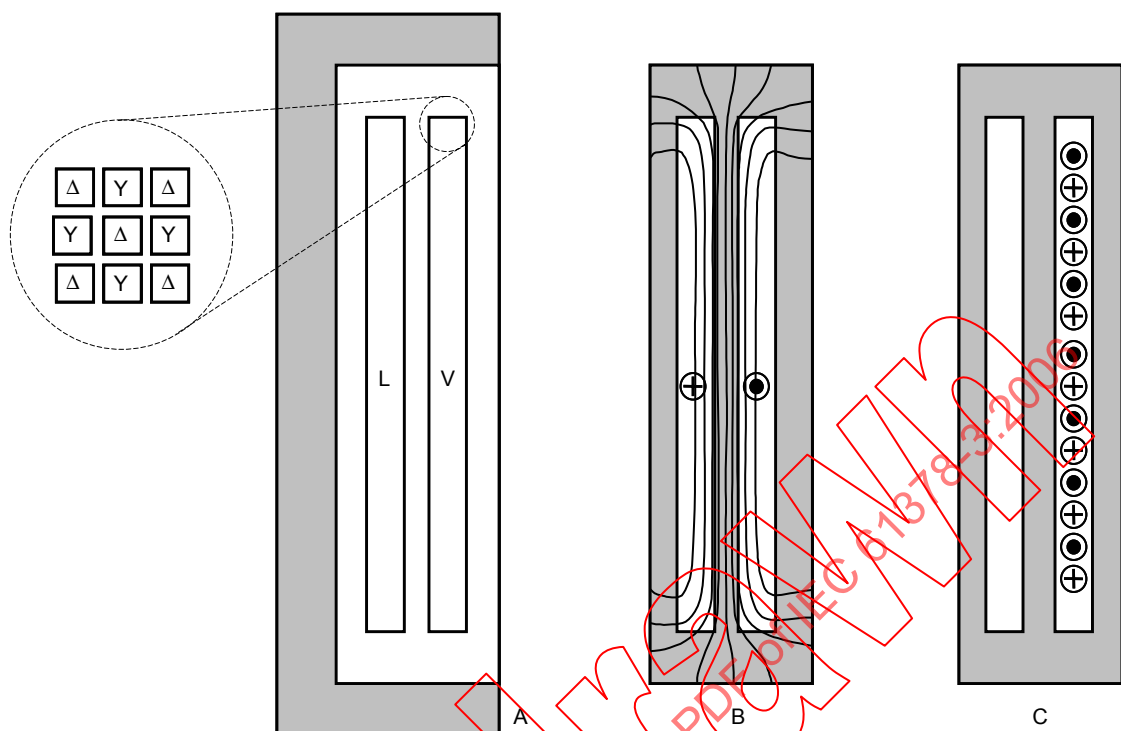
Harmonic currents in phase always contribute to the total eddy loss value.

The effect of harmonic currents in phase opposition is related to the valve winding coupling (see IEC 61378-1:1997, 5.2):

- a) close coupling – harmonics in opposition are balanced between the interwoven valve windings; they produce a negligible leakage flux so that they only produce I^2R losses in the valve windings (see Figure 18);
- b) no coupling – the intermediate yoke separates the magnetic circuits of the two pairs of valve-line windings; harmonics in opposition are balanced between each valve-line windings couple so that they produce both I^2R and eddy losses in both line and valve windings (see Figure 19);
- c) loose coupling obtained with double concentric valve windings – harmonics in opposition do not flow in the line winding as they are balanced between the valve windings where they produce both I^2R and eddy losses (see Figure 20);
- d) loose coupling obtained with two line windings in parallel axially-displaced – harmonics in opposition are almost completely balanced between each valve-line windings couple so that the same considerations made for no coupling apply (see Figure 21).

Whenever the magnitude of harmonics in opposition is relevant and the windings into which they flow are loosely coupled, the resulting leakage fields (with significant radial component) may produce unmanageable local eddy losses. In these situations, it is highly advisable to study the effects of the harmonics in opposition by means of the appropriate simulation tools.

Similar considerations, based on the mutual coupling of the windings, apply when more than three windings or shell type transformers are considered.



IEC 526/06

Légende

A – Disposition des enroulements dans la fenêtre du noyau

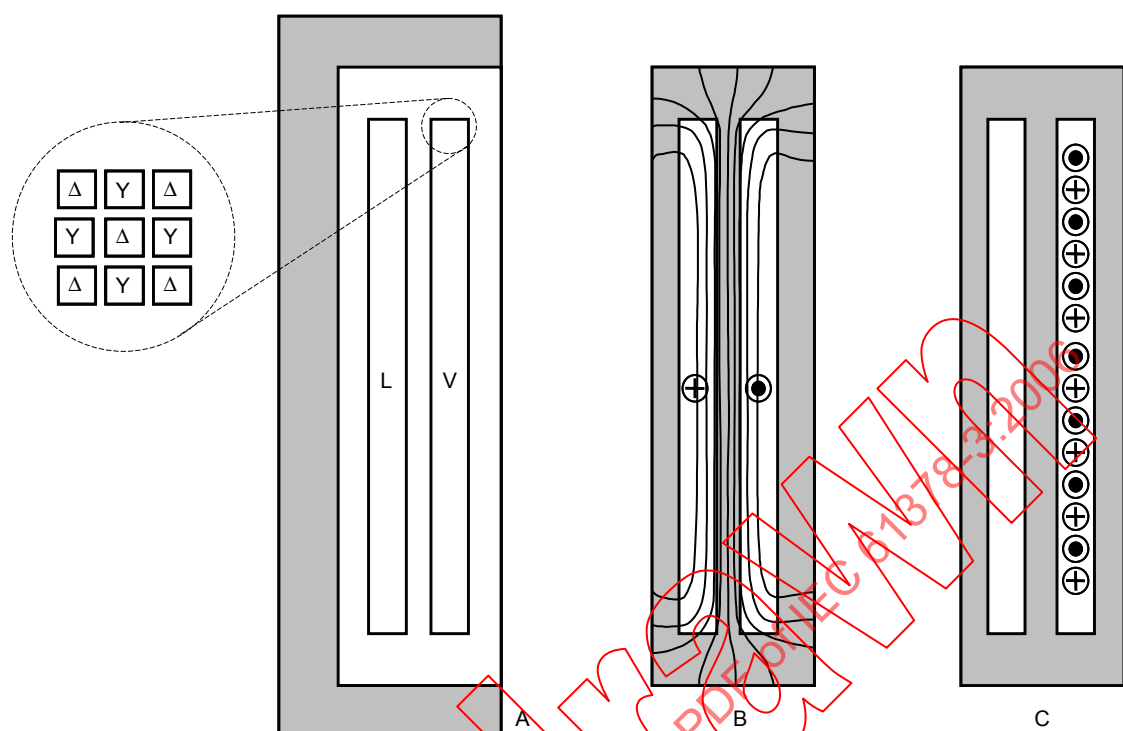
L – Enroulement de ligne

B – Flux de fuite produit par des harmoniques en phase

V – Enroulements de valve entrelacés

C – Flux de fuite produit par des harmoniques avec un déphasage de 180°

Figure 18 – Champs de fuite pour transformateur à trois enroulements avec enroulements de valve à couplage serré



IEC 526/06

Key

A – Winding arrangement in the core window

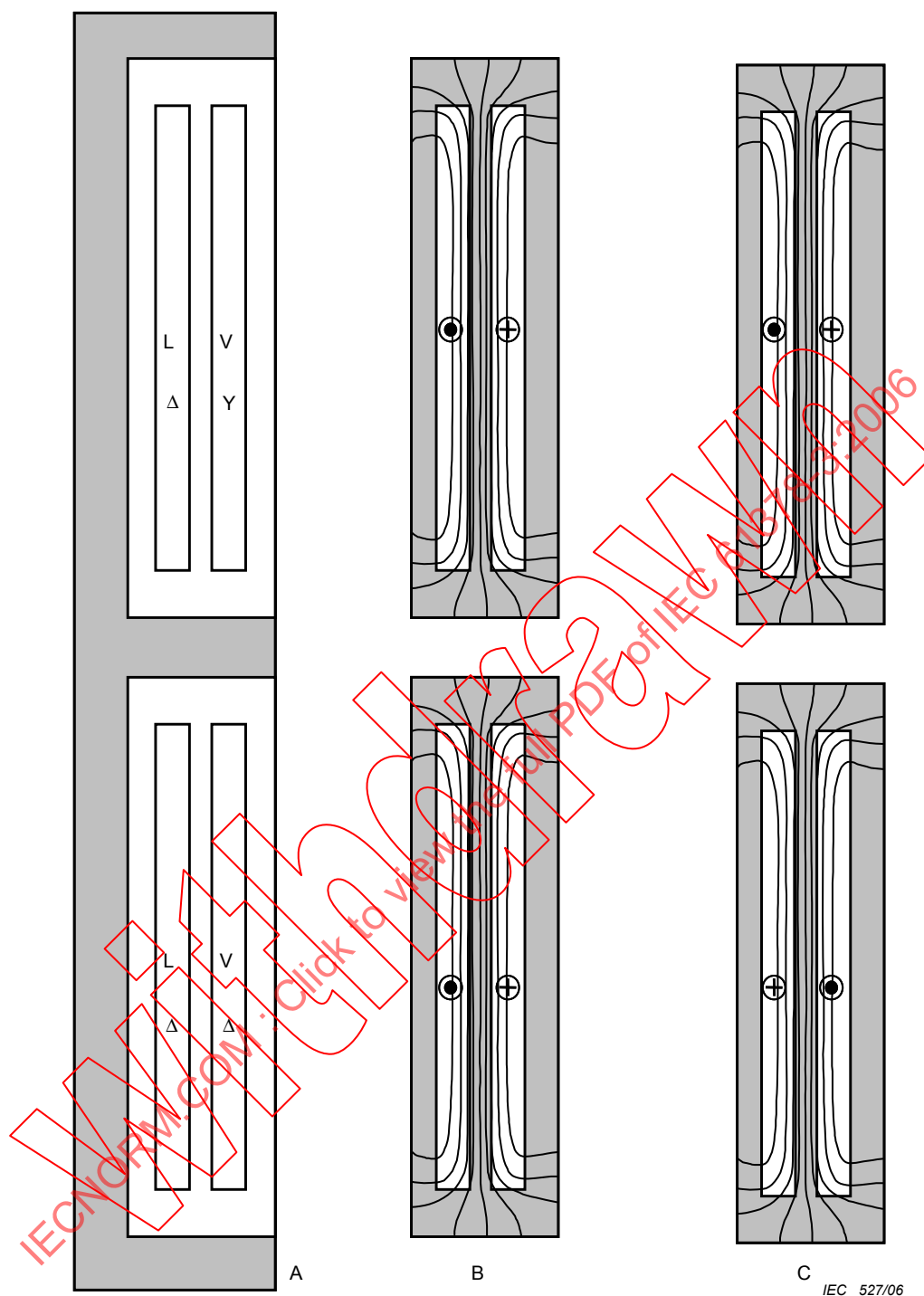
B – Leakage flux produced by harmonics in phase

C – Leakage flux produced by harmonics with 180° phase displacement

L – Line winding

V – Interwoven valve windings

Figure 18 – Leakage fields for a three-winding transformer with closely coupled valve windings



Légende

A – Disposition des enroulements dans la fenêtre du noyau

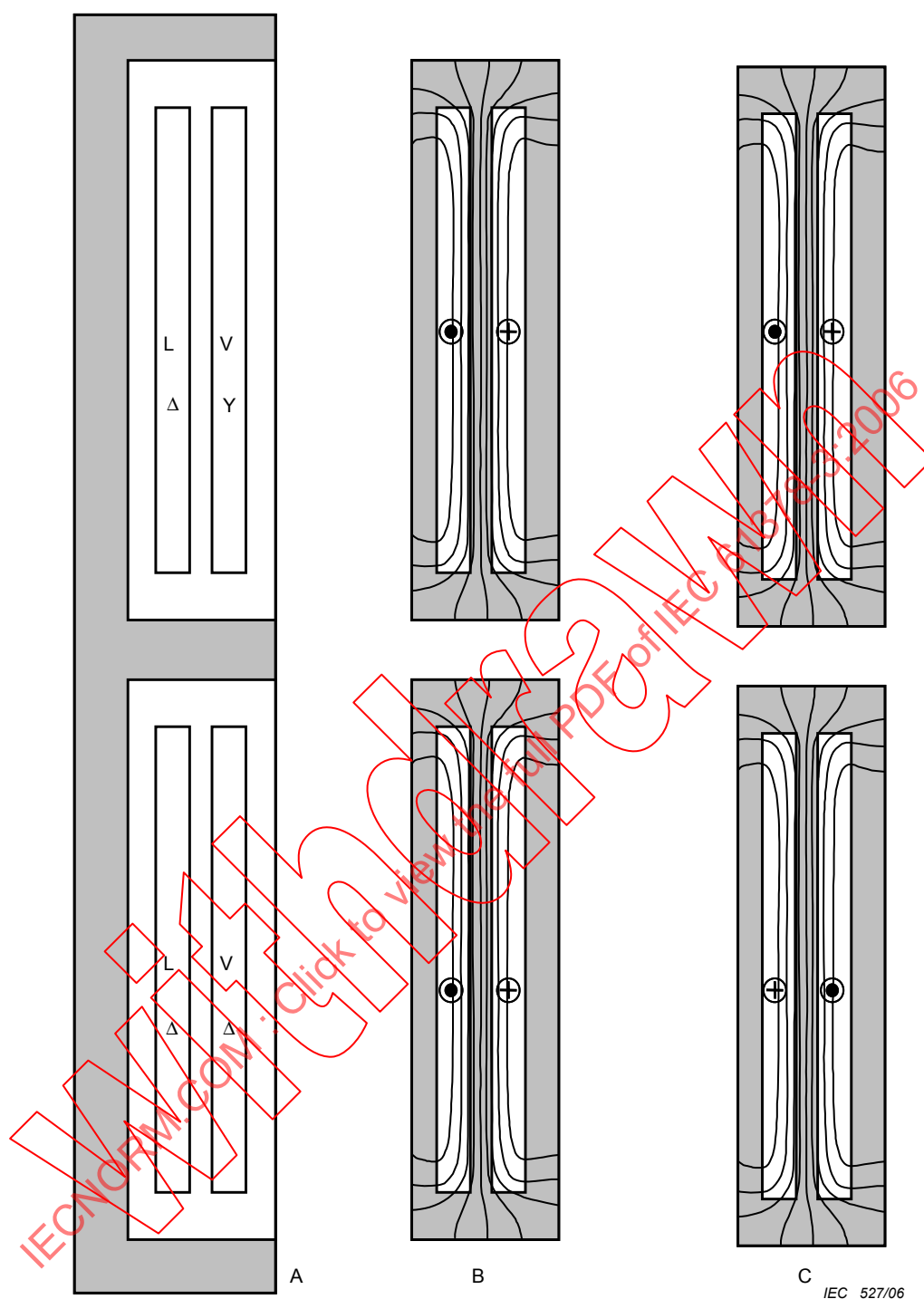
B – Flux de fuite produit par des harmoniques en phase

C – Flux de fuite produit par des harmoniques avec un déphasage de 180°

L – Enroulements de ligne

V – Enroulements de valve

Figure 19 – Champs de fuite pour un transformateur à trois enroulements avec enroulements de valve sans couplage



Key

A – Winding arrangement in the core window

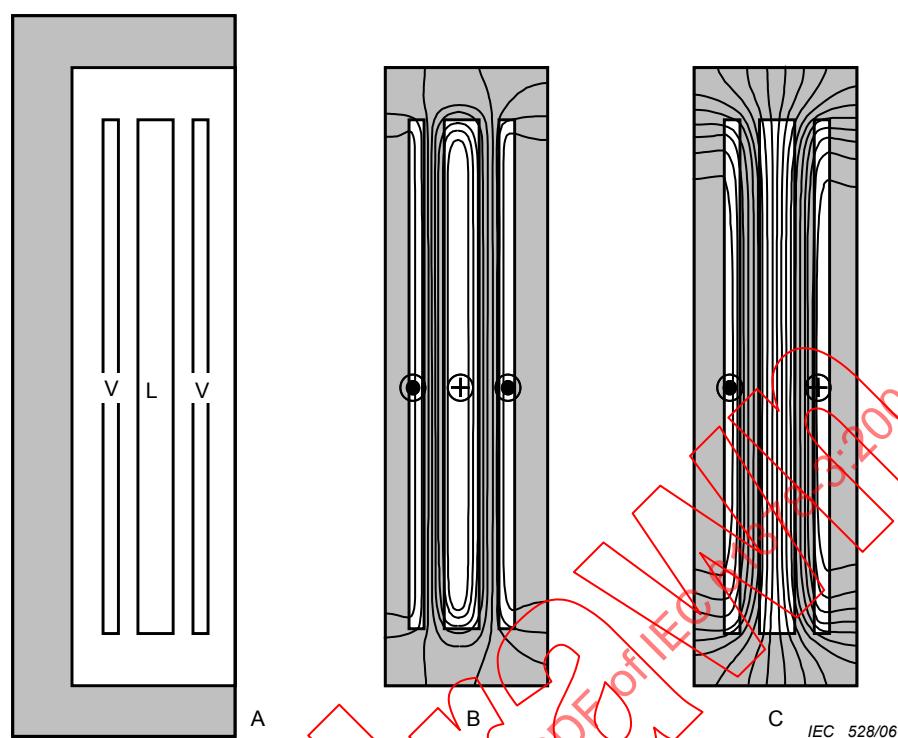
B – Leakage flux produced by harmonics in phase

C – Leakage flux produced by harmonics with 180° phase displacement

L – Line windings

V – Valve windings

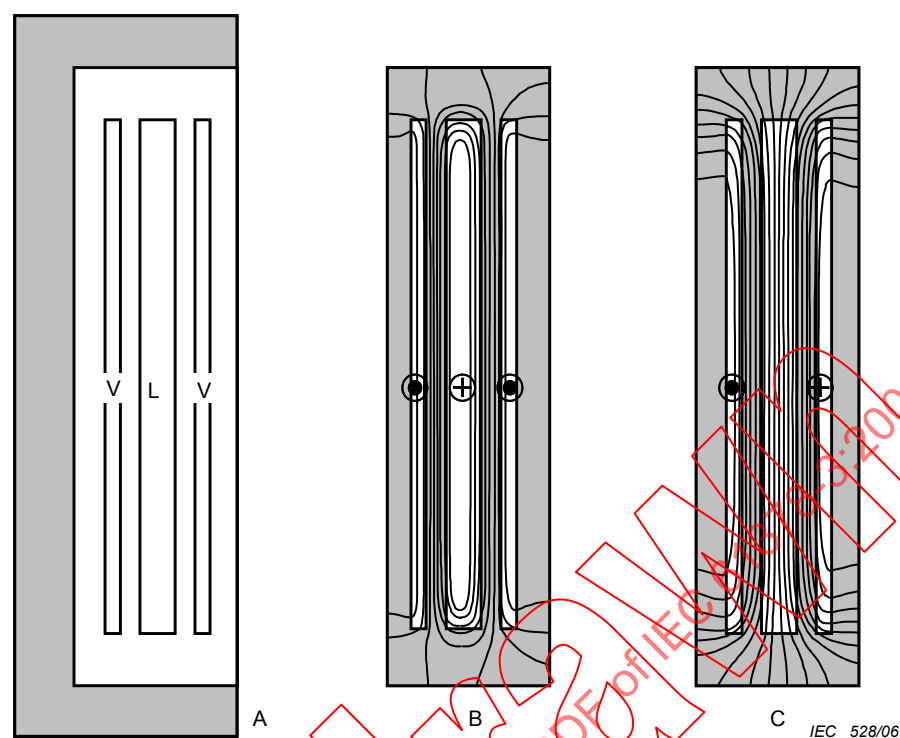
Figure 19 – Leakage fields for a three-winding transformer with decoupled valve windings



Légende

- A – Disposition des enroulements dans la fenêtre du noyau
- B – Flux de fuite produit par des harmoniques en phase
- C – Flux de fuite produit par des harmoniques avec un déphasage de 180°
- L – Enroulement de ligne
- V – Enroulements de valve

Figure 20 – Champs de fuite pour un transformateur à trois enroulements avec enroulements de valve biconcentriques à couplage lâche

**Key**

A – Winding arrangement in the core window

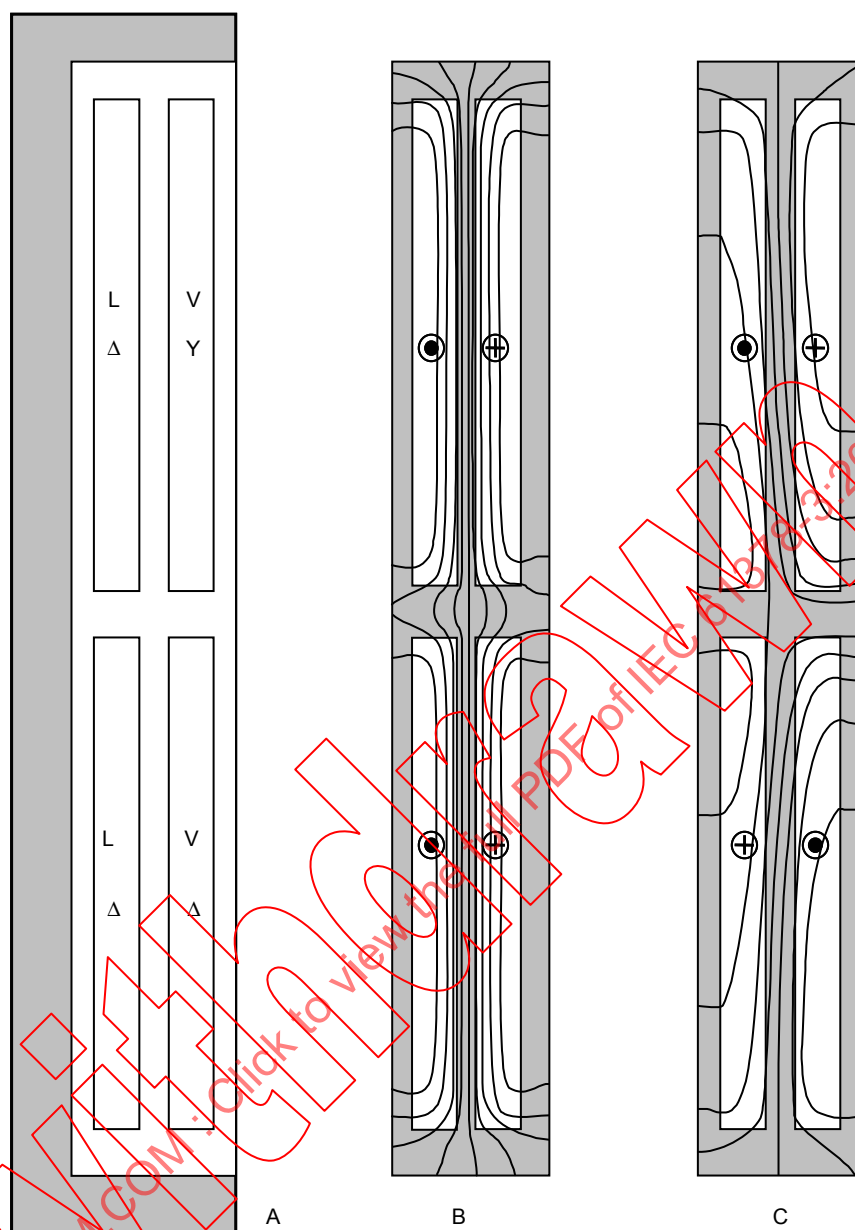
B – Leakage flux produced by harmonics in phase

C – Leakage flux produced by harmonics with 180° phase displacement

L – Line winding

V – Valve windings

Figure 20 – Leakage fields for a three winding transformer with loosely coupled double concentric valve windings



IEC 529/06

Légende

A – Disposition des enroulements dans la fenêtre du noyau

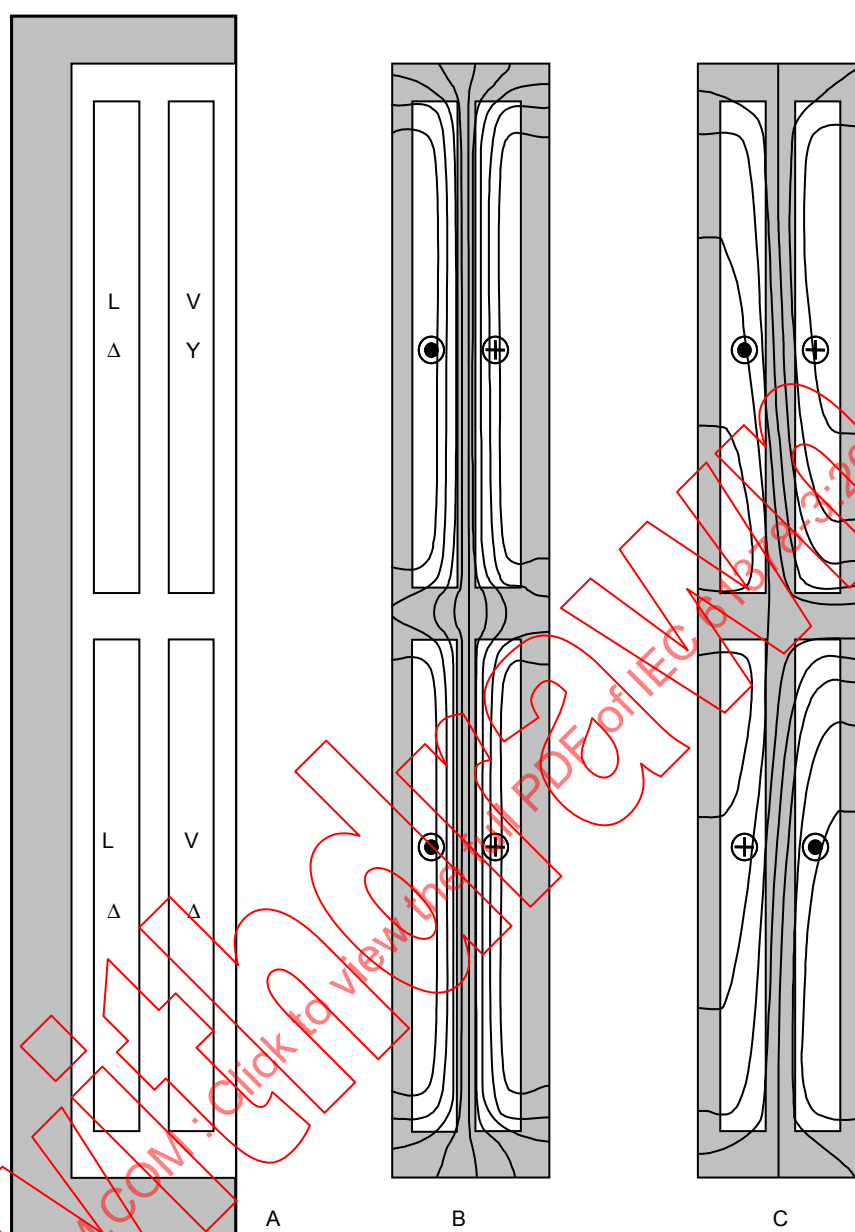
B – Flux de fuite produit par des harmoniques en phase

C – Flux de fuite produit par des harmoniques avec un déphasage de 180°

L – Enroulement de ligne

V – Enroulements de valve

Figure 21 – Champs de fuite pour un transformateur à trois enroulements avec enroulements de valve double étage à couplage lâche



IEC 529/06

Key

A – Winding arrangement in the core window

B – Leakage flux produced by harmonics in phase

C – Leakage flux produced by harmonics with 180° phase displacement

L – Line winding

V – Valve windings

**Figure 21 – Leakage fields for a three winding transformer
with loosely coupled double-tier valve windings**

9.1.5 Essais à double fréquence des transformateurs CCHT

La procédure se fonde sur la différence de comportement des pertes par courants de Foucault dans les enroulements et des pertes parasites dans les parties mécaniques, comme décrit en 9.1.1. En utilisant des mesures à deux fréquences différentes, il est possible d'évaluer la répartition des pertes par courants de Foucault et des pertes parasites conformément à la procédure présentée en 10.3.2 de la CEI 61378-2. L'analyse a montré qu'une précision raisonnable de la répartition sera obtenue si les mesures des pertes dues à la charge sont effectuées à deux fréquences différentes, suffisamment séparées. Si l'une des mesures est effectuée à la fréquence industrielle, 50 Hz ou 60 Hz, la seconde mesure doit être effectuée à une fréquence supérieure ou égale à 150 Hz. Une source de tension pour la seconde mesure de fréquence est normalement disponible étant donné que l'équipement d'essai de surtension induite peut être utilisé. Cette procédure n'est pas destinée à être utilisée pour les transformateurs objet de la CEI 61378-1, qui utilise une estimation théorique de la répartition des pertes par courants de Foucault.

La procédure à double fréquence implique:

- l'utilisation de techniques de mesure bien établies qui donnent lieu à une précision raisonnable de la répartition des pertes;
- d'éviter les mesures dans la gamme des kHz;
- d'éviter une estimation théorique.

Exemple de calcul:

P_1 représente la perte totale de charge à 50 Hz

P_5 représente la perte totale de charge à 250 Hz

P_{we1} représente la perte par courants de Foucault dans les enroulements à 50 Hz

P_{SE1} représente les pertes parasites dans les parties mécaniques à 50 Hz

$I_{LN}^2 R$ représente les pertes ohmiques au courant assigné

I_v représente le courant aux harmoniques v

f est la fréquence

Caractéristiques du transformateur:

$$P_1 = 449 \text{ kW}$$

$$I_{LN}^2 R = 366 \text{ kW}$$

$$P_5 = 1\,500 \text{ kW}$$

ce qui donne les équations suivantes:

$$P_1 = I_{LN}^2 R + P_{we1} + P_{SE1}$$

$$P_5 = I_{LN}^2 R + P_{we1} \left(\frac{f_5}{f_1} \right)^2 + P_{SE1} \left(\frac{f_5}{f_1} \right)^{0,8}$$

En insérant les valeurs on obtient:

$$449 = 366 + P_{we1} + P_{SE1} \quad (4)$$

$$1\,500 = 366 + P_{we1} \times (250/50)^2 + P_{SE1} \times (250/50)^{0,8} \quad (5)$$

La résolution des équations (4) et (5) donne $P_{we1} = 39 \text{ kW}$ et $P_{SE1} = 44 \text{ kW}$

9.1.5 Dual frequency testing of HVDC transformers

The procedure is based on the difference in behaviour of eddy losses in windings and stray losses in structural parts as described in 9.1.1. Through the measurement at two frequencies it is possible to evaluate the division of eddy and stray losses according the procedure shown in 10.3.2 of IEC 61378-2. Analysis has shown that a reasonable accuracy for the division will be achieved if load loss measurements are made at two different frequencies which are sufficiently separated. If one measurement is made at power frequency, 50 Hz or 60 Hz, the second measurement shall be made at a frequency equal to or greater than 150 Hz. A voltage source for the second frequency measurement is normally available since the equipment for induced over-voltage test may be used. This procedure is not intended for use on transformers covered by IEC 61378-1, where a theoretical estimation of the distribution of the eddy losses is made.

The dual frequency procedure implies that:

- the result is based on well-established measurement techniques that lead to a division with reasonable accuracy;
- measurements in the kHz range are avoided;
- theoretical estimation is avoided.

Calculation example:

P_1 is the total load loss at 50 Hz

P_5 is the total load loss at 250 Hz

P_{WE1} is the eddy loss in windings at 50 Hz

P_{SE1} is the stray loss in structural parts at 50 Hz

$I_{LN}^2 R$ is the ohmic loss at rated current

I_v is the current at harmonic v

f is the frequency

Transformer data:

$$P_1 = 449 \text{ kW}$$

$$I_{LN}^2 R = 366 \text{ kW}$$

$$P_5 = 1\,500 \text{ kW}$$

giving the following equations:

$$P_1 = I_{LN}^2 R + P_{WE1} + P_{SE1}$$

$$P_5 = I_{LN}^2 R + P_{WE1} \left(\frac{f_5}{f_1} \right)^2 + P_{SE1} \left(\frac{f_5}{f_1} \right)^{0.8}$$

Inserting the values gives:

$$449 = 366 + P_{WE1} + P_{SE1} \quad (4)$$

$$1\,500 = 366 + P_{WE1} \times (250/50)^2 + P_{SE1} \times (250/50)^{0.8} \quad (5)$$

Solving equations (4) and (5) gives $P_{WE1} = 39 \text{ kW}$ and $P_{SE1} = 44 \text{ kW}$.

Estimation des pertes en service:

Spectre harmonique:

$\left(\frac{f_v}{f_1}\right)$	$\left(\frac{I_v}{I_{LN}}\right)$	$\left(\frac{f_v}{f_1}\right)^2$	$\left(\frac{f_v}{f_1}\right)^{0,8}$	$\left(\frac{I_v}{I_{LN}}\right)^2$
1	0,96	1	1	0,92
5	0,18	25	3,62	0,032
7	0,12	49	4,74	0,014
11	0,06	121	6,81	0,003 6
13	0,05	169	7,78	0,002 5
17	0,03	289	9,64	0,000 9
19	0,02	361	10,5	0,000 4

Pertes en service:

$$P_N = I_{LN}^2 R + P_{WE1} \times \sum_1^v \left(\left(\frac{I_v}{I_{LN}} \right)^2 \times \left(\frac{f_v}{f_1} \right)^2 \right) + P_{SE1} \times \sum_1^v \left(\left(\frac{I_v}{I_{LN}} \right)^2 \times \left(\frac{f_v}{f_1} \right)^{0,8} \right)$$

L'équation peut également être écrite de la manière suivante:

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

où F_{WE} et F_{SE} sont des facteurs d'accroissement tels que décrits dans la CEI 61378-2.

En insérant les valeurs on obtient:

$$P_N = 366 + 39(0,92 \times 1 + 0,032 \times 25 + 0,014 \times 49 + 0,003 6 \times 121 + 0,002 5 \times 169 + 0,000 9 \times 289 + 0,000 4 \times 361) + 44(0,92 \times 1 + 0,032 \times 3,62 + 0,014 \times 4,74 + 0,003 6 \times 6,81 + 0,002 5 \times 7,78 + 0,000 9 \times 9,64 + 0,000 4 \times 10,5) = 366 + 3,67 \times 39 + 1,17 \times 44 = 560 \text{ kW}$$

9.1.6 Transformateurs ayant plus d'une partie active dans la même cuve

Un transformateur de conversion pour applications industrielles peut par exemple loger dans la même cuve un autotransformateur de réglage (couplé à la ligne) qui alimente deux transformateurs abaisseurs à rapport fixe (couplés aux redresseurs).

Les enroulements de valve de ces deux transformateurs sont déplacés de 30° et chacun d'entre eux alimente un pont hexaphasé.

Chaque transformateur abaisseur est soumis à des harmoniques dus au fonctionnement hexaphasé (harmonique de rang = $6 \times k \pm 1$ avec $k = 1, 2, 3 \dots$).

Cependant les deux systèmes hexaphasés sont déphasés de 30° afin d'obtenir un fonctionnement dodécaphasé du côté ligne. Par conséquent, les harmoniques de l'autotransformateur correspondent au fonctionnement dodécaphasé (harmonique de rang = $12 \times k \pm 1$ avec $k = 1, 2, 3 \dots$).

Estimation of service losses:

Harmonic spectrum:

$\left(\frac{f_v}{f_1}\right)$	$\left(\frac{I_v}{I_{LN}}\right)$	$\left(\frac{f_v}{f_1}\right)^2$	$\left(\frac{f_v}{f_1}\right)^{0,8}$	$\left(\frac{I_v}{I_{LN}}\right)^2$
1	0,96	1	1	0,92
5	0,18	25	3,62	0,032
7	0,12	49	4,74	0,014
11	0,06	121	6,81	0,003 6
13	0,05	169	7,78	0,002 5
17	0,03	289	9,64	0,000 9
19	0,02	361	10,5	0,000 4

Service losses:

$$P_N = I_{LN}^2 R + P_{WE1} \times \sum_1^v \left(\left(\frac{I_v}{I_{LN}} \right)^2 \times \left(\frac{f_v}{f_1} \right)^2 \right) + P_{SE1} \times \sum_1^v \left(\left(\frac{I_v}{I_{LN}} \right)^2 \times \left(\frac{f_v}{f_1} \right)^{0,8} \right)$$

The equation may be written as:

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

where F^{WE} and F^{SE} are enhancement factors as described in IEC 61378-2.

Inserting the values gives:

$$P_N = 366 + 39(0,92 \times 1 + 0,032 \times 25 + 0,014 \times 49 + 0,003 6 \times 121 + 0,002 5 \times 169 + 0,000 9 \times 289 + 0,000 4 \times 361) + 44(0,92 \times 1 + 0,032 \times 3,62 + 0,014 \times 4,74 + 0,003 6 \times 6,81 + 0,002 5 \times 7,78 + 0,000 9 \times 9,64 + 0,000 4 \times 10,5) = 366 + 3,67 \times 39 + 1,17 \times 44 = 560 \text{ kW}$$

9.1.6 Transformers with more than one active part in the same tank

A converter transformer for industrial applications may, for example, contain in the same tank a regulating autotransformer (connected to the line) that feeds two fixed ratio step-down transformers (connected to the rectifiers).

The valve windings of these two transformers are displaced by 30° and each of them feeds a six-pulse bridge.

Each step-down transformer is subjected to harmonics due to six-pulse operation (harmonic order = $6 \times k \pm 1$, with $k = 1, 2, 3, \dots$).

However, the two six-pulse systems have a 30° displacement in order to give a twelve-pulse operation on the line side. Therefore, the harmonics in the autotransformer are those of 12-pulse operation (harmonic order = $12 \times k \pm 1$, with $k = 1, 2, 3, \dots$).

Le facteur d'accroissement des pertes par courants de Foucault pour les enroulements de l'autotransformateur est donc inférieur à celui des transformateurs abaisseurs, du fait de la suppression des harmoniques de 5^{ème} et de 7^{ème} rang.

Les facteurs d'accroissement des pertes parasites diffèrent également. Toutefois, seule la somme des pertes parasites dues à toutes les parties actives peut être déduite des mesures.

Il est raisonnable de supposer que chaque partie active génère une fraction des pertes parasites totales qui est proportionnelle au produit de sa puissance assignée et de son impédance de court-circuit (réduite).

Il n'est possible d'appliquer la CEI 61378-1, avec la modification ci-dessus, pour le calcul du facteur d'accroissement des pertes parasites, que lorsque le spectre de courant harmonique est spécifié pour tous les enroulements d'un transformateur ayant plus d'une partie active.

9.2 Essais thermiques

9.2.1 Généralités

La base de l'essai d'échauffement pour les transformateurs de conversion est de tenir compte des effets des harmoniques de courant sur les pertes par courants de Foucault et les pertes parasites en augmentant de manière appropriée les pertes et le courant d'essai sinusoïdal.

9.2.2 Calcul des courants d'essai et pertes pour les transformateurs industriels

En complément des descriptions déjà fournies dans la CEI 61378-1, il est important de noter que la prise en compte de transformateurs ayant plus d'une partie active peut soulever les problèmes suivants:

- du fait de la suppression des harmoniques, une partie active peut avoir un courant assigné et un facteur d'accroissement F_{WE} bien inférieur à ceux des autres, ce qui entraîne une surcharge de cette partie active au cours de l'essai d'échauffement;
- l'intercouplage des enroulements appartenant à des parties actives différentes affecte, par résistance, les mesures d'échauffement.

Il convient de résoudre ces deux problèmes par accord entre le fabricant du transformateur et le client, lors de la conclusion du contrat.

9.2.3 Calcul des pertes et courants d'essai pour les transformateurs CCHT

Les pertes dues à la charge en service sont estimées sur la base de la procédure décrite en 9.1.5.

Pour simuler les pertes dues à la charge en service pendant l'essai de cycle thermique, on utilise un courant de charge équivalent qui est dérivé des résultats des mesures de l'essai à double fréquence.

Si l'on prend l'exemple de calcul de 9.1.5

Les pertes dues à la charge à la fréquence fondamentale: $P_1 = 449 \text{ kW}$ et

Les pertes dues à la charge en service: $P_N = 590 \text{ kW}$

De ce qui précède on obtient le courant d'essai équivalent:

$$I_{eq} = I_1 \times \left(\frac{560}{449} \right)^{0,5} = 1,12 \times I_1 \text{ ampères}$$

Voir l'équation de 10.5 de la CEI 61378-2.

The eddy losses enhancement factor for the autotransformer windings is then lower than those of the step down transformers because of the cancellation of the 5th and the 7th harmonics.

The stray losses enhancement factors also differ. However, only the sum of the stray losses due to all active parts can be deduced from the measurements.

It is reasonable to assume that each active part produces a portion of the total stray losses that is proportional to the product of its rated power and short-circuit impedance (in p.u.).

Only when the harmonic current spectrum is specified for all the windings in a transformer having more than one active part, is it possible to apply IEC 61378-1 with the modification above for the computation of stray losses enhancement factor.

9.2 Thermal tests

9.2.1 General

The basis of the temperature rise test for converter transformer is to take into account the effect of current harmonics on eddy and stray losses by properly increasing the sinusoidal test loss and current.

9.2.2 Calculation of test currents and losses for industrial transformers

In addition to that already described in IEC 61378-1, it is important to note that, when transformers with more than one active part are considered, the following problems may arise:

- because of harmonic cancellation, one active part may have rated current and F_{WE} significantly lower than the others and this may result in an overload of this active part during the temperature rise test;
- the interconnection of windings belonging to different active parts affects the temperature rise measurement by resistance.

Both problems should be solved by agreement between the transformer manufacturer and the customer at the contract stage.

9.2.3 Calculation of losses and test currents for HVDC transformers

The service load losses is estimated through the procedure described in 9.1.5.

In order to simulate the service load loss during the heat run test, an equivalent load current is used which is derived from the result of the dual frequency measurements.

Taking the calculation example in 9.1.5

Load loss at fundamental frequency: $P_1 = 449$ kW and

Service load loss: $P_N = 590$ kW

From the above, the equivalent test current will be:

$$I_{eq} = I_1 \times \left(\frac{560}{449} \right)^{0.5} = 1.12 \times I_1 \text{ amperes}$$

See the equation given in IEC 61378-2, 10.5.

9.2.4 Considérations relatives au point chaud et aux limites des essais thermiques

La CEI 61378-1 et la CEI 61378-2 définissent les valeurs d'un courant sinusoïdal efficace à une fréquence industrielle (dans un enroulement particulier) qui produit des pertes totales équivalentes à celles d'une charge harmonique de l'enroulement. Les pertes par courants de Foucault, avec des harmoniques, augmentent dans les zones extrêmes de l'enroulement et un essai utilisant un courant sinusoïdal est incapable de reproduire les modèles de champs de fuite qui apparaissent en service. En résumé, il convient donc de noter que ce courant d'essai équivalent ne produit pas dans l'enroulement la répartition locale des pertes qui apparaîtra dans les conditions de charge harmonique.

L'attention est particulièrement attirée sur le fait que la température de point chaud et sa localisation, déterminées par un essai d'échauffement avec un courant sinusoïdal, ne sont pas nécessairement les mêmes que celles qui seront rencontrées pendant le service en conversion. Par conséquent, du fait de la procédure d'essai, il convient d'éviter, au cours de l'essai, toutes contraintes thermiques au-delà de celles qui apparaissent en service. L'utilisation de capteurs à fibres optiques à l'intérieur des enroulements devrait constituer un outil utile pour la vérification du comportement thermique de l'appareil soit au cours de l'essai thermique, soit en service à vide.

10 Noyau et aspects liés au niveau de bruit

10.1 Noyau

10.1.1 Caractéristiques de construction

La conception des circuits magnétiques est généralement la même pour les transformateurs de conversion et les transformateurs de puissance alternative conventionnels. Il peut être utilisé des constructions de type à noyau et de type cuirassé, en triphasé et monophasé, incorporant une des multiples dispositions habituelles de culasses et de colonnes bobinées et non bobinées, comme décrit dans la CEI 60076-8.

Le type et la conception du noyau sont généralement décidés par le fabricant du transformateur. Le but est de réaliser la meilleure conception technique possible. Cependant la conception du noyau peut également être influencée par les spécifications de l'acheteur, par exemple pour des raisons de compatibilité ou d'interchangeabilité avec des équipements existants.

Les matériaux du noyau, les configurations des colonnes et des culasses, les structures de serrage et de support, les systèmes d'isolation du noyau, les mesures de contrôle du flux, etc., suivent en général l'état de l'art applicable aux transformateurs de puissance en courant alternatif.

10.1.2 Effet des harmoniques

Les tensions du côté ligne et du côté valve sont de forme sinusoïdale ou proches de fréquences industrielles pour les valves commutées par le réseau, c'est-à-dire les valves non extinguisibles. La tension du côté ligne est supposée être sinusoïdale, et ainsi la tension du côté valve peut s'écarter de la sinusoïdale par la chute de la tension interne du transformateur uniquement.

Lorsque la tension est de forme sinusoïdale, la majeure partie du flux magnétique aura également une allure sinusoïdale, donnant lieu à des pertes à vide et des courants magnétisants similaires à ceux qui sont générés en fonctionnement normal avec courant alternatif. L'effet du courant de polarisation continue sur les courants du côté ligne et/ou du côté valve est traité de manière un peu plus détaillée dans 10.1.3.

9.2.4 Considerations on the hot spot and limits of the thermal tests

IEC 61378-1 and IEC 61378-2 define the value of an r.m.s. sinusoidal current with power frequency (in a particular winding) that produces the total losses equivalent to that when the winding is harmonically loaded. Eddy losses, with harmonics, increase in the winding end regions and a test with sinusoidal current is not able to reproduce the leakage field patterns that occur in service. In summary, therefore, it should be noted that this equivalent test current does not produce the local loss distribution within the winding that will occur under harmonically-loaded conditions.

Particular attention is drawn to the fact that the hot spot temperature and its location, determined through a temperature rise test with sinusoidal current, is not necessarily the same that will be encountered during converter service. Therefore, because of the test procedure, care should be taken at the test stage to prevent thermal stresses beyond those occurring in service. The use of fiber optic sensors inside the windings should be an useful tool for checking the thermal behaviour of the unit either during the thermal test, or at on-load service.

10 Core and sound aspects

10.1 Core

10.1.1 Constructional features

The design of magnetic circuits is generally the same for converter transformers and conventional a.c. power transformers. Three-phase and single-phase core-form and shell-type constructions may be used, incorporating one of several customary arrangements of yokes and wound and unwound limbs as described in IEC 60076-8.

The type of core and core design are generally decided by the transformer manufacturer. The aim is to achieve the best technical design. However, the core design may also be influenced by the purchaser's specification, for example for reasons of compatibility or interchangeability with existing equipment.

The core materials, limb and yoke configurations, clamping and support structures, core insulation systems, flux control measures, and so forth, usually follow a.c. power transformer technical practices.

10.1.2 Effect of harmonics

The line-side and valve-side voltages are sinusoidal or close to sinusoidal power frequency for line commutated valves, i.e. non-extinguishing valves. The voltage on the line side is assumed to be sinusoidal and thus the voltage on the valve side may deviate from sinusoidal by the internal voltage drop in the transformer only.

With a sinusoidal voltage, the major magnetic flux will also have a sinusoidal course resulting in no-load loss and magnetizing currents similar to the ones developing in normal a.c. operation. The effect of a d.c. bias current in the line-side and/or valve-side currents are discussed a little more in detail in 10.1.3.

Pour les valves à commutation forcée, la tension appliquée peut s'écarter d'une forme sinusoïdale vraie et les harmoniques de la tension auront un effet sur le résidu harmonique du flux magnétique à prendre en compte.

10.1.3 Effet de la tension de polarisation continue

Plusieurs sources peuvent être à l'origine des faibles courants de polarisation continue circulant dans le ou les enroulements de valve. De légères différences dans le fonctionnement des valves peuvent donner lieu à de faibles courants résiduels, de nature continue, circulant dans le ou les enroulements de valve. Des différences de potentiel entre le neutre du côté ligne et le point de mise à la terre de l'enroulement du côté ligne qui est couplé en étoile, donneront lieu à une polarisation continue dans l'enroulement de ligne. Ces différences de potentiel peuvent avoir pour origine le point de mise à la terre adjacent du réseau continu, lorsqu'il transporte du courant, comme par exemple un réseau avec retour à la terre.

La polarisation continue aura un effet sur le flux magnétique par composante unipolaire ou continue dans le flux. En général, un petit décalage du flux magnétique aura un effet limité sur les pertes à vide uniquement. Les deux facteurs principaux des pertes à vide sont les pertes par hystérésis et les pertes dues aux courants circulant dans les tôles magnétiques du noyau, induites par la remagnétisation qui n'est pas affectée par le décalage du flux.

Un autre effet de la polarisation continue est l'augmentation du niveau de bruit à partir d'une saturation unilatérale des tôles magnétiques du noyau.

10.1.4 Résumé

La différence principale entre fonctionnement en convertisseur et fonctionnement conventionnel en courant alternatif est la présence d'une polarisation continue que le concepteur du transformateur ne peut maîtriser. Une meilleure maîtrise et une réduction de la polarisation continue sont par conséquent primordiales.

10.2 Niveau de bruit

10.2.1 Généralités

Il est de plus en plus exigé que les niveaux de bruit des équipements en service n'atteignent pas des valeurs qui dépassent les niveaux acceptables du point de vue environnemental.

Dans la pratique, ces niveaux sont en général imposés par les autorités gouvernementales et autres autorités statutaires. Ils s'appliquent principalement au poste de conversion dans son ensemble et non à des éléments individuels de l'installation. Les niveaux de bruit peuvent faire référence à un ou plusieurs points de mesure à la périphérie de l'installation, en général à sa frontière.

Par conséquent, lorsqu'il est prescrit un niveau de bruit à un poste de conversion, outre les autres éléments individuels de l'installation, il faut dériver pour chaque transformateur une valeur de niveau de bruit. La valeur obtenue représentera le niveau de bruit admissible maximal du transformateur, autorisé en service.

Contrairement aux transformateurs de puissance conventionnels, fonctionnant en courant alternatif, le niveau de bruit des transformateurs de conversion dépend de ce qui suit:

- En fonctionnement, un transformateur de conversion peut faire l'objet d'une large gamme de tensions et de courants harmoniques de diverses grandeurs, outre le courant et la tension de polarisation continue.
- La présence dans l'appareil de transducteurs et de bobines d'absorption.

For forced commutated valves, the applied voltage may deviate from a true sinusoidal shape and the harmonics in voltage will have an influence on the harmonic content of the magnetic flux which has to be considered.

10.1.3 DC bias voltage effect

A small d.c. bias current circulating in the valve winding(s) may have its origin from several different sources. Slight differences in the valve operation can give rise to small residual currents of d.c.-nature through the valve winding(s). Differences in potential between line-side neutral and the earthing point for star connected line-side windings will result in a d.c.-bias in the line winding. Such potential differences may have their origin in adjacent current carrying the earthing point of the d.c. system, e.g. a system with earth return.

The d.c.-bias will have an influence on the magnetic flux by a unipolar or d.c. component in the flux. In general, a small offset of the magnetic flux will have a limited effect on the no-load loss only. The two main factors in no-load loss are hysteresis loss and the loss from circulating currents in the core lamination induced by the re-magnetization which is unaffected by the flux offset.

Another effect of d.c.-bias is increased sound level from single-sided saturation of the core lamination.

10.1.4 Summary

The dominant difference between converter operation and conventional a.c.-operation is the presence of a d.c.-bias, which is outside the transformer designer's control. Improved control and reduction of the d.c.-bias is therefore important.

10.2 Sound

10.2.1 General

It is increasingly required that equipment sound levels in service should not attain values that exceed acceptable environmental levels.

In practice, these levels are usually imposed by governmental and other statutory authorities. They usually apply to the overall converter station and not to the individual plant items. The sound levels may refer to one or several measurement points around the periphery of the installation, normally the boundary.

Therefore, when an overall sound level is prescribed for a converter station, a sound level value shall be derived for each transformer in addition to the other individual plant items. The value obtained will represent the transformer maximum permissible sound level allowed in service.

Unlike conventional power transformers in a.c. operation, the sound level of converter transformers depends on the following.

- In operation, a converter transformer may be subject to a wide range of harmonic voltages and currents of various magnitudes, in addition to a d.c. bias voltage and current.
- The presence in the unit of transducers and interphase transformers.

- En spécifiant un niveau de bruit maximal admissible sur le site dans son ensemble cela pose le double problème de la détermination de la contribution admissible réelle d'un transformateur et celui de savoir si cette valeur ne sera pas ou n'a pas été dépassée.

A l'heure actuelle, il n'y a pas de méthode d'essai normalisée permettant de déterminer la caractéristique de bruit en charge d'un transformateur de conversion sur le site, et de la comparer à une valeur limite de bruit spécifiée sur le site. La pratique normalisée est actuellement que les acheteurs spécifient un niveau de bruit mesuré qui sera obtenu en usine lors d'un essai à vide assigné à la fréquence fondamentale.

10.2.2 Considérations de base

10.2.2.1 Sources sonores

Le bruit émis par les transformateurs conventionnels est principalement dû aux effets de magnétostriction dans le noyau et les écrans magnétiques feuilletés. Il existe une composante sonore supplémentaire, moins importante mais cependant significative, due aux forces électromagnétiques présentes dans les enroulements, la cuve et autres parties mécaniques, y compris les écrans non magnétiques.

La composante sonore de la magnétostriction dépend de plusieurs facteurs, notamment l'amplitude et la fréquence d'induction. D'autres détails de la conception du noyau tels que les caractéristiques noyau-plateau, les proportions et la masse du noyau, la construction et la qualité de construction du noyau, les méthodes et pressions de serrage du noyau, sont également des facteurs de contribution significatifs. Etant donné que la magnétostriction est indépendante du sens d'orientation positive ou négative, la fréquence fondamentale du bruit est égale à deux fois la fréquence de la tension appliquée.

Pour une conception donnée, la magnétostriction est fonction de la valeur instantanée de l'induction. Cela signifie que le niveau de bruit dépend du degré de magnétisation. Un transformateur fonctionnant en surexcitation émettra un bruit plus élevé que s'il fonctionne en excitation normale.

Dans un transformateur de conversion ayant un léger courant de polarisation continue, la courbe temps/induction va passer d'une allure symétrique autour d'une valeur zéro à une augmentation de l'amplitude d'induction dans un sens et une réduction de cette amplitude dans l'autre sens. Le décalage du modèle de flux sera également reflété sur le modèle temps – magnétostriction et par conséquent également sur le modèle de bruit. En général, pour une polarisation continue, il y aura augmentation du niveau de bruit.

Le bruit imputable aux forces électromagnétiques résulte de la charge. Ces forces sont proportionnelles au carré des courants et la fréquence de bruit et les amplitudes qui en résultent sont proportionnelles au carré des vibrations générées par ces forces. Dans les transformateurs de puissance ordinaires en fonctionnement en courant alternatif, la composante de bruit due au courant de charge sera fondamentalement de la même fréquence que le bruit dû au noyau, mais cependant elle sera inférieure au bruit du noyau. Par conséquent, cette composante de bruit ne contribuera pas au niveau de bruit total.

En fonctionnement en conversion, avec un degré élevé d'harmoniques de courant, ces derniers contribueront aux forces électromagnétiques. Les fréquences des composantes de bruit générées par les harmoniques seront dans une plage de sensibilité plus grande pour l'oreille humaine, et elles seront par conséquent perceptibles à l'écoute.

- In specifying a maximum permissible overall site sound level, there is the dual problem of determining the actual permissible contribution from a transformer and proving this value will not or has not been exceeded.

At present, there is no standard test procedure for determining the on-load sound characteristic of a converter transformer at site for comparison with a specified site sound-limiting value. The present standard practice is for purchasers to specify a measured sound level that will be obtained in the factory during a rated no-load test at the fundamental frequency.

10.2.2 Fundamental considerations

10.2.2.1 Sound sources

The sound emitted by conventional transformers is mainly due to magnetostriction effects in the core and laminated flux shields. There is a smaller but significant additional sound component that is caused by electromagnetic forces occurring in the windings, tank and other structural parts, including non-magnetic flux shields.

The magnetostriction sound component depends on several factors, principally the magnitude and frequency of the magnetic flux density. Other details of core design such as the core-plate characteristics, core proportions and mass, core construction and build quality, and core clamping methods and pressures, also lead to significant contributory factors. As the magnetostriction is independent of the flux direction in terms of positive or negative orientation, the fundamental sound frequency is twice the frequency of the applied voltage.

For a given design, the magnetostriction is a function of the instantaneous value of the magnetic flux density. This means that the sound level depends on the degree of magnetization. A transformer operating under overexcitation will emit a higher sound than operation under normal excitation.

In a converter transformer with a slight d.c.-bias, current will shift the time-flux density curve from symmetric around a zero value to increased flux density amplitude in one direction and reduced flux density amplitude in the other direction. The shift in flux pattern will also be reflected in the time-magnetostriction pattern and thereby also the sound pattern. In general, the sound level will be increased for a d.c.-bias.

The sound attributable to electromagnetic forces is the result of load. These forces are proportional to the square of the currents and the consequential sound frequency and amplitudes are proportional to the square of the vibrations caused by these forces. In normal power transformers under a.c.-operation, the sound component from the load current is basically of the same frequency as the sound from the core, but smaller than the core sound. This sound component will therefore not contribute to the total sound level.

In converter operation with a high degree of current harmonics, the harmonics will contribute to electromagnetic forces. The frequencies of the sound components generated by the harmonics will be in a range of greater sensitivity to the human ear and they will therefore be perceivable to the listener.

10.2.2.2 Mesures du bruit

Les problèmes auxquels sont confrontés les acheteurs et les fournisseurs en ce qui concerne les niveaux de bruit des transformateurs de conversion sont de deux types: soit de pouvoir mesurer et quantifier la quantité de bruit émanant d'un transformateur de conversion en charge, soit d'être capable de prédire son niveau de bruit en service sur la base des essais de niveau de bruit effectués en usine. Comme indiqué précédemment, ce problème est compliqué par:

- la difficulté d'isoler la source des bruits générés par le transformateur de conversion sur le site, des autres bruits environnants, et
- la difficulté de prédire les performances de bruit en charge, en service, d'un transformateur de conversion sur la base des mesures de niveau de bruit effectuées en usine lors d'essais à vide. En d'autres termes, être capable de réaliser un accroissement du niveau de bruit à vide en usine pour tenir compte des contributions de bruit supplémentaires dues au fonctionnement à la tension et au courant assignés en charge, sur le site, qui résulteront des harmoniques et de toute polarisation de tension continue.

A l'heure actuelle, la méthode couramment utilisée pour comparer les quantités de bruit est la méthode de la «puissance acoustique». Cette méthode fournit tout simplement une valeur de référence de la puissance acoustique d'une «source» de bruit. Aucune référence supplémentaire n'est requise, comme par exemple, la distance ou d'autres sources de bruit parasites.

Il n'est pas possible de mesurer directement la «puissance acoustique». Elle ne peut qu'être déduite des mesures de «pression acoustique» ou «d'intensité acoustique». A l'heure actuelle, presque toutes les mesures de bruit sont effectuées en mesurant la «pression acoustique». Celle-ci ne fournit qu'une indication de l'amplitude de «puissance acoustique». Cependant, «l'intensité acoustique» fournit des indications relatives à l'amplitude et au sens de la «puissance acoustique»: pour cette raison, cette méthode pourrait être recommandée pour vérifier les performances acoustiques sur le site.

Les deux méthodes de mesure font référence à la CEI 60076-10 à laquelle il convient de continuer de se référer.

11 Spécification du transformateur

11.1 Généralités

Il incombe aux acheteurs d'élaborer les spécifications du transformateur. L'objectif de la spécification du transformateur est de définir avec précision et sans aucune ambiguïté l'ensemble des exigences techniques et contractuelles requises pour l'achat d'un transformateur auprès d'un fournisseur. En règle générale la spécification est produite par l'acheteur, cependant si cela n'est pas possible, une spécification convenable peut être obtenue auprès d'un fournisseur ou d'une source indépendante telle qu'un consultant ou autre prestataire spécialisé. Une autre solution consiste pour l'acheteur à élaborer cette spécification en collaboration avec l'une des parties ci-dessus.

Le présent article met l'accent sur certaines des fonctionnalités les plus importantes qui doivent être prises en compte et incluses dans une spécification de transformateurs de conversion industriels et CCHT. Il n'est pas possible de couvrir tous les aspects impliqués. Dans de telles situations, il est recommandé aux acheteurs potentiels de discuter avec leurs fournisseurs éventuels ou autres prestataires spécialisés en ce qui concerne les problèmes qu'ils seraient incapables de résoudre ou de spécifier.

La plupart des points soulevés seront liés au site et au réseau, cependant, par ailleurs, de nombreux aspects auront déjà été traités par des normes CEI, nationales ou industrielles. Il convient dans toute la mesure du possible de les utiliser car elles offrent un certain niveau de garantie de performance et d'essais en service éprouvés.

10.2.2.2 Sound measurement

The problem faced by purchasers and suppliers regarding converter transformer sound levels is twofold: either to be able to measure and quantify the amount of sound emanating from a converter transformer on-load, or, to be able to predict its sound level in service on the basis of sound level tests at the factory. As previously indicated, this problem is complicated by:

- the difficulty in isolating the source of the converter transformer-produced sound at site from other neighbouring sounds; and
- the difficulty in predicting the in-service, on-load sound performance of a converter transformer based on sound level measurements made at the factory during no-load tests. That is, being able to enhance no-load sound level measured at the factory to take into account the additional sound contributions due to operation at rated voltage and current on-load at site that will occur as a result of harmonics and any d.c. voltage bias.

The present widely prescribed method used to compare sound quantities is the “sound power”. This simply provides a reference value of the sound power output of a “sound source”. No additional reference is required, for instance, distance or other interfering sound sources.

Measurement of “sound power” cannot be made directly. It can only be derived from either “sound pressure” measurements or “sound intensity” measurements. At present, virtually all sound measurements are made by measuring “sound pressure”. This only provides an indication of ‘sound power’ magnitude. However, “sound intensity” provides indications of both “sound power” magnitude and direction and for this reason, would be the method recommended for verifying acoustic performances at site.

Both measurement methods are referred to in IEC 60076-10 to which further reference should be made.

11 Transformer specification

11.1 General

Transformer specifications are the responsibility of purchasers. The purpose of a transformer specification is to define precisely and unambiguously to a supplier all technical and contractual requirements needed to purchase a transformer. A purchaser normally produces the specification, but if this is not possible, a suitable specification could be obtained from a supplier or from an independent source such as a consultant or other specialist provider. Alternatively, the purchaser in conjunction with either could derive the specification.

This clause highlights some of the important features that need to be considered for inclusion in a specification for HVDC and industrial converter transformers. It is not possible to cover all aspects involved. In these cases, prospective purchasers are advised to confer with their potential suppliers or other specialist providers on any issues they are unable to resolve or specify.

Most of the considerations involved will be site- and network-related, but in addition many aspects will already be the subject of IEC, national or industry standards. These should be used as far as possible since they offer some guaranteed level of proven service performance and test.

Outre l'emploi de normes reconnues, il est essentiel d'utiliser des matériaux et des composants éprouvés, ainsi que des méthodes et des procédures d'assurance qualité exigeantes pendant la fabrication, les essais et la mise en marche. Lorsqu'il est adopté des dérogations par rapport aux pratiques normalement acceptées et éprouvées, il est impératif d'examiner et d'évaluer soigneusement toute innovation. Il faut à tout moment garder à l'esprit que les spécifications ne sont pas constantes, ce qui signifie qu'elles sont soumises à des modifications externes. Elles sont influencées par des changements économiques, techniques, politiques et environnementaux et encore plus par l'expérience passée. Même dans le cas d'achats répétés, il convient de réviser la spécification initiale avant de la réutiliser. Il convient toujours de saisir toute occasion pour améliorer une spécification. La force première est souvent l'expérience passée dans les domaines de la conception et de la fabrication, mais également en service. En outre, depuis la dernière spécification, il est possible que de nouvelles améliorations techniques aient été introduites ou peut-être des exigences réglementaires ou environnementales. Il convient d'évaluer de telles modifications avant de rééditer une spécification.

11.2 Spécification technique contre spécifications fonctionnelles

11.2.1 Généralités

Il existe deux types de spécifications généralement utilisées. Elles sont généralement désignées sous les termes «spécifications techniques» et les «spécifications fonctionnelles». Les acheteurs doivent décider du type de spécification qu'ils souhaitent utiliser et leur choix est presque entièrement dicté par l'importance des ressources techniques dont ils disposent, que ce soit en interne ou en externe.

11.2.2 Spécifications techniques

Une spécification technique ne contient pas uniquement des descriptions des principales caractéristiques du transformateur requis, mais également des informations d'une teneur considérable, détaillant les exigences techniques des parties principales et auxiliaires du transformateur. De telles spécifications contiendront des exigences détaillées couvrant la conception et les études du transformateur, les montages, essais, mise en service et mise en marche. Très souvent, le but est de spécifier le transformateur à un degré tel que le produit n'est pas simplement décrit mais prescrit, ce qui signifie qu'il y a peu de place pour d'éventuelles variations par rapport à ce qui a été détaillé. Ces spécifications résultent en général d'une expérience poussée des pratiques et performances en service de transformateur en courant alternatif, et comportent également des clauses couvrant les aspects liés au transformateur de courant continu. L'utilisation de ce type de spécification a décliné au cours de la dernière décennie et a été remplacée par les spécifications fonctionnelles pour tout ce qui concerne les détails internes du transformateur.

11.2.3 Spécifications fonctionnelles

La spécification fonctionnelle décrit les attentes du client en matière de performance du transformateur. Elle doit également comprendre la description technique des interfaces mécaniques et électriques avec les systèmes externes, comme par exemple les tensions, les caractéristiques assignées, les impédances, les pertes, etc.

11.3 Spécifications de transformateurs CCHT

Les technologies et les matériaux utilisés pour la conception et la fabrication des transformateurs CCHT sont dans une très large mesure les mêmes que ceux utilisés pour les transformateurs CAHT. Les principales différences résultent des caractéristiques de fonctionnement différentes du courant de charge, c'est-à-dire de la présence de résidus harmoniques plus élevés, ainsi que de l'influence de champs électriques alternatifs et continus combinés sur les caractéristiques diélectriques intrinsèques de l'isolation.

In addition to using recognized standards, the use of proven materials and components together with the use of exacting quality assurance methods and procedures throughout the manufacture, test and putting into service are essential. When deviations from normal accepted and proven practices are adopted, careful investigation and assessment of any innovation are imperative. It needs to be remembered at all times that specifications are not constant, that is, they are subject to external changes. They are influenced by economic, technical, political and environmental changes and not least by past experience. Even in the case of duplicate purchases, the original specification should be reviewed before being used again. The opportunity should always be taken to improve a specification. The driving force is often past experience in design and manufacturing as well as in service experience. In addition, since the last publication, new technical developments may have been introduced or perhaps statutory or environmental requirements. Changes such as these should be assessed before reissuing a specification.

11.2 Technical specification versus functional specifications

11.2.1 General

There are two types of specification in general use. They are generally referred to as a “technical specification” and a “functional specification”. Purchasers have to decide which type of specification they wish to use and their choice is dictated almost entirely by the depth of technical resources they have available, either in-house or from an external resource.

11.2.2 Technical specifications

A technical specification not only contains descriptions of the principal characteristics of the required transformer but also considerable technical content detailing the engineering requirements of the main and subsidiary parts of the transformer. Such a specification will contain detailed requirements covering transformer design and engineering, fittings, testing, commissioning and setting to work. The aim in many cases is to specify the transformer to such a degree that the product is not merely described but prescribed, that is, there is little room for variation from what has been detailed. Such specifications are usually derived from extensive experience of a.c. transformer practice and service performance with additional clauses to cover d.c. aspects. The use of this type of specification has declined in the last decade and been replaced by functional specifications as far as internal details of the transformer are concerned.

11.2.3 Functional specifications

The functional specification is the description of the customer's expectation regarding the transformer performance. It also shall include the technical description of the mechanical and electrical interfaces to external system, for example, voltage, ratings, impedances, losses etc.

11.3 HVDC transformer specifications

The technologies and materials used to design and manufacture HVDC transformers are very largely the same as those used for HVAC transformers. The main differences occur as a result of the different operating characteristics of the load current, that is, the presence of a much higher harmonic content and also the influence of combined a.c. and d.c. electric fields on the intrinsic dielectric characteristics of insulation.

Les paragraphes 11.5 et 11.8 énumèrent certaines des informations dont il convient de tenir compte lors de l'élaboration d'une spécification de transformateur CCHT. Le paragraphe 11.5 traite des informations que le fournisseur du transformateur doit remettre pour permettre à l'acheteur ou au concepteur du système de vérifier la conformité à la spécification et d'intégrer correctement le transformateur dans la conception de l'installation dans son ensemble. Le paragraphe 11.8 contient les informations à fournir par le concepteur du système ou l'acheteur pour permettre au fournisseur du transformateur de remettre une conception correcte.

Les exigences énumérées dans ces deux paragraphes constituent les exigences minimales dont il convient de tenir compte pour rédiger une spécification d'application de transformateur CCHT. Les données dans ces deux paragraphes s'inspirent d'une gamme d'applications réelles et peuvent par conséquent être utilisées comme guides pour la rédaction d'une spécification de transformateur CCHT. Outre les données qui sont par nature d'une nécessité générale et applicables à toutes les installations, il y aura également des données qui sont habituellement spécifiques à l'acheteur ou à l'installation. Celles-ci n'ont pas été incluses et il convient de les ajouter aux exigences énumérées dans ces sections.

Les données indiquées concernent à la fois les aspects courant alternatif et courant continu des transformateurs de conversion. Cependant, les aspects liés au courant alternatif correspondent aux exigences d'un transformateur de courant alternatif conventionnel et ne sont pas approfondis outre mesure.

Il convient que les acheteurs et les fournisseurs soient conscients du fait que certains éléments liés au courant continu doivent faire l'objet d'une attention particulière.

11.4 Notes et commentaires relatifs aux éléments des spécifications à fournir séparément par l'acheteur et le fournisseur

Les notes et commentaires de 11.5 constituent un guide décrivant les éléments à prendre en compte individuellement par l'acheteur/concepteur du système et par le fournisseur.

Dans un certain nombre de cas, des discussions approfondies sont nécessaires entre l'acheteur et le fournisseur pour s'assurer que la conception est conforme aux conditions en service. Outre les essais en usine du transformateur, une démonstration par calcul peut être appropriée. Il peut être fait une distinction entre les conditions d'essai pour la mesure des paramètres garantis et les conditions de performance en service réel. Il convient que les spécifications finalement convenues soient claires sur ces points, notamment en ce qui concerne les pertes qui ont des implications à la fois économiques et d'intégrité opérationnelle.

11.5 Informations exigées du fournisseur

11.5.1 Description générale

Le fournisseur remettra normalement une description générale des équipements proposés, en indiquant l'approche conceptuelle de base, les essais proposés, etc., en réponse aux exigences de l'acheteur.

NOTE Il convient que le fournisseur remette une description des équipements proposés, de l'approche conceptuelle et des procédures d'essai. Ceci est d'autant plus important lorsqu'il existe d'exigences spéciales telles que des conceptions à enroulements multiples et des conditions de service particulières telles que des tensions entre brins élémentaires de conducteurs en fonctionnement en conversion. Il est essentiel que l'offre du fournisseur indique clairement à l'acheteur que les éventuelles exigences particulières sont remplies.

11.5.2 Données de performance

Une garantie de pertes à vide est normalement fournie, mais il convient que ces pertes soient clairement qualifiées en termes de conditions de tension aux bornes:

Subclauses 11.5 and 11.8 list some of the information that should be considered when compiling a HVDC transformer specification. Subclause 11.5 covers information to be provided by the transformer supplier to enable the purchaser or system designer to check compliance with the specification and to correctly integrate the transformer into the overall installation design. Subclause 11.8 consists of information that should be provided by the system designer or purchaser to enable the transformer supplier to provide the correct design.

The requirements listed in these two subclauses represent the minimum that should be considered in the preparation of a specification for a HVDC transformer application. The data in both subclauses has been distilled from a range of actual applications and can, therefore, be used as a guide to the preparation of a HVDC transformer specification. In addition to the data which is by necessity, general in nature and applicable to all installations, there will also be data of the kind that is usually purchaser- or installation-specific. This has not been included and should be added to the requirements listed in these sections.

The data listed relates to both a.c. and d.c. aspects of converter transformers. However, the a.c.-related aspects are in line with the requirements for a conventional a.c. transformer and are not expanded upon.

Purchasers and suppliers should be aware that certain d.c. related items need special consideration.

11.4 Notes and comments on specification items to be provided individually by purchaser and supplier

The notes and comments are provided in 11.5 as a guide to the considerations to be made individually by the purchaser/system designer and by the supplier.

In a number of cases, there is a need for detailed discussions between the purchaser and the supplier to provide the necessary confidence that the design meets the service conditions. In addition to factory testing of the transformer, demonstration by calculation may be appropriate. A distinction may be drawn between test conditions for the measurement of guaranteed parameters and the actual service performance conditions. The finally agreed specification should be clear on these points, particularly with respect to losses which have both economic and operating integrity considerations.

11.5 Information to be provided by the supplier

11.5.1 General description

The supplier will normally provide a general description of the equipment offered, indicating the basic design approach, testing proposals, etc. in response to the purchaser's requirements.

NOTE The supplier should provide a description of the equipment proposed, design approach and testing procedures. This is particularly important where there are special requirements such as multiple winding designs and special service conditions such as conductor inter-strand voltages in converter operation. It is essential that the supplier's submission gives a clear indication to the purchaser that any special requirements are being met.

11.5.2 Performance data

A no-load loss guarantee is normally given, but this should be clearly qualified in terms of the terminal voltage conditions:

- pertes dues à la charge:
 - position de prise;
 - caractéristiques assignées;
 - température de référence.

Comme pour les pertes à vide, il convient que la garantie des pertes dues à la charge soit qualifiée en termes de conditions de charge. Si des garanties particulières de pertes en service sont exigées, il est nécessaire de spécifier le courant de charge en service supposé.

- pertes dues au réfrigérant;
- impédances directes:
 - position de prise;
 - paire d'enroulements;
 - tolérances spéciales;
 - impédances homopolaires;
 - conditions d'essai en usine/de service.

Il convient d'indiquer les impédances garanties entre paires d'enroulements, ainsi que les conditions de charge des enroulements lorsqu'il existe plusieurs combinaisons de paires d'enroulements. Il est également recommandé d'indiquer clairement la manière dont les impédances effectives en service doivent être démontrées. Il convient d'indiquer les tolérances applicables aux variations d'impédance entre phases ou entre transformateurs pour chaque position de prise (voir la CEI 61378-2):

- rapport de transformation des enroulements:
 - position de prise;
- échauffements:
 - température moyenne et température de point chaud de l'enroulement.

En général les transformateurs CCHT font l'objet d'essais d'échauffement et de courants de charge de la même manière que ceux qui sont appliqués à d'autres transformateurs de puissance de grande taille, en utilisant la méthode d'essai de court-circuit. L'échauffement garanti est normalement donné en supposant des conditions de service spécifiées et celles-ci ne peuvent pas être obtenues par des essais en usine. Par conséquent il faut inclure et convenir avec l'acheteur, à la conclusion du contrat, des tolérances applicables aux niveaux garantis:

- niveau de bruit:
 - transformateur;
 - réfrigérant.

Les niveaux de bruit mesurés lors des essais en usine ne seront pas les mêmes que ceux qui apparaissent en service. Par conséquent, il convient que toute garantie de niveau de bruit applicable aux conditions de bruit en charge sur le site indique les conditions de service supposées ainsi que la base de toute marge convenue avec l'acheteur à la signature du contrat afin de déterminer le niveau de bruit en service.

11.5.3 Caractéristiques supplémentaires

- Noyau:
 - matériau;
 - nombre de colonnes;

- load loss:
 - tapping position;
 - rating;
 - reference temperature.

As with no-load loss, the load loss guarantee should be qualified with respect to loading conditions. If special service loss guarantees are required, then it is necessary to specify the assumed service load current:

- cooler loss;
- positive phase sequence impedances:
 - tapping position;
 - winding pair;
 - special tolerances;
 - zero phase sequence impedances;
 - factory test/service conditions.

The guaranteed impedances between winding pairs should be stated together with the winding loading conditions where there are multiple winding pair combinations. It should be made clear how any effective service impedances are to be demonstrated. The tolerances applicable for impedance variation between phases or between transformers should be stated for each tap position (see IEC 61378-2):

- winding turns ratio:
 - tapping position;
- temperature rises:
 - winding, average and hot spot.

HVDC transformers are normally subject to temperature rise and load current tests in the same manner as those applied to other large power transformers using the short circuit test method. The temperature rise guarantees are normally given assuming specified service conditions and usually these cannot be obtained by factory tests. Allowances therefore shall be included in the guaranteed levels and agreed with the purchaser at the contract stage:

- sound level:
 - transformer;
 - cooler.

The sound levels measured during factory testing will not be the same as those that occur in service. Therefore, any sound level guarantees applicable to the on-load sound condition at site should state the service conditions assumed and the basis of any margin agreed with the purchaser at the contract stage to determine the sound level in service.

11.5.3 Supplementary data

- Core:
 - material;
 - number of limbs;

- construction générale;
- courbe de saturation de l'induction;
- exigences de surexcitation.

Il convient que toute description de noyau spécifique indique le nombre de colonnes utilisées car ceci influence les performances en service, notamment lorsqu'il existe des résidus harmoniques de tensions et de courants continus. La courbe caractéristique de magnétisation du noyau/plateau est importante pour l'évaluation des performances harmoniques du noyau.

- Description de l'enroulement:

- disposition;
- types d'enroulement;
- matériau conducteur;
- détails de l'isolation.

Le montage et la conception de l'enroulement sont directement influencés par les exigences de performance en fonctionnement CCHT. Par conséquent, il convient que la description indique la manière dont le montage particulier a été déduit par rapport à la spécification:

- aspects électromagnétiques;
- capacité de serrage – forces de serrage de l'enroulement;
- types d'écrans magnétiques.

Comme pour la plupart des grands transformateurs de puissance, la maîtrise des fuites électromagnétiques est importante dans les transformateurs CCHT, notamment lorsque le résidu harmonique de courant de charge est significatif. Il convient donc de décrire l'utilisation de tout dispositif de maîtrise des flux magnétiques, leurs buts et la méthode de construction comme suit:

- paramètres de circuit;
- capacités série et parallèle des enroulements;
- capacités des traversées;
- caractéristiques d'impédance/fréquence;
- caractéristiques de résistance alternative/fréquence.

Afin de définir le fonctionnement d'un poste de conversion dans diverses conditions, il est nécessaire d'évaluer les paramètres réels du circuit du transformateur. Des informations de base concernant la capacité de l'enroulement sont fréquemment fournies et le concepteur du système traite ces informations de manière à refléter les conditions en service. Il convient notamment d'indiquer clairement la manière dont les capacités ont été calculées.

De la même manière, il convient de qualifier les capacités des traversées, ainsi que les impédances ou résistances caractéristiques par rapport à la fréquence, en termes de conditions de mesure/calcul pour aider le concepteur du réseau.

- Traversées:

- fabricant;
- le type;
- courant assigné;
- classe de tension;
- volume d'huile susceptible de fuir dans la galerie des valves;
- conception de l'abri;
- longueur de fluage (microglissement).

- general construction;
- flux density saturation curve;
- overexcitation requirements.

In any specific core description, the number of limbs used should be stated, as this influences service performance, particularly where there are residual d.c. current or harmonic voltage contents. The coreplate magnetization characteristic curve is important in assessing the harmonic performance of the core.

- Winding description:
 - arrangement;
 - winding types;
 - conductor material;
 - insulation details.

The winding arrangement and design are directly influenced by the performance requirements for HVDC operation. The description should, therefore, indicate how the particular arrangement used has been derived with respect to the specification.

- electromagnetic aspects;
- winding clamping capability – winding forces;
- flux shield types.

In common with many large power transformers, the control of electromagnetic leakage flux is important in HVDC transformers, particularly where there is significant load-current harmonic content. The use of any flux control devices, their purpose and construction should be described as follows:

- circuit parameters;
- winding capacitances, series and shunt;
- bushing capacitances;
- impedance/frequency characteristic;
- a.c. resistance/frequency characteristic.

In order to establish the operation of the converter station under varying conditions, it is necessary to assess the effective circuit parameters for the transformer. Often basic information on winding capacitance is given and the system designer manipulates the information to reflect the service condition. It should be clear, therefore, how the capacitances have been calculated.

Similarly, bushing capacitances and impedance or resistance frequency characteristics should be qualified with respect to measurement/calculation conditions to assist the system designer.

- Bushings:
 - manufacturer;
 - type;
 - current rating;
 - voltage class;
 - oil volume liable to leak into valve hall;
 - shed design;
 - electric creep length.

Les statistiques de performance en service indiquent qu'il existe des problèmes potentiels posés par les traversées du fait des conditions climatiques externes, des systèmes d'isolation électriques internes et des profils de terre adjacents. Il convient par conséquent que le fournisseur s'assure que les conditions sont correctement spécifiées au fournisseur des traversées et qu'elles sont effectivement incluses dans la description des traversées soumises à l'acheteur.

Il est également important que l'interface entre traversées et transformateur soit clairement définie et reconnue dans toutes les spécifications et pour tout essai.

- Changeur de prise:
 - fabricant;
 - type;
 - courant assigné;
 - exigences de maintenance du changeur de prise;
 - méthode de contrôle de la tension flottante de l'enroulement;
 - utilisation de contrôle de tension par résistance non linéaire;
 - capacité de commutation.

Outre les exigences normales en courant alternatif, les changeurs de prise pour applications CCHT seront soumis à des taux élevés d'augmentation du courant (di/dt) et il convient d'en tenir compte en termes de capacité de commutation.

- Détails du réfrigérant:
 - caractéristique assignée de la pompe et courant de démarrage;
 - caractéristique assignée du ventilateur et courant de démarrage;
 - dimensions d'accès au réfrigérant (dépose du faisceau de tube);
 - nombre de ventilateurs par groupe;
 - nombre de pompes par groupe;
 - caractéristiques de transport;
 - dimensions;
 - masse;
 - fluide de remplissage.
- informations sur le site:
 - implantations avec leurs dimensions;
 - poids;
 - quantités totales d'huiles et quantités à retirer pour accès;
 - volume du conservateur;
 - poids des organes;
 - exigences de remplissage d'huile;
 - détails du démontage.

NOTE 1 Bien que les informations sur site requises pour les transformateurs CCHT soient comparables à celles qui sont exigées pour d'autres transformateurs de puissance de grande taille, les détails de démontage sont particulièrement importants.

- caractéristiques d'huile.

NOTE 2 Du fait des considérations diélectriques particulières des conditions de fonctionnement CCHT, il convient que le fournisseur spécifie les qualités d'huile appropriées, nécessaires à la mise en service et à un fonctionnement continu et en toute sécurité, et notamment la résistivité de l'huile.

The service performance statistics indicate that there are potential problems with bushings due to external environmental conditions, internal electrical insulation systems and adjacent earth profiles. The supplier should therefore be satisfied that the conditions are properly specified to the bushing supplier and should ensure that they are included in the bushing description given to the purchaser.

It is also important that the bushing to transformer interface be clearly defined and recognized in any specification and testing.

- Tap-changer:
 - manufacturer;
 - type;
 - current rating;
 - tap-changer maintenance requirements;
 - floating winding voltage control method;
 - use of non-linear resistor voltage control;
 - switching capability.

In addition to the normal a.c. requirements, tap-changers for HVDC application will be subjected to high current rise rates (di/dt) and this should be considered with respect to switching capacity.

- Cooler details:
 - pump rating and starting current;
 - fan rating and starting current;
 - cooler access dimensions (tube stack removal);
 - number of fans per group;
 - number of pumps per group;
 - transport data;
 - dimensions;
 - weight;
 - filling medium.
- site information:
 - layout with dimensions;
 - weights;
 - total oil quantities and quantities to be removed for access;
 - conservator volume;
 - component weights;
 - oil filling requirements;
 - disassembly details.

NOTE 1 Although the site information required for HVDC transformers is in line with that required for other larger power transformers, the disassembly details are particularly important.

- oil characteristics.

NOTE 2 Because of the particular dielectric consideration under HVDC operating conditions, the supplier should specify the appropriate oil qualities necessary for commissioning and continued safe operation, particularly oil resistivity.

11.6 Assurance qualité et programme d'essai

Il est recommandé que le fournisseur donne les grandes lignes des procédures d'essai proposées en faisant notamment référence au séquençement adopté. Il convient d'inclure les essais liés au contrôle qualité, appliqués pendant la fabrication de manière à confirmer les aspects de performance non couverts par l'essai final, tels que la capacité d'isolation entre brins élémentaires.

Au moment de la soumission de l'offre, il convient de soumettre un plan qualité et un programme d'essai détaillés, accompagnés d'un exemplaire du certificat AQ en cours.

11.7 Disponibilité et mesures permettant de réduire le temps d'arrêt de service

Le remplacement rapide du transformateur ou de ses organes est souvent une exigence pour une installation CCHT. Il convient de fournir une description de la manière dont ceci est réalisé, comme suit:

- l'accès aux organes qui nécessitent une maintenance, c'est-à-dire les contacts du changeur de prise;
- les moyens de remplacement des organes;
- les moyens de remplacement du transformateur;
- les exigences de maintenance et d'inspection des organes.

11.8 Informations à fournir par l'acheteur ou par le concepteur du réseau

11.8.1 Description générale

Il convient de décrire en détail les normes nationales et internationales applicables.

11.8.2 Caractéristiques du réseau

- Variation de tension du réseau en courant alternatif.
- Variation de fréquence du réseau en courant alternatif.
- Informations relatives à la forme d'ondes du courant de l'enroulement de valve, y compris les niveaux harmoniques et les composantes continues résiduelles.

Il est important de spécifier la forme d'ondes prévue du courant d'enroulement de valve, en termes de résidus harmoniques ainsi que les éventuelles composantes continues résiduelles. Le résidu harmonique influence les pertes du transformateur de manière générale, mais, ce qui est beaucoup plus important, les pertes localisées de l'enroulement, et par conséquent les éventuelles températures de point chaud. Si le spectre harmonique est connu, il est possible de concevoir les enroulements de manière à éviter tout échauffement inacceptable en utilisant des techniques modernes de calcul sur le terrain. Pour éviter une complexité inutile de la conception, il convient que le concepteur du réseau analyse le résidu harmonique pour l'installation particulière plutôt que d'adopter une approche généralisée et approximative.

Les composantes continues résiduelles et dans une certaine mesure le résidu harmonique auront une influence sur les pertes dans le fer et le niveau de bruit. Ici encore, il est important d'essayer de prédire avec précision les exigences de service car l'utilisation d'hypothèses impliquant des valeurs types peut influencer de manière préjudiciable la conception du transformateur.

- Variation de tension du réseau en courant alternatif.

Comme pour les transformateurs de réseau de courant alternatif, il convient d'identifier le niveau maximum d'un fonctionnement continu ou à long terme des tensions prévues afin de s'assurer que la conception du transformateur et les niveaux de contrainte de la tension d'essai démontrent les marges de sécurité de fonctionnement appropriées.

11.6 Quality assurance and test programme

The supplier should outline the proposed testing procedures with particular reference to sequence of testing. Quality tests applied during manufacture to confirm performance aspects not covered by final testing, such as inter-strand insulation capability, should be included.

A detailed quality plan and test programme with a copy of the current QA certificate should be submitted at the tender stage.

11.7 Availability and measures to minimize service downtime

The rapid replacement of transformer or components is often a requirement in a HVDC installation. A description of how this is to be achieved should be provided as follows:

- access to components requiring maintenance, that is tap-changer contacts;
- facilities for replacement of components;
- facilities for replacement of transformer;
- maintenance and inspection requirements for components.

11.8 Information to be provided by the purchaser or by the system designer

11.8.1 General description

The relevant national and international standards should be detailed.

11.8.2 System data

- AC system voltage variation.
- AC system frequency variation.
- Valve winding current waveform information, including harmonic levels and residual d.c. components.

It is important to specify the expected valve winding current waveform in terms of harmonic content and any residual d.c. components. The harmonic content influences the transformer losses in general but, more importantly, localized winding loss and hence potential hot spot temperatures. With the knowledge of the harmonic spectrum, the windings can be designed to avoid unacceptable temperature rises using modern field-computational techniques. To avoid unnecessary design complexity, the harmonic content should be analysed by the system designer for the particular installation rather than adopting a generalized approximate approach.

The residual d.c. content and to some extent, the harmonic content, will influence the core loss and sound level. Again, it is important to try to accurately predict the service requirements as the transformer design may be adversely influenced by the assumption of typical values.

- DC system voltage variations.

As with a.c. system transformers, the anticipated maximum continuous or long term operating voltage levels should be identified to ensure that the transformer design and test voltage stress levels demonstrate the appropriate operating safety margins. The maximum operating voltages are also required to permit the proper design of transformer over-voltage protection equipment.

Les tensions de fonctionnement maximales sont également nécessaires pour permettre de concevoir correctement les équipements de protection du transformateur contre les surtensions.

- Capacité de court-circuit du réseau en courant alternatif.

Il convient que le concepteur du réseau informe le fournisseur de toute condition de fonctionnement impliquant des courants continus particuliers, tels que la fréquence de coupure de courant due à des défaillances de la commutation ou les techniques de contrôle du courant qui peuvent étendre le nombre de crêtes asymétriques dans des conditions de défaut. Ces éléments peuvent influencer les considérations de conception du court-circuit.

- Conditions de mise à la terre du réseau.

11.8.3 Caractéristiques climatiques

- Niveaux de température ambiante, y compris le cas échéant la température de la galerie des valves.

Outre les considérations normales des limites de température de fonctionnement telles que le vieillissement à long terme ou les points chauds locaux, les performances d'isolation des transformateurs CCHT et organes associés sont influencées par les variations de température. Il est important que la conception de l'isolation soit confirmée par calcul sur l'ensemble de la plage de température de fonctionnement.

Il est également important de reconnaître les éventuelles conditions de température ambiante particulières applicables uniquement aux organes. Les traversées du côté courant continu par exemple dépassent souvent dans le local du redresseur où les conditions seront très différentes des conditions à l'extérieur. Il peut même y avoir un important gradient de température et par conséquent, le long de la traversée c.c. et de son isolation, notamment à la mise sous tension en période froide.

- Altitude du site.
- Pollution atmosphérique.

Une revue des performances en service et de la fiabilité des systèmes CCHT indique clairement que les contournements de traversées externes sont parmi les dysfonctionnements les plus fréquents. Ces contournements sont dus à une sorte de «pollution» de l'isolateur. Il peut y avoir une combinaison de dépôts solides de contamination et de conditions d'humidité qui donnent lieu à des contournements, à court ou à long terme.

Les contournements sont également dus à un autre mécanisme, une humidité inégale d'abris d'isolateur non pollué. Il convient par conséquent d'étudier attentivement les conditions atmosphériques sur le site en prenant en compte une échelle de temps appropriée et de définir ces conditions dans la spécification, de manière à y incorporer les procédures d'isolation externe, d'essai et de fonctionnement appropriées.

- Charge maximale du vent.
- Informations sismiques.
- Bruit ambiant.

En termes d'environnement, il existe de plus en plus d'inquiétudes quant aux effets des installations industrielles, telles que les postes de conversion, sur les niveaux de bruit environnants. Il est souvent imposé aux installations des exigences acoustiques établies par des réglementations locales. Ces exigences s'expriment en général comme étant le niveau de bruit admissible maximum mesuré à une frontière donnée autour de l'installation. La contribution sonore maximale de chacun des équipements installés dans des conditions de charge et de service est ensuite déduite par calcul et une valeur garantie est prescrite – voir l'alinéa relatif au niveau de bruit au paragraphe 11.5.2.

- AC system short circuit capacity.

The supplier should be advised by the system designer of any special d.c. current operating conditions such as the frequency of current chopping due to commutation failures or current control techniques which may extend the number of asymmetric peaks under fault conditions. These may influence short circuit design considerations.

- System earthing conditions.

11.8.3 Environmental data

- Ambient temperature levels including valve hall temperatures where relevant.

In addition to the normal considerations of operating temperature limits, such as long term ageing or local hot spots, the insulation performance of HVDC transformers and associated components will be influenced by temperature variation. It is important that the insulation design be confirmed by calculation over the full operating temperature range.

It is also important to recognize any special ambient temperature conditions only applicable to components. The d.c.-side bushings, for example, often project into the rectifier hall where conditions will be very different from those outside. There may well be a large temperature gradient, therefore, along the d.c. bushing and its insulation, particularly on switch-on during a cold period.

- Site altitude.
- Atmospheric pollution.

A review of HVDC systems service performance and reliability indicates quite clearly that external bushing flashovers feature among the most frequent malfunctions. Some form of insulator "pollution" causes these flashovers. This may be a combination of solid pollution deposits plus wet condition which result in flashover in the short or long term.

Unequal wetting of unpolluted insulator sheds is another mechanism that can cause flashover. The atmospheric conditions at the site should, therefore, be investigated carefully, taking into account an appropriate timescale, and defined in the specification so that the appropriate external insulation, testing and operating procedures can be incorporated.

- Maximum wind loading.
- Seismic information.
- Ambient sound.

There are increasing environmental concerns about the effect of industrial installations such as converter stations, on the ambient sound levels. Local statutory sound requirements are often imposed on installations. They are usually expressed as the maximum permissible sound level measured at some boundary around the installation. The maximum permissible sound contribution of each of the installed equipment under load and service conditions is then derived by calculation and a guaranteed value prescribed – see the sound level indent in 11.5.2.

11.8.4 Exigences de performance

- Puissance assignée.

Outre les considérations applicables aux transformateurs de réseau en courant alternatif pour déterminer correctement la puissance assignée, il est nécessaire, pour les transformateurs CCHT, de tenir compte des effets de la charge harmonique. Par conséquent, dans toute spécification, il est recommandé que les paramètres de performance garantis et de fonctionnement sûr soient explicites en termes de prise en charge des harmoniques. La puissance assignée est toujours associée aux pertes garanties et à l'échauffement. Il convient donc d'être clair dans la spécification, en indiquant si les pertes garanties ou l'échauffement incluent ou non la charge harmonique, en tenant compte des difficultés associées à la démonstration des performances avec un résidu de charge harmonique.

Il convient qu'une spécification donnée identifie clairement les garanties contractuelles par des paramètres d'essais de performance avec des garanties de fonctionnement en toute sécurité, démontrées par des calculs utilisant les informations de base des essais ou qu'elle spécifie les garanties contractuelles globales qui sont démontrées par les essais en intégrant un résidu de charge harmonique simulé.

- Exigences de charge particulières.

Comme pour les transformateurs de réseau en courant alternatif, il est essentiel que toute exigence de charge particulière, ainsi que les limites de température acceptables, soient spécifiées. Cependant, dans le cas de transformateurs CCHT, il convient également de tenir compte en particulier du résidu de charge harmonique comme indiqué en 9.1.5. Outre les températures normales des enroulements et de l'huile, l'échauffement des autres parties du transformateur doit être soigneusement examiné, par exemple l'échauffement des traversées qui ont des températures ambiantes de fonctionnement différentes.

- Transfert de puissance réactive.

Dans le cas où il est utilisé un enroulement tertiaire pour le transfert de la puissance réactive, il est nécessaire de reconnaître le rapport vectoriel entre le flux de fuite électromagnétique de l'enroulement, produit par les conditions de charge, et le flux d'excitation de la partie active. Dans certaines parties du noyau, ces flux magnétiques s'associeront et le résultat net dépend de leur rapport vectoriel. Le niveau de transfert de la puissance réactive détermine la grandeur et le vecteur de flux de fuite de l'enroulement. Le transfert de puissance réactive doit être inclus dans la spécification pour permettre à l'ingénieur chargé de la conception du transformateur de s'assurer que l'échauffement local de la partie active du noyau n'est pas excessif.

- Considérations liées à des courants de charge particuliers.

Certains aspects particuliers du courant de charge sont inclus en 11.8.2. et 11.8.4. Cependant, il peut y avoir d'autres considérations liées au courant de charge, et notamment lorsqu'il y a des combinaisons de charge à enroulements multiples ou des conditions de fonctionnement de valve à court terme.

- Rapport de transformation à vide.
- Tension assignée entre phases.
- Couplages d'enroulements et rapport vectoriel.
- Variations du rapport de transformation, y compris la plage et le nombre d'échelons de tension.
- Impédances et/ou réactance, y compris les tolérances particulières et la variation sur la gamme de prises de tensions.

La détermination des impédances du transformateur et leurs tolérances dans un schéma CCHT est souvent plus critique en termes de conception et de fonctionnement du système que celles d'un schéma c.a. Il est important de reconnaître cependant que l'impédance du transformateur qui peut être obtenue, est soumise à un nombre de contraintes. Elle est principalement déterminée par le positionnement relatif des différents enroulements.

11.8.4 Performance requirements

- Rated power.

In addition to the considerations applicable to a.c. system transformers for the proper determination of rated power, HVDC transformers require consideration of the effects of harmonic loading. In any specification, therefore, the safe operating and guaranteed performance parameters should be explicit regarding how harmonic loading is to be accommodated. The rated power is always associated with guaranteed loss and temperature rise. It should be clear in the specification, therefore, whether either or both the guaranteed loss or temperature rise is with or without harmonic loading, taking into account the difficulties associated with the demonstration of performance with harmonic load content.

A specification should either identify clear contractual guarantees by test performance parameters together with safe working performance guarantees demonstrated by calculation using test based information, or specify overall contractual guarantees which are demonstrated by tests incorporating simulated harmonic load content.

- Special loading requirement.

As with a.c. system transformers, it is essential that any special loading requirements, together with acceptable temperature limits are specified. In the case of HVDC transformers, however, the special consideration of harmonic load content should also be accommodated as indicated in 9.1.5. In addition to the normal winding and oil temperatures, the temperature rise of other parts of the transformer shall be carefully considered, for example, bushings having different operating ambient temperature.

- Reactive power transfer.

In the case where a tertiary winding is used for reactive power transfer, it is necessary to recognize the vector relationship between winding electromagnetic leakage flux produced by the loading conditions and the core excitation flux. In parts of the core, these magnetic fluxes will combine and the net result depends upon their vector relationship. The level of reactive power transfer determines the quantity and vector of the winding leakage flux. The reactive power transfer shall be included in the specification to enable the transformer design engineer to ensure that local core heating is not excessive.

- Special load current considerations.

Certain special aspects of the load current are included in 11.8.2. and 11.8.4. There may, however, be other load current considerations particularly with multiple winding loading combinations or short-term valve operation conditions.

- No-load voltage ratio.
- Rated voltage between phases.
- Winding connections and vector relationship.
- Voltage ratio variation including range and number of voltage steps.
- Impedances and/or reactance including special tolerance and variation over the voltage tapping range.

The determination of the transformer impedances and their tolerances in a HVDC scheme is often more critical in terms of system design and operation than for an a.c. scheme. It is important to recognize, however, that the transformer impedance achievable is subject to constraints. It is mainly determined by the relative positioning of the various windings.

La disposition des enroulements est également influencée par d'autres considérations liées à la conception des transformateurs. En fonction de la gamme de prises et des niveaux d'isolation des enroulements en courant alternatif et en courant continu, on préférera une disposition donnée qui permettra de réduire la complexité et par conséquent les coûts du transformateur. La répartition ampère-tour qui en résulte, dans des conditions de charge, et la variation de la répartition en fonction de la position de prise déterminera l'impédance et sa variation. Avec l'augmentation de la complexité de conception, d'autres dispositions d'enroulements seront possibles et qui donneront des performances d'impédance diverses. Il est préférable que le concepteur du réseau et le concepteur du transformateur communiquent étroitement afin de déterminer la disposition optimale. De même, il est en général exigé qu'il y ait une correspondance étroite des impédances entre phases et transformateurs pour un fonctionnement optimal en conversion. Les tolérances admises par les dernières éditions de normes nationales et internationales sur les transformateurs sont plus étroites pour les installations CCHT qu'elles ne l'étaient précédemment. Avec la mise en œuvre croissante de procédures de fabrication, il est possible de réduire encore les tolérances, mais des considérations d'ordre pratique suggèrent qu'il conviendrait que ces tolérances ne soient pas réduites à moins de 5 % de la valeur déclarée pour toute position de prise d'une conception particulière. Il convient que la variation entre appareils de même conception soit normalement inférieure à 5 % et les éventuelles exigences prévoyant des valeurs inférieures devraient faire l'objet d'une attention particulière.

- Classe de refroidissement et montage.
- Limites d'échauffement, y compris l'enroulement et l'huile.

Il est courant de spécifier les limites d'échauffement comme celles utilisées pour les transformateurs c.a. et conformément aux normes nationales ou internationales. Il convient que cette approche des transformateurs CCHT tienne compte de toutes pertes supplémentaires dues au résidu de courant de charge harmonique et des éventuelles températures de points chauds particuliers qui en résultent. Il est accepté qu'une marge correcte d'échauffement dans des conditions de courant alternatif, associée à des calculs d'accroissement des pertes et des températures de point chaud dans des conditions de charge c.c. spécifiées, assureront une démonstration adéquate de la capacité.

- Fréquence.
- Nombre de phases par appareil et nombre d'enroulements par phase.

Le concepteur du réseau peut avoir des exigences spécifiques en termes de disposition des enroulements, et notamment en ce qui concerne le déphasage de l'enroulement de valve, en utilisant des enroulements à couplage étoile et delta d'appareils séparés ou des enroulements étoile/delta combinés sur un appareil.

Niveaux d'isolation de l'enroulement, comprenant:

- tension induite avec les limites de décharge partielle;
- tension de tenue au choc de foudre;
- tension de tenue au choc de manœuvre;
- tenue à la tension de source séparée à courant alternatif;
- tension continue d'inversion de polarité avec limites de décharge partielle;
- tension continue de longue durée avec limites de décharge partielle.

Les recommandations précédentes nécessitent soit un essai d'inversion de polarité soit, en remplacement, un essai à court terme de 2 min et un essai de longue durée de 1 h. Aujourd'hui, l'essai d'inversion de polarité est en général réalisé conformément à la CEI 61378-2. Dans certains pays, l'essai d'inversion de polarité est réalisé en même temps qu'un essai de tension continue de longue durée. Dans chaque cas, des formules sont fournies afin de déterminer les niveaux d'essai requis aux tensions de service prévues et autres considérations liées au système.

The winding arrangement is also influenced by other transformer design considerations. Depending upon the tapping range and the insulation levels of both the a.c. and d.c. windings there will be a preferred arrangement to minimize the complexity and hence cost of the transformer. The resulting ampere-turn distribution under load conditions and the variation of the distribution with tapping position will determine the impedance and its variation. With increased design complexity, certain other winding arrangements will be possible and these will give a different impedance performance. A close dialogue between the system designer and the transformer designer is preferable in order to determine the optimum arrangement. It is also normally a requirement that the impedances between phases and transformers should be closely matched for optimum converter operation. The tolerances permitted by the latest national and international transformer standards are smaller for HVDC installations than was previously the case. With increasingly involved manufacturing procedures, reduced tolerances can be achieved but practical considerations would suggest that tolerances should not be reduced below 5 % of the declared value for any tapping position for a particular design. The variation between units of the same design should normally be less than 5 % and requirements less than this would need special consideration.

- Cooling class and arrangement.
- Temperature rise limits including winding and oil.

It is usual to specify temperature rise limits in line with those used for a.c. system transformers and in accordance with national or international standards. This approach for HVDC transformers should include consideration of any additional losses due to harmonic load current content and any resulting special hot spot temperatures. It is accepted that a suitable margin on temperature rises under a.c. conditions, together with calculations of loss increases and hot spot temperatures under specified d.c. loading conditions, will provide an adequate demonstration of capability.

- Frequency.
- Number of phases per unit and number of windings per phase.

The system designer may have specific requirements on winding arrangements, particularly with respect to valve winding phase shift by the use of separate unit star and delta windings or combined star/delta windings on one unit.

Winding insulation levels, including:

- induced voltage with partial discharge limits;
- lightning impulse voltage;
- switching surge voltage;
- a.c. separate source voltage;
- d.c. polarity reversal voltage with partial discharge limits;
- long duration d.c. voltage with partial discharge limits.

Previous recommendations advocated either a polarity reversal test, or alternatively, a short-term 2 min test and a long duration 1 h test. Today, the polarity reversal test is usually performed in accordance with IEC 61378-2. In some countries, the polarity reversal test is performed together with a long duration d.c. voltage test. In each case, formulae are provided to determine the test levels required using expected service voltages and other system considerations.

En ce qui concerne les critères de décharge partielle, les performances en courant continu présentent des différences notables par rapport à celles des équipements de courant alternatif. Les niveaux admissibles et la fréquence des salves de décharge partielle exigent des études et des spécifications particulières.

- Taux de capitalisation des pertes.
- Limites des niveaux de bruit.
- Transformateur.

Comme pour la plupart des transformateurs de puissance, les limites des niveaux de bruit sont normalement prescrites pour les transformateurs CCHT. Les limites des niveaux de bruit sont normalement démontrées par des essais en usine et il convient de reconnaître que les niveaux de bruit sur le site, dans des conditions de service, seront probablement plus élevés, du fait des influences des harmoniques et du c.c., et en fonction de la conception du circuit magnétique. Il convient que les niveaux spécifiés tiennent compte des exigences finales en service.

- Réfrigérant.
- Exigences du paramètre de conception d'un système spécial:
 - capacités des enroulements et de la traversée;
 - impédance et résistance par rapport à la fréquence.

Les performances des transformateurs CCHT à des fréquences harmoniques sont plus importantes que celles des transformateurs de puissance c.a. de taille équivalente. L'influence sur les performances des harmoniques nécessite l'identification et l'évaluation des changements de l'impédance apparente par rapport à la fréquence. Pour cette raison, il convient de spécifier les éventuelles contraintes qui risquent d'avoir un effet sur la capacité de la traversée ainsi que le rapport impédance/fréquence du transformateur. En général, les performances d'impédance/fréquence doivent être démontrées.

En ce qui concerne les considérations relatives à la fréquence radioélectrique, le transformateur est un important constituant du circuit. Le cas échéant, il convient que l'acheteur indique l'importance de cet aspect et demande les éventuelles caractéristiques spécifiques requises.

11.8.5 Exigences d'essai

Essais individuels de série à basse tension comme pour les transformateurs de puissance normaux:

- résistance d'enroulement;
- rapport de transformation de l'enroulement;
- polarité de l'enroulement/rapport vectoriel;
- fonctionnement du changeur de prise;
- isolation noyau/châssis/résistance d'isolement de l'enroulement;
- facteur de puissance de l'isolement de l'enroulement ($\tan \delta$);
- perte due à la charge et impédance;
- perte due à la charge pour des caractéristiques assignées et des positions de prise spécifiques;
- tension d'impédance pour des caractéristiques assignées et des positions de prise spécifiques;
- caractéristiques d'impédance/fréquence;
- tension impédance homopolaire, le cas échéant;

Regarding partial discharge criteria, d.c. partial discharge performance is significantly different from that of a.c. equipment. The permitted levels and frequency of partial discharge bursts require special consideration and specification.

- Loss capitalization rates.
- Sound level limits.
- Transformer.

In common with most power transformers, sound level limits are normally specified for HVDC transformers. Sound level limits are normally demonstrated by factory testing and it should be recognized that the sound levels at site, under service conditions, are likely to be higher due to harmonic and d.c. influences, depending on the design of the core. The specified levels should take into account the final service requirements.

- Cooler.
- Special system design parameter requirements:
 - winding and bushing capacitances;
 - impedance and resistance versus frequency.

The performance of HVDC transformers at harmonic frequencies is more important than that of equivalently-sized a.c. power transformers. The influence on harmonic performance requires that changes in apparent impedance with frequency needs to be identified and assessed. For this reason, any constraints on bushing capacitance and the impedance/frequency relationship of the transformer should be specified. The impedance/frequency performance is normally required to be demonstrated.

With respect to radio frequency considerations, the transformer is an important circuit component. Where appropriate, the purchaser should indicate the importance of this aspect and request any specific data required.

11.8.5 Testing requirements

Routine low voltage tests as for normal power transformers:

- winding resistance;
- winding ratio;
- winding polarity/vector relationship;
- tap-changer operation;
- core/frame insulation/winding insulation resistance;
- power factor of the winding insulation ($\tan \delta$);
- load loss and impedance;
- load loss at specified ratings and tapping positions;
- impedance voltage at specified ratings and tapping positions;
- impedance/frequency characteristic;
- zero sequence impedance voltage where applicable;

- perte à vide dans des positions de prise spécifiées;
- courant de magnétisation;
- perte due aux équipements de refroidissement.

Comme indiqué précédemment, la forme d'ondes réelle du courant de l'enroulement comportera des harmoniques qui influenceront les pertes en service des enroulements, le noyau et d'autres structures, notamment en termes de points chauds. Les exigences d'essai ordinaires comprennent uniquement une démonstration de mesures de pertes habituelles de type c.a. qui devraient normalement refléter les valeurs garanties. La température du point le plus chaud de l'enroulement ne peut être vérifiée que par calcul ou par des mesures directes en service. En cas d'accord entre l'acheteur et le fournisseur tenant compte des pertes supplémentaires en service, des essais ou des calculs peuvent être requis (voir la CEI 61378-2).

Les considérations d'essai relatives à l'impédance mesurée sont similaires à celles liées aux pertes et, bien que l'impédance à la fréquence assignée dans des conditions de service sera très proche des mesures d'essai en usine, la composante résistive augmentera en fonction de l'augmentation des pertes en service de l'enroulement.

Pour fournir les informations requises sur les performances avec charge harmonique et conditions transitoires, un essai d'impédance/fréquence est généralement spécifié. Cet essai est souvent réalisé à des niveaux de faible puissance, du fait des limitations de l'installation d'essai. En fonction de la charge haute fréquence en service et de la conception du transformateur, il peut y avoir des inexactitudes dues à la réponse non linéaire de certaines parties du transformateur. Cependant, il n'a pas été directement démontré que cette inexactitude est inacceptable.

Essais haute tension:

- surtension induite en c.a. avec niveaux de décharge partielle conformément aux essais CEI normalisés;
- tenue à la tension de source séparée à courant alternatif;
- tension de tenue au choc de foudre;
- tension de tenue au choc de manœuvre (appliquée/induite);
- tenue à la tension de source séparée à courant continu avec décharge partielle;
- inversion de polarité c.c.

Comme pour tout transformateur, la conception de la structure d'isolement des transformateurs CCHT doit coordonner les exigences des diverses applications système et tensions d'essai. Toutefois, les exigences d'isolement pour les contraintes en courant alternatif et en courant continu sont souvent différentes et parfois conflictuelles. Par conséquent, il est important de reconnaître ce que l'essai spécifié doit démontrer. Les effets des contraintes combinées impliquant le courant alternatif, les inversions de polarité c.c., les tensions de choc de foudre et de manœuvre doivent être pris en compte. On utilise habituellement des essais séparés pour chaque type de contrainte en tension pour démontrer la capacité en service. L'effet de la température, etc., sur la distribution de la tension doit être pris en compte.

Sous réserve des commentaires ci-dessus, les tensions d'essai de choc de foudre et de manœuvre en courant alternatif peuvent être déterminées par les techniques normales de coordination de l'isolement c.a.

En ce qui concerne les niveaux d'essai de tension continue, dans certains pays, il n'est pas autorisé de choisir l'essai de tension à polarité unique équivalent au lieu de l'essai d'inversion de polarité. Il est indiqué que ceci évite un niveau d'essai onéreux et inutile entre l'enroulement à la terre tout en reflétant plus étroitement le fonctionnement en service.

- no-load loss at specified tapings;
- magnetizing current;
- cooling equipment loss.

As previously indicated, the actual winding current waveform will contain harmonics that will influence the in-service losses of the windings, the core and other structures, particularly with respect to hot spot considerations. The normal test requirements only include a demonstration of the usual a.c.-type loss measurements that should normally reflect the guaranteed values. The winding hottest spot temperature at rated power can only be verified by calculation, or direct measurements in service. If any agreement has been made between the purchaser and the supplier to account for the additional service losses, then tests or calculations may be required (see IEC 61378-2).

Test considerations for measured impedance are similar to those for losses and although the impedance at rated frequency under service conditions will be very close to the factory test measurement, the resistive component will increase in line with the increased service winding losses.

To provide the necessary information on performance with harmonic loading and transient conditions, an impedance/frequency test is usually specified. This is often performed at low power levels because of test plant limitations. Depending upon the service high frequency loading and the transformer design, this may result in inaccuracies due to the non-linear response of some parts of the transformer. There has, however, been no direct evidence that this inaccuracy is unacceptable.

High voltage tests:

- a.c. induced over-voltage with partial discharge levels to standard IEC testing;
- a.c. separate source voltage;
- lightning impulse voltage;
- switching surge voltage (applied/induced);
- d.c. withstand voltage with partial discharge;
- d.c. polarity reversal.

As with any transformer, the insulation structure design of HVDC transformers shall coordinate the requirements of various system and test voltage applications. However, the insulation requirements for a.c. and d.c. stressing are often quite different and sometimes conflicting. Therefore, recognition of what the specified testing is demonstrates is important. The effects of combined stressing involving a.c. and d.c. polarity reversal, impulse and switching voltages need to be considered. Separate testing for each type of voltage stress has traditionally been used to show proof of service capability. The effect on voltage distribution of temperature, etc., shall be considered.

Subject to the above comments, the a.c. impulse and switching surge test voltages may be determined by the normal a.c. insulation coordination techniques.

Regarding the d.c. voltage test levels, in some countries, the option of equivalent single polarity voltage testing in lieu of a polarity reversal test is not permitted. It is stated that this avoids an unnecessarily onerous test level from winding to earth whilst reflecting more closely the service operation.

Essais thermiques:

- essai de courant de charge de longue durée;
- essais d'échauffement (caractéristique assignée de type/position de prise).

Il est nécessaire d'établir les échauffements de l'huile et de l'enroulement dans des conditions assignées au moyen d'un essai d'échauffement. De la même manière, il convient de démontrer le courant admissible à la pleine charge au moyen d'un essai de courant de charge de longue durée. Il convient que ce dernier essai dure au moins 12 h pendant lesquelles il sera prélevé des échantillons d'huile afin d'en analyser la teneur en gaz.

Outre la démonstration des échauffements d'huile et d'enroulements garantis, il est recommandé que l'essai dure suffisamment pour confirmer qu'il n'y a pas d'effets préjudiciables dus au flux de fuite électromagnétique ou à des connexions de transport de courant inadéquates.

Il convient également de reconnaître que des essais thermiques ne peuvent être réalisés dans la pratique qu'en utilisant une charge c.a. équivalente. Il est recommandé que le fournisseur et l'acheteur conviennent des pertes supplémentaires dans l'enroulement et dans le circuit magnétique, dues aux conditions de charge en service, et de les intégrer correctement au cours de l'essai thermique. De la même manière, il est recommandé de tenir compte des échauffements moyens et des échauffements du point chaud établis au cours des essais thermiques, de manière à refléter les conditions de service. Comme indiqué en 11.8.2, les techniques de calcul nécessaires à cet effet sont disponibles.

Essais supplémentaires:

- essais de bruit du transformateur;
- essais de bruit du réfrigérant;
- essais de pression mécanique/vide de la cuve;
- échantillons d'huile pour les analyses des gaz dissous tout au long des essais diélectriques et thermiques;
- essais fonctionnels des équipements auxiliaires;
- essais de preuve sismique ou démonstration, en fonction de l'équipement.

Les essais de bruit effectués en usine seront conformes aux procédures applicables à des transformateurs de puissance c.a. standards. Cependant, un réglage du niveau mesuré est nécessaire afin d'inclure le niveau de bruit qui apparaît en charge et en service. Il est recommandé que l'acheteur et le fournisseur conviennent de ce réglage dans le cadre de la spécification lors de la conclusion du contrat. Lorsqu'il est spécifié des niveaux de bruit très faibles, il convient de tenir compte des effets du courant de charge et du courant continu résiduel.

11.8.6 Ordre des essais en usine

L'acheteur peut considérer qu'une suite particulière d'essais en usine est souhaitable. Il peut préférer par exemple réaliser les essais thermiques avant les essais diélectriques. De la même manière, l'ordre des essais diélectriques peut être spécifié, par exemple comme défini dans la CEI 61378-2.

11.8.7 Essais sur site

- Isolation noyau/châssis.
- Résistance d'isolement de l'enroulement.
- Rapport de transformation.
- Essais fonctionnels des équipements auxiliaires.

Thermal tests:

- long duration load current test;
- temperature rise tests (type rating/tap position).

It is necessary to establish the oil and winding temperature rises under rated conditions by means of a temperature rise test. In addition, the full load-current-carrying capability should be demonstrated by means of a long-duration load current test. The latter test duration should be not less than 12 h during which oil samples should be taken for gas in oil analysis.

In addition to demonstrating the guaranteed oil and winding temperature rises, the duration of the test should be sufficient to confirm that there are no adverse effects due to electromagnetic leakage flux or inadequate current carrying connections.

It should also be recognized that thermal testing can only be practically undertaken using a.c. equivalent loading. Additional losses in the winding and the core due to service loading conditions should be agreed between the supplier and purchaser and incorporated in an appropriate manner during the thermal test. Similarly, the average and hot spot winding temperature rises established during thermal tests should be considered in an agreed manner to reflect service conditions. As indicated in 11.8.2, the necessary computational techniques are available.

Additional tests:

- transformer sound tests;
- cooler sound tests;
- mechanical pressure/vacuum tank tests;
- oil samples for gas-in-oil analysis throughout dielectric and thermal tests;
- functional tests of auxiliary equipment;
- seismic proving tests or demonstration, as appropriate to the equipment.

The sound testing carried out in the factory will be in accordance with normal a.c. power transformer procedures. However, an adjustment to the level measured will be needed to derive the level that occurs on load in service. This adjustment should be agreed between purchaser and supplier as part of the specification at the contract stage. Where very low sound levels are specified, consideration should be given to the effect of load current and residual d.c. current.

11.8.6 Sequence of factory tests

The purchaser may consider that a special sequence of factory testing is desirable. For example, thermal testing prior to dielectric testing may be preferred. Similarly, the order of dielectric testing may be specified, for example, as outlined in IEC 61378-2.

11.8.7 Site tests

- Core/frame insulation.
- Winding insulation resistance.
- Ratio.
- Functional tests of auxiliary equipment.

- Essais de l'huile pour conformité aux normes applicables avant et après remplissage.
- Essais du facteur de puissance.
- Contrôle d'absence d'humidité à l'arrivée sur le site.
- Contrôles de routine en service.

Avant la mise en service, des échantillons d'huile sont généralement prélevés pour s'assurer que certains paramètres de qualité sont remplis. Un aspect important de la capacité c.c. de la structure d'isolement du transformateur est la résistivité de l'huile. Il est essentiel de vérifier ce paramètre et de rester conforme aux valeurs convenues entre l'acheteur et le fournisseur.

11.8.8 Exigences de conception et de construction

- Conception de la cuve et des organes:
 - exigences de pression et de vide;
 - exigences de types de valves et de flasques;
 - accès aux organes internes;
 - débit d'huile principal et canalisations de purge d'air;
 - détails de mise à la terre;
 - traitement de surface;
 - isolation et mise à la terre.
- Conservation de l'huile:
 - type de conservateur;
 - équipement de déshumidification.
- Disposition du site:
 - exigences générales d'implantation;
 - limites d'encombrement et de poids;
 - détails sur la réduction de bruit;
 - mesures anti-vibration;
 - isolation et mise à la terre.
- Transport:
 - limites d'encombrement et de poids;
 - fluide de remplissage; gaz sec, teneur en humidité;
 - exigences de l'enregistreur d'impact;
 - exigences d'emballage et d'étiquetage.
- Installation:
 - inspection sur site à la réception;
 - moyens de manutention sur le site.
- Divers:
 - fixations.

11.8.9 Matériel auxiliaire

- Traversées:
 - type /construction;
 - tension et courant assignés;

- Oil tests for conformity to applicable standards before and after filling.
- Power factor tests.
- Dryness check on arrival at site.
- Routine checks in service.

Prior to commissioning, oil samples are usually taken to ensure that certain oil quality parameters have been met. An important aspect of the d.c. capability of the transformer insulation structure is the resistivity of the oil. It is essential that this parameter be checked and in accordance with the values agreed between the purchaser and the supplier.

11.8.8 Design and construction requirements

- Tank and component design:
 - pressure and vacuum requirements;
 - valve types and flange requirements;
 - access to internal components;
 - main oil flow and air release venting pipework;
 - earthing details;
 - surface treatment;
 - insulation and earthing.
- Oil preservation:
 - conservator type;
 - dehumidifying equipment.
- Site arrangement:
 - general layout requirements;
 - dimensional and weight limits;
 - sound abatement details;
 - anti-vibration measures;
 - insulation and earthing.
- Transport:
 - dimensional and weight limits;
 - filling medium – dry gas, moisture contents;
 - impact recorder requirement;
 - packing and labelling requirements.
- Installation:
 - site inspection on receipt;
 - site movement facilities.
- Miscellaneous:
 - fixings and fastenings.

11.8.9 Auxiliary equipment

- Bushings:
 - type/construction;
 - voltage and current rating;

- exigences d'essai – courant alternatif, courant continu, décharge partielle, thermique;
- l'installation d'essai;
- facteur de puissance;
- niveaux RIV externes;
- considérations en matière de pollution;
- système d'isolation électrique interne associé;
- température ambiante locale;
- ligne de fuite.

De nombreux problèmes en usine et en service sont dus à des défaillances des traversées. Ces problèmes sont des défaillances internes et des contournements externes tant dans l'air que dans l'huile. En général, la cause en est une spécification inadéquate de la traversée par rapport aux niveaux de tension ou aux conditions de service, y compris la pollution et les interfaces avec d'autres éléments telles que l'isolation du transformateur. Il est particulièrement important que les traversées soient soumises aux essais séparément et il est recommandé que ces essais incorporent autant que possible les conditions physiques et environnementales de l'installation. Ceci s'applique particulièrement aux traversées c.c. dont le champ peut varier de manière dramatique du fait de la présence de structures d'isolation adjacentes. Il convient de réaliser les essais séparés de traversées à des niveaux de tension supérieurs à ceux appliqués à un transformateur afin d'éviter tout risque de défaillance pendant les essais du transformateur. S'il y a des considérations liées à la température d'essai du transformateur, il convient que celles-ci soient reflétées dans les exigences d'essai de la traversée. Il convient que ces considérations couvrent à la fois les essais de type et les essais individuels des traversées.

Dans des applications particulières dans lesquelles les traversées CCHT sont insérées dans la galerie des valves, il convient d'en tenir compte dans la conception afin de réduire les déversements d'huile dans la galerie des valves suite à une défaillance de traversée.

- Changeur de prise:
 - type en charge; hors tension;
 - dans la cuve, boulonné;
 - expansion/séparation d'huile;
 - exigences de filtrage d'huile;
 - système de contrôle;
 - considérations liées à des courants particuliers.

Dans les applications de courant continu, il est essentiel de tenir compte de la vitesse d'élévation du courant et de son effet sur la capacité de commutation. Il convient que l'acheteur et le concepteur du réseau fournissent des informations à cet égard.

- Refroidissement:
 - fluide de refroidissement et qualité;
 - construction du réfrigérant.

Du fait des considérations diélectriques spécifiques aux applications c.c., il convient de tenir compte de la qualité de l'huile, et notamment sa résistivité, si elle est fournie par l'acheteur sur le site. En outre, il est recommandé de soumettre à l'approbation du fournisseur avant mise en service les paramètres de l'huile tels que mesurés sur le site avant et après remplissage.

Comme pour les transformateurs de générateur, la disponibilité permanente des transformateurs CCHT est en général un élément critique. En conséquence, la construction du système de refroidissement assure généralement un niveau élevé de fiabilité avec une capacité redondante.

- test requirements – a.c., d.c., partial discharge, thermal;
- test set-up;
- power factor;
- external RIV levels;
- pollution considerations;
- associated internal electrical insulation system;
- local ambient temperature;
- creepage distance.

There have been a number of factory and service problems involving bushing failures. These have included internal failures and external flashovers both in air and oil. The cause has usually been an inadequately specified bushing with respect to voltage levels, service conditions, including pollution, and interface arrangements with other components such as transformer insulation. It is particularly important that bushings should be tested separately and that the tests should incorporate, as far as possible, the installed physical and environmental conditions. This is particularly important for d.c. bushings as the field can vary dramatically due to the presence of adjacent insulation structures. The separate bushing tests should be carried out at voltage levels higher than those applied to a transformer to avoid the risk of failure during the transformer tests. If there are transformer test temperature considerations, then these should be reflected in the bushing test requirements. Both type and routine bushing testing should be subject to these considerations.

In special applications, where the HVDC bushings are inserted into the valve hall, consideration should be given in the design to minimize oil spillage in the valve hall following bushing failure.

- Tap-changer:
 - type – on-load, off-circuit;
 - in tank, bolt on;
 - oil expansion/separation;
 - oil filtering requirements;
 - control system;
 - special current considerations.

In d.c. applications, it is essential that consideration is given to the rate of rise of current and its effect on switching capacity. The purchaser and system designer should provide information on this aspect.

- Cooling:
 - cooling medium and quality;
 - cooler construction.

Because of the specific dielectric considerations for d.c. application, the quality of the oil, particularly the oil resistivity, should be considered if the purchaser is to supply the oil at site. In addition, the oil parameters measured at site before and after oil filling should be referred to the supplier for approval before commissioning.

Like generator transformers, HVDC transformers are normally critical equipment in terms of continuous availability. Accordingly, the cooling construction should ensure a high level of reliability with redundant capacity.

- Divers:
 - dispositif de coupure de pression;
 - relais Buchholz, manostat et dispositifs d'accumulation de gaz;
 - dispositifs de protection contre les surtensions;
 - dispositifs de surveillance.
- Contrôle:
 - éléments indicateurs de la température de l'enroulement;
 - exigences de TC (transformation de courant);
 - commutation réfrigérant;
 - détails d'alimentation auxiliaire;
 - fonctionnement du changeur de prise, mise en parallèle et protection;
 - détecteur de flux d'enroulement auxiliaire;
 - implantation et construction de l'armoire de commande;
 - surveillance du débit d'huile;
 - indication de température de l'huile et des enroulements.

11.8.10 Disponibilité et mesures permettant de réduire le temps d'arrêt de service

Toute exigence particulière de l'acheteur en termes d'accès aux organes, entretien ou remplacement du transformateur.

La plupart des installations CCHT sont uniques dans un système donné. Contrairement au réseau c.a., il n'y a pas de pièces de rechange disponibles, qu'il s'agisse de matériel ou d'alimentation. Par conséquent, on prête généralement une attention toute particulière à la fourniture des pièces de rechange, à la vitesse de remplacement et de réparation d'un appareil défectueux. Il convient donc que la spécification tienne compte de ces éléments en toute clarté et qu'ils soient discutés avec le fournisseur car ils auront une influence notable sur la conception du transformateur.

12 Considérations relatives au court-circuit

La protection normale d'une valve à thyristor comporte un dispositif de protection contre les surtensions, à oxyde métallique, branché entre les bornes des bras individuels du thyristor dans le pont redresseur.

La Figure 22 illustre un diagramme de base d'une connexion hexaphasée à deux alternances ainsi que les états de défaut de court-circuit potentiels.

- Miscellaneous:
 - pressure-relief device;
 - Buchholz, pressure switch and gas accumulation devices;
 - surge arresters;
 - monitors.
- Control:
 - winding temperature indicator elements;
 - CT requirements;
 - cooler switching;
 - auxiliary power supply details;
 - tap-changer operation, paralleling and protection;
 - auxiliary flux detector winding;
 - control cabinet layout and construction;
 - oil flow monitoring;
 - oil and winding temperature indication.

11.8.10 Availability and measures to minimize service downtime

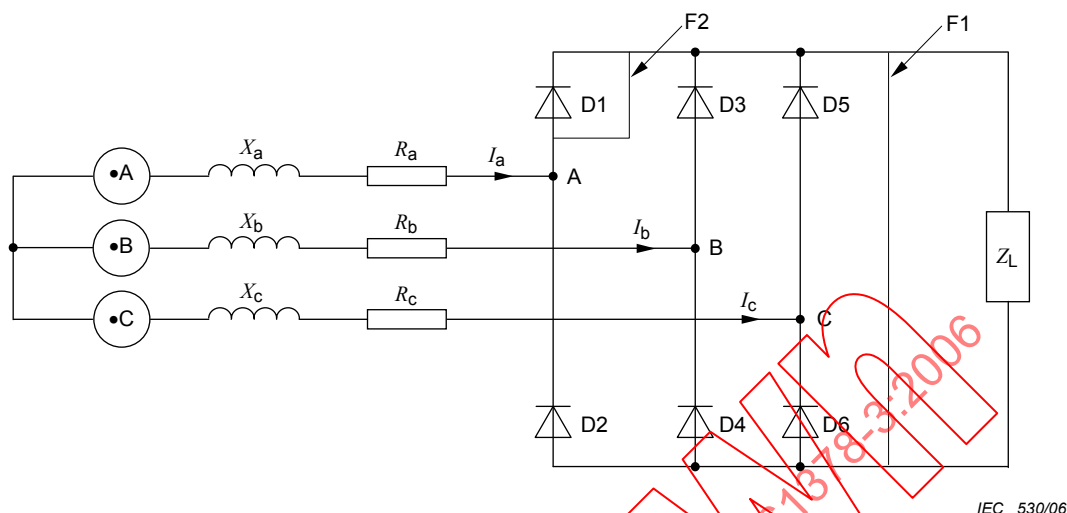
Any special purchaser requirements with respect to access to components, servicing or transformer replacement should be specified.

Most HVDC installations are unique in any given system. Unlike the a.c. network, there are no existing spares available either in hardware or power supply terms. Therefore, special consideration is usually given to the provision of spare equipment, the speed of replacement and the speed of repair of a faulty unit. Any such considerations should be referred to clearly in the specification and discussed with the supplier because they will significantly influence the transformer design.

12 Short circuit considerations

The normal protection for the thyristor valve incorporates a metal oxide surge arrester connected across the terminals of the individual thyristor arms within the bridge.

Figure 22 shows a basic 6-pulse full wave connection diagram and the potential short-circuit fault conditions.



Légende

F1 est le défaut 1

F2 est le défaut 2

Z_L représente la charge

Figure 22 – Etats de défaut de court-circuit

Le premier état de défaillance est un court-circuit entre les bornes du pont redresseur à deux alternances (F1). Dans cette condition de défaillance, le courant est déterminé par les valeurs de réactance et de résistance de l'alimentation et du transformateur comme pour un circuit de puissance conventionnel.

La seconde défaillance est un défaut sur un bras individuel du pont redresseur qui pourrait apparaître en cas de défaillance du dispositif de protection contre les surtensions (F2). Ce type de défaillance est extrêmement rare.

Il est similaire à ceux qui touchent les convertisseurs à arc de mercure (MAR).

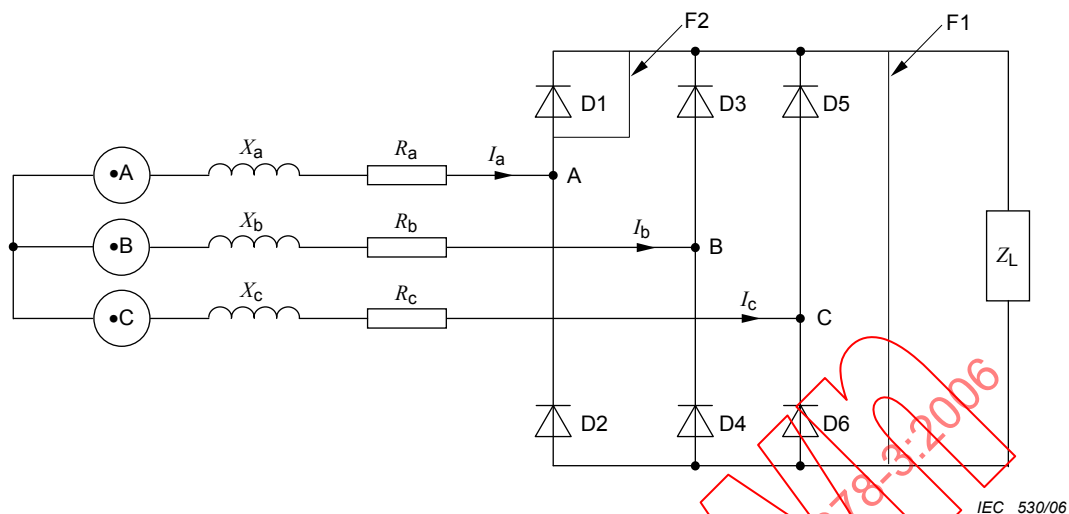
Dans ces dispositifs, l'état qui détermine la valeur crête du courant de défaut maximal subi par le transformateur est appelé «retour d'arc» ou «retour de flamme».

Le retour d'arc ou le retour de flamme est l'état de défaillance d'un MAR lorsqu'il n'est pas supposé être conducteur, c'est-à-dire à un moment où la tension d'anode est négative par rapport à celle de la cathode.

En fonction du moment où le défaut apparaît au cours du cycle de tension, le courant de défaut qui en résulte dans les enroulements du transformateur peut être notablement plus élevé que les courants de défaut limités par la réactance qui apparaissent dans les réseaux conventionnels de puissance en courant alternatif au cours d'un court-circuit triphasé.

Si l'on se réfère à la Figure 22, on voit qu'en présence d'un défaut sur le bras D1 (F2), les deux autres bras dans cette moitié du pont redresseur (D3 et D5) peuvent toujours rester conducteurs, mais l'autre moitié (bras D2, D4 et D6) n'est plus conductrice.

Dans ces circonstances, les courants de défaut contiennent une composante unidirectionnelle à laquelle s'ajoute une composante alternative. Ceci sera expliqué un peu plus avant dans l'Article. La composante unidirectionnelle décroît dans le temps tandis que la composante alternative est stationnaire.

**Key**

F1 is fault 1

F2 is fault 2

 Z_L is load**Figure 22 – Short-circuit fault conditions**

The first fault condition is a short circuit across the terminals of the full wave bridge (F1). Under this fault condition, the current is determined by the reactance and resistance values of the supply and transformer as in the conventional power circuit conditions.

The second fault is a fault across an individual arm of the bridge that would occur in the event of the failure of the surge arrester (F2). This type of fault is extremely rare.

A similar situation can occur in mercury arc converters (MAR).

In these devices, the condition that determines the maximum peak fault current experienced by the transformer is called the 'arc-back' or 'back-fire' condition.

Arc-back or back-fire is the condition when an MAR tank fails and is not supposed to be conducting, i.e. at a time when the anode voltage is negative with respect to the cathode.

Depending at the point in the voltage cycle where the fault occurs, the resulting fault current in the transformer windings can be significantly higher than the normal reactance limited fault currents experienced in conventional a.c. power system during a three-phase short circuit.

Referring to Figure 22, it will be seen that with a fault across arm D1 (F2) the other two arms in that half of the bridge (D3 and D5) may still conduct but the other half of the bridge (arms D2, D4 and D6) cannot conduct.

Fault currents in these circumstances contain a unidirectional component to which is added an alternating component. This will be explained later in this Clause. The unidirectional component decreases with time while the alternating component is stationary.

La composante unidirectionnelle cause un courant asymétrique de crête peu après l'apparition de la défaillance. Ce courant de crête cause la contrainte mécanique la plus élevée dans les enroulements du transformateur et il est nécessaire lors de la conception du transformateur pour connaître le niveau que ce courant de crête peut atteindre dans le cas le plus défavorable.

Dans ce cadre, le défaut peut être considéré comme un court-circuit entre deux phases dans un réseau triphasé à courant alternatif avec application des composantes symétriques. La valeur efficace du courant de défaut stationnaire est donc

$$I_{fs} = \frac{U_{vN}}{z_+ + z_-}$$

où

U_{vN} est la tension assignée (entre phases) du côté valve du transformateur, valeur efficace;

z_+ et z_- sont les impédances de séquence positive et négative respectivement du transformateur et du réseau alimentant le transformateur du côté primaire, toutes deux rapportées au côté valve du transformateur.

Si le transformateur est situé loin des générateurs rotatifs, ce qui signifie qu'il existe un apport d'impédance considérable provenant des composantes statiques du réseau entre le transformateur et les générateurs, $z_+ \approx z_- = z$.

dans ce cas:

$$I_{fs} = \frac{U_{vN}}{2z}$$

Pour expliquer et inclure la composante de courant unidirectionnel, on considère un circuit monophasé simple contenant une inductance L connectée en série avec une résistance R . Le circuit est connecté à une source en courant alternatif avec une tension

$$u(t) = \hat{U} \times \sin(\omega t + \psi)$$

lorsqu'un commutateur se ferme au temps $t = 0$. ψ est alors l'angle sur la courbe des tensions.

L'équation différentielle suivante s'applique pour le courant dans le circuit

$$L \frac{di}{dt} + Ri = \hat{U} \times \sin(\omega t + \psi)$$

La solution de cette équation est

$$i(t) = \frac{\hat{U}}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \times \left[\sin(\omega t + \psi - \varphi) - \sin(\psi - \varphi) \cdot e^{-t/\tau} \right]$$

The unidirectional component causes an asymmetric current peak shortly after the occurrence of the fault. This current peak causes the highest mechanical stress in the transformer windings, and it is necessary when designing the transformer to know the level this current peak may amount to in the worst case.

For this purpose, the fault can be considered as a short circuit between two phases in a three-phase a.c. system with application of symmetrical components. The r.m.s. value of stationary fault current is then

$$I_{fs} = \frac{U_{vN}}{z_+ + z_-}$$

where

U_{vN} is the rated voltage (phase-to-phase) on the valve side of the transformer, r.m.s. value

z_+ and z_- are the positive and negative sequence impedances respectively of the transformer and the system feeding the transformer on its primary side, both referred to the valve side of the transformer.

If the transformer is situated far away from the rotating generators, which means that there is considerable impedance contribution from static system components between the transformer and the generators, $z_+ \approx z_- = z$.

then

$$I_{fs} = \frac{U_{vN}}{2z}$$

To explain and include the unidirectional current component, a simple single-phase circuit containing an inductance L connected in series with a resistance R is considered. The circuit is connected to an a.c. source with a voltage

$$u(t) = U \cdot \sin(\omega t + \psi)$$

when a switch closes at the time $t = 0$. ψ is then the angle on the voltage curve.

The following differential equation applies for the current in the circuit

$$L \frac{di}{dt} + Ri = \hat{U} \cdot \sin(\omega t + \psi)$$

The solution of this equation is

$$i(t) = \frac{\hat{U}}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \cdot \left[\sin(\omega t + \psi - \varphi) - \sin(\psi - \varphi) \cdot e^{-t/\tau} \right]$$

où

φ est l'angle entre la tension et le courant $\left(= \arctan \frac{\omega L}{R} \right)$

τ est la constante de temps du circuit $\left(= \frac{L}{R} \right)$

R et L sont respectivement la résistance et l'inductance totale pour tout le circuit incluant le transformateur et le réseau d'alimentation du côté primaire du transformateur.

$$z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

Le premier terme entre parenthèses dans l'équation ci-dessus pour $i(t)$ est un facteur concernant la composante alternative stationnaire du courant, tandis que le second terme est un facteur concernant la composante unidirectionnelle. Le facteur hors des parenthèses, $\hat{U}/z$, est la valeur d'amplitude du courant alternatif stationnaire. Partant du circuit monophasé ci-dessus vers le coffret asymétrique d'un réseau triphasé, le dernier facteur deviendra $\hat{U}/2z$ compte tenu de ce qui précède. Par conséquent

$$i(t) = \frac{\hat{U}}{2z} \cdot \left[\sin(\omega t + \psi - \varphi) - \sin(\psi - \varphi) \cdot e^{-t/\tau} \right]$$

En pratique $R \ll \omega L$ et $\varphi \approx \pi/2$. La valeur temporaire maximale du courant dépend de l'angle ψ lorsque le commutateur ferme (le défaut apparaît) au moment $t = 0$.

$i(t)$ obtient son maximum si le défaut apparaît selon un angle $\psi = 0$. Le courant atteint ensuite son maximum environ une demi-période après l'apparition du défaut, c'est à dire lorsque $\omega t \approx \pi$. Si une fonction exponentielle ≈ 1 (ce qui signifie une valeur t très élevée), l'expression entre parenthèses ≈ 2 et

$$i(t)_{\max} \approx \frac{\hat{U}}{z}$$

Avec t dans la gamme de 10 ms à 50 ms $i(t)_{\max}$ varie dans la gamme

$$(0,7 - 0,9) \cdot \frac{\hat{U}}{z}$$

Si le défaut apparaît lorsque la tension est à son maximum ($\psi = \pi/2$), le dernier terme entre parenthèses disparaît et la composante unidirectionnelle est égale à zéro. Le courant sera symétrique autour de l'axe de temps. La valeur de crête du courant ($\hat{U}/2z$) sera ensuite atteinte lorsque $\omega t = \pi/2$.

Si le transformateur est situé près des générateurs rotatifs, ce qui signifie qu'il y a un faible apport d'impédance provenant des composants statiques entre le transformateur et les générateurs, alors z_- peut être plus faible que z_+ et par conséquent $z_+ + z_- < 2z$, et le courant $i(t)$ sera proportionnellement plus élevé que ce qui est indiqué dans ce qui précède.

Le courant de défaut stationnaire (valeur efficace) dans le cas d'un court-circuit triphasé est

$$I_{fs} = \frac{U_{vN}}{\sqrt{3} \cdot z} = \frac{U_{vN}}{\sqrt{3} \cdot z_+}$$

where

φ is the angle between the voltage and the current $\left(= \arctan \frac{\omega L}{R} \right)$

τ is the time constant of the circuit $\left(= \frac{L}{R} \right)$

R and L are the total resistance and inductance respectively for the whole circuit including the transformer and the feeding power system on the primary side of the transformer.

$$z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

The first term within the parenthesis in the above equation for $i(t)$ is a factor relevant to the stationary alternating component of the current, while the second term is a factor relevant to the unidirectional component. The factor outside the parenthesis, $\hat{U}/z$, is the amplitude value of the stationary alternating current. Going from the single-phase circuit above to the unsymmetrical case of a three-phase system, the latter factor will according to the foregoing become $\hat{U}/2z$. Then

$$i(t) = \frac{\hat{U}}{2z} \cdot \left[\sin(\omega t + \psi - \varphi) - \sin(\psi - \varphi) \cdot e^{-t/\tau} \right]$$

In practice $R \ll \omega L$ and $\varphi \approx \pi/2$. The maximum momentary value of the current depends on the angle ψ when the switch closes (the fault occurs) at the time $t = 0$.

$i(t)$ obtains its maximum if the fault occurs at an angle $\psi = 0$. The current reaches then its maximum approximately half a period after the occurrence of the fault, that is when $\omega t \approx \pi$. If the exponential function ≈ 1 (which means very large t), the expression within the parenthesis ≈ 2 and

$$i(t)_{\max} \approx \frac{\hat{U}}{z}$$

With t in the range 10 ms to 50 ms $i(t)_{\max}$ varies in the range

$$(0,7 - 0,9) \cdot \frac{\hat{U}}{z}$$

If the fault occurs when the voltage is at its maximum ($\psi = \pi/2$), the last term within the parenthesis disappears and the unidirectional component equals zero. The current will be symmetric about the time axis. The peak value of the current ($\hat{U}/2z$) will then be reached when $\omega t = \pi/2$.

If the transformer is situated close to the rotating generators, which means there is little impedance contribution from static components between the transformer and the generators, then z_- may be smaller than z_+ and consequently $z_+ + z_- < 2z$, and the current $i(t)$ will be correspondingly higher than indicated in the foregoing.

The stationary fault current (r.m.s.) in case of a three-phase short circuit is

$$I_{fs} = \frac{U_{vN}}{\sqrt{3} \cdot z} = \frac{U_{vN}}{\sqrt{3} \cdot z_+}$$

Le courant de défaut lorsque deux phases sont court-circuitées est supérieur au courant de court-circuit triphasé lorsque

$$\sqrt{3} \cdot z_+ > z_+ + z_-$$

et par conséquent lorsque

$$z_- < 0,73 z_+$$

13 Éléments constitutifs

13.1 Changeurs de prises en charge

13.1.1 Généralités

Les changeurs de prise ont principalement été développés pour fonctionner dans des circuits et des conditions de fonctionnement de transformateurs de puissance c.a.. Les changeurs qui sont associés à des convertisseurs utilisés pour des applications industrielles et CCHT font l'objet d'un nouvel ensemble de conditions qui doivent être prises en compte pour leur spécification et leur fonctionnement. Les fabricants de changeur de prise souhaitent généralement adapter les mécanismes pour qu'ils fonctionnent dans ces circonstances particulières, et en fait, développer et mettre au point les mécanismes existants. Cependant, il est fortement recommandé, pour les transformateurs objet de la CEI 61378-1 et de la CEI 61378-2, que l'association du transformateur et du changeur de prise correspondant soit définie conjointement entre les deux fabricants.

13.1.2 Convertisseurs pour applications industrielles

Le présent paragraphe décrit les diverses manières dont les changeurs de prise ont été adaptés pour ces applications, ainsi que les exigences spécifiques dont il faut convenir avec le fabricant des changeurs de prise.

- a) Il est possible d'obtenir un grand nombre de positions de prises en charge en utilisant de nombreuses prises grossières/fines sur un seul changeur de prises. Ces modèles sont en général liés aux autotransformateurs du côté ligne du transformateur de conversion principal. Dans de tels dispositifs, les changeurs de prise peuvent être actionnés soit du côté ligne soit du côté neutre des réseaux moyenne tension (jusqu'à environ 88 kV). Ces modèles peuvent aller jusqu'à 100 positions de réglage par rapport aux mécanismes conventionnels (environ 35 positions de réglage). Il est par conséquent nécessaire d'établir les exigences relatives aux tensions de fonctionnement et d'essai pour les diverses positions de réglage fin et grossier des prises.
- b) De même, les exigences de fonctionnement de ces applications sont en général liées à de larges gammes de prises. Ainsi, par exemple, il n'est pas rare de voir des gammes de prises allant jusqu'à 100 %. Ceci peut être comparé à un transformateur de réseau conventionnel pour lequel l'ensemble de la gamme atteint habituellement 30 % ou moins. Dans de telles circonstances, la capacité de réglage de la tension de pas du changeur de prise exige une attention particulière. Dans les applications industrielles, deux types de conditions de surcharge peuvent être rencontrés. La première correspond à la surcharge conventionnelle qui maintient le processus en fonctionnement lorsqu'il existe une condition d'exploitation particulière. Pour ce type de surcharge qui peut durer pendant plusieurs heures, un changement de prise est normalement prévu. Le second type de surcharge fait partie des exigences de délestage lorsqu'un transformateur fonctionnant en parallèle avec d'autres est soudainement débranché du réseau. Pour réduire la charge à des niveaux de sécurité sur les appareils restants, les changeurs de prise devront fonctionner à des courants plus élevés que la pleine charge normale, pendant une durée limitée. Dans les deux types de surcharge, les performances des changeurs de prises devront être comprises et définies.

The fault current when two phases are short-circuited is higher than the three-phase short circuit current when

$$\sqrt{3} \cdot z_+ > z_+ + z_-$$

and consequently when

$$z_- < 0,73 z_+$$

13 Components

13.1 On-load tap-changers

13.1.1 General

Tap-changers have mainly been developed for operation in a.c. power transformer circuits and operating conditions. Those used in association with converters in both industrial and HVDC applications present a new set of conditions that have to be taken into account when specifying and operating them. Tap-changer manufacturers are generally willing to adapt the gears for operating in these special circumstances and indeed develop and refine the existing gears. However, it is strongly recommended that for the transformers covered in IEC 61378-1 and IEC 61378-2, the combination of transformer and its associated tap-changer be jointly established between the two manufacturers.

13.1.2 Converters for industrial applications

In these applications, the following details outline some of the various ways that tap-changers have been adapted and for which specific requirements shall be agreed with the tap-changer manufacturer.

- a) The requirement to achieve a large number of on-load tap positions may be achieved by multiple coarse/fine tapping on a single tap-changer. These schemes are usually associated with autotransformers on the line side of the main converter transformer. In these arrangements, the tap-changers may be operated at either the line end or neutral end of medium voltage systems (up to about 88 kV). Schemes of this type may achieve in excess of 100 positions compared to about 35 with conventional gears. It is therefore necessary to establish operating and test voltage requirements across the various coarse and fine tap positions.
- b) The operating requirements of these applications are also usually associated with wide tap ranges. So, for example, tap ranges approaching 100 % are not unknown. This may be compared to a conventional system transformer where the entire range will typically be 30 % or less. In these circumstances, the step voltage capability of the tap-changer requires particular attention. In industrial applications, two types of overload condition may be encountered. The first type is a conventional overload that keeps the process in operation whilst a particular operating condition exists. In this type of overload that may persist for some hours, normal tap changing is expected. The second type of overload forms part of load shedding requirements when one transformer operating in parallel with others is suddenly tripped from the system. In order to reduce the load on the remaining units to safe levels, the tap-changers will be required to operate but at higher currents than the normal full load for a limited period. In both types of overload, the performance of the tap-changers will need to be understood and defined.

13.1.3 Convertisseurs pour applications CCHT

Les conditions spécifiques aux applications CCHT devant être prises en compte pour définir le changeur de prise en charge peuvent être résumées comme suit.

- a) Les applications CCHT sont en général associées à des gammes de prises plus étendues que celles des transformateurs de réseau conventionnels. Des gammes supérieures à 30 % sont communément utilisées et par conséquent, les tensions de fonctionnement et d'essai qui en résultent doivent être clairement définies.
- b) La seule différence la plus importante qui touche les changeurs de prise dans des applications CCHT est la forme d'onde du courant de charge. En fonctionnement normal des valves à thyristor, la forme d'onde du courant du côté valve n'est pas sinusoïdale, et ceci est reflété du côté ligne où le changeur de prise est positionné électriquement. De telles formes d'ondes modifient notablement le temps de commutation du courant (di/dr) dans le système de commutation. Elles affectent notamment la tension de récupération des contacts de commutation principaux, c'est-à-dire la chute de tension au niveau des résistances de transition. Les caractéristiques assignées de ces résistances doivent donc être choisies de manière à prendre en charge la vraie nature de la forme d'onde du courant. Ainsi, pour spécifier un changeur de prise destiné à des applications CCHT, ce temps de commutation du courant doit être précisé de manière à obtenir la valeur correcte de la résistance de transition.

Des études sont actuellement en cours dans le domaine des changeurs de prises à pont de résistance et la situation décrite ci-dessus pourrait bien être modifiée. L'utilisation d'interrupteurs à vide dans les circuits de commutation changera la manière dont le changeur de prise fonctionne, en comparaison aux ponts à résistance à grande vitesse conventionnels. Le nouvel organe du circuit est l'interrupteur à vide. On pense à l'heure actuelle que leurs performances ne seront pas affectées de manière préjudiciable par la forme d'onde du courant. Il est cependant recommandé de réexaminer ce point une fois ces nouvelles découvertes appliquées dans des systèmes réels.

13.2 Traversées du côté valve

13.2.1 Généralités

Les performances des réseaux CCHT ont fait l'objet de nombre d'études depuis de nombreuses années, principalement sous les auspices du CIGRE. Ces études ont malheureusement mais indubitablement montré que certains des organes les plus vulnérables et les plus enclins aux défaillances dans les réseaux CCHT sont les traversées du côté valve du réseau. Ces traversées peuvent faire partie de l'ensemble du transformateur ou être du type air/air passant par les cloisons de la galerie des valves (voir la Figure 23). Dans tous les cas, il est d'une importance vitale de démontrer que la spécification, l'intégration et les essais de ces traversées confirment leur adéquation pour utilisation dans des réseaux CCHT. L'objectif de cette norme est de fournir des instructions sur les traversées à utiliser du côté valve des réseaux CCHT.

Il existe nombre de normes CEI, déjà publiées ou en cours d'élaboration, qui s'appliquent à la présente norme. Ces normes donnent les «règles» spécifiques aux thèmes objet de la présente partie de la CEI 61378.

13.2.2 Implantation du poste

La Figure 23 illustre les diverses manières d'utilisation et de montage des traversées du côté valve. L'implantation du poste peut affecter la conception de la traversée en termes de type de traversée et de matériau d'isolation utilisé. En outre, l'implantation sera affectée par des considérations d'ordre spatial, des risques de pollution de l'huile à l'intérieur de la galerie des valves, ainsi que le risque global d'incendie dans le poste.

Un autre aspect mérite également d'être noté. Les statistiques de performance précédemment mentionnées indiquent que le risque potentiel pour les traversées dépend de la manière dont elles ont été montées, c'est-à-dire verticalement ou horizontalement.

13.1.3 Converter for HVDC applications

The conditions specific to HVDC applications that require attention in defining the on-load tap-changer may be summarized as follows.

- a) The HVDC applications are usually associated with wider tap ranges than the conventional system transformer. Ranges in excess of 30 % are common so the working and test voltages that result from such ranges shall be clearly defined.
- b) The single largest difference that affects tap-changers in HVDC is the waveshape of the load current. In the normal operation of thyristor valves, the valve-side current waveshape is not sinusoidal and this is reflected in the line side where the tap-changer is electrically positioned. Such waveshapes significantly modify the rate of change of the current (di/dt) through the diverter switch. In particular, this affects the recovery voltage of the main switching contacts, i.e. the voltage drop at the transition resistors. Therefore, the resistors shall be rated to accommodate the true nature of the current waveshape. It follows that in specifying a tap-changer for use on HVDC, this rate of change of current shall be specified so that the correct value of transition resistor is provided.

There are developments underway in the field of resistor-type tap-changers that may modify the above situation. The use in diverter circuits of vacuum interrupters will modify the way tap-changers operate compared to conventional high speed resistor bridging. The new component in the circuit is the vacuum interrupter. At present it is believed that their performance will not be adversely affected by the current waveshape. However, it is recommended that when these developments are used in actual systems, this matter should be reviewed further.

13.2 Valve-side bushings

13.2.1 General

A number of investigations into the performance of HVDC systems have been undertaken over the years, mainly under the auspices of CIGRE. Unfortunately, these studies have consistently shown that some of the most vulnerable and prone to failure components within HVDC systems are the bushings that operate on the valve side of the system. These bushings may form part of the transformer assembly or be air/air type through valve hall walls (see Figure 23). In either case, the evidence shows that the specification, integration and testing of these bushings to confirm their suitability for operation in HVDC systems is of vital importance. It is the aim of this standard to give direction on the bushings for use on the valve side of HVDC systems.

There are a number of IEC standards in existence, or in the course of preparation, that are applicable to this standard. These standards give the specific 'rules' for the topics that are referred to in this guide.

13.2.2 Station layout

Figure 23 shows that there are a number of ways that the bushings on the valve side may be used and mounted. The station layout may affect the bushing design with respect to the type of bushing and insulation material that is used. In addition, the layout will be affected by space considerations, oil pollution risks inside the valve hall and overall fire risks in the station.

One further aspect is also to be noted. The performance statistics referred to earlier indicate that the potential risk to the bushing depends upon whether it is vertically or horizontally mounted.

13.2.3 Considérations d'ordre technique

Dans les réseaux CCHT, les traversées du côté valve sont universellement du type à feuille condensateur (métallique). Cependant la répartition des contraintes de tension dans des conditions de travail et d'essai, comme pour la structure d'isolement principal du transformateur, est déterminée par les résistivités relatives des éléments d'isolement utilisés dans la traversée.

On sait que la division de la tension à partir d'une répartition déterminée par la résistivité donnerait lieu à des contraintes de fluage en tension à la surface de la traversée. Il convient que cette contrainte soit contrôlée dans des limites acceptables. Dans l'idéal, il convient qu'il y ait une collaboration entre les fabricants pour concevoir une isolation à l'interface entre la traversée et le transformateur.

13.2.4 Types de traversées

Au cours des années, de nombreux types et dispositions de traversées ont été utilisés du côté valve. Les deux principaux types actuellement utilisés sont énumérés ci-dessous (liste non limitative).

- a) Traversées en papier imprégné à l'huile (OIP)
 - Le corps du condensateur de la traversée est contenu dans une enveloppe isolante.
 - L'enveloppe peut être en porcelaine ou en silicone composite.
 - L'espace entre la partie active et l'enveloppe peut être rempli d'huile, de gaz SF₆ ou d'une mousse de polyuréthane isolant sec.
- b) Traversée imprégnée à la résine de type sec
 - Le corps du condensateur de la traversée sera contenu dans une enveloppe isolante.
 - Si le corps du condensateur est contenu dans une enveloppe isolante, les choix de remplissage de l'espace sont ceux des traversées OIP.

13.2.5 Essais

Il est important, dans toute la mesure du possible, de définir les conditions d'essai de manière à représenter les conditions réelles de montage du transformateur en service. Dans la pratique, ceci exige une réplique du système de protection contre les contraintes dans le transformateur et idéalement de le monter dans le même sens qu'en service. En outre, si la traversée du côté valve est montée dans un piétement, il convient que l'ensemble d'essai soit un piétement du même diamètre que le piétement utilisé en service.

Les traversées du côté valve exigent à la fois les essais conventionnels requis pour les transformateurs de puissance en courant alternatif et les essais requis pour les tensions continues. Il est recommandé d'effectuer les deux séries d'essais dans l'ensemble piétement d'essai et isolement qui reproduit les conditions réelles en service.

Les niveaux d'essai sont définis dans les normes applicables aux traversées CCHT. Dans les normes en vigueur, les niveaux d'essai, tant pour les courants alternatifs que pour les courants continus, sont renforcés par rapport à ceux auxquels le transformateur sera soumis lors des essais finaux en usine. Dans le cas où une norme de traversée ne fait pas partie de la spécification, il est recommandé de convenir dans le contrat que les essais des traversées du côté valve soient réalisés à des niveaux de tension renforcés.

13.2.3 Technical considerations

In HVDC systems, the valve-side bushings are universally of the condenser foil type. However, the voltage stress under working and test voltage distribution in common with the main transformer insulation structure is determined by the relative resistivities of the insulation components used in the bushing.

It is known that the voltage division from such a resistivity-determined distribution would result in a voltage creep stress along the surface of the bushing. This stress should be controlled to within acceptable limits. Ideally, the manufacturers should be required to design in partnership an insulation structure at the bushing to transformer interface.

13.2.4 Bushing types

Over the years, a number of types and arrangements have been used for the valve-side bushing. The main two types in current use are listed below (this list is not intended to limit the choices).

a) Oil impregnated paper bushings (OIP)

- The capacitor body of the bushing is contained within an insulating envelope.
- The envelope may be porcelain or a silicone composite.
- The space between core and envelope may be filled with oil, SF₆ gas or a dry insulating polyurethane foam.

b) Dry type resin impregnated bushing

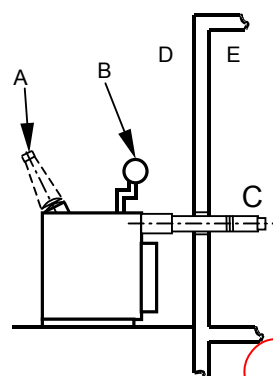
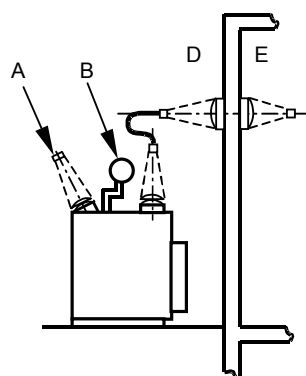
- The capacitor body of the bushing may be contained within an insulating envelope.
- If the capacitor body is contained, then the alternatives for the insulating envelope and the intervening space filling are as for the OIP bushings.

13.2.5 Testing

It is important that the test conditions be set, as far as practically possible, so as to represent the actual conditions when mounted in the transformer in service. In practice, this requires that the stress control barrier system within the transformer is replicated and ideally mounted in the same orientation as for service. In addition, if the valve-side bushing is mounted in a turret then the test assembly should be in a turret with the same diameter as the service turret.

Valve-side bushings are unique in that both conventional testing as required for a.c. power transformers and testing with d.c. voltages are required. It is recommended that both test sequences are carried out in the test turret and insulation assembly that replicates the conditions in service.

The test levels are set in the relevant standards for HVDC bushings. In the current standards, the test levels for both the a.c. and d.c. tests are enhanced from those to which the transformer will be subjected during the final factory tests. In the event that a bushing standard does not form part of the specification, it is recommended that valve-side bushing testing at enhanced voltage levels is agreed in the contract.



IEC 531/06

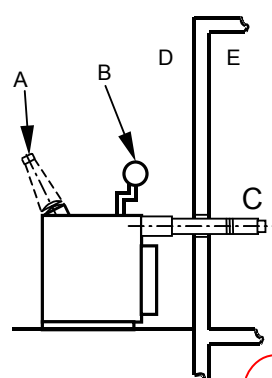
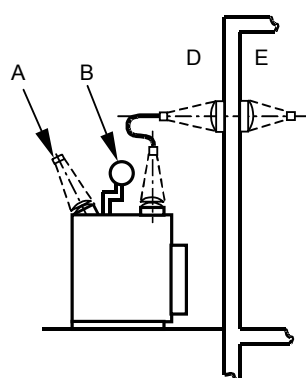
Légende

A – Ligne c.a B – Conservateur d'huile C – Côté valve D – Zone à l'air libre E – Galerie des valves

Figure 23a – Traversée extérieure

Figure 23b – Traversée de cloison de la galerie des valves

Figure 23 – Disposition des traversées des valves



IEC 531/06

Key

A – AC line

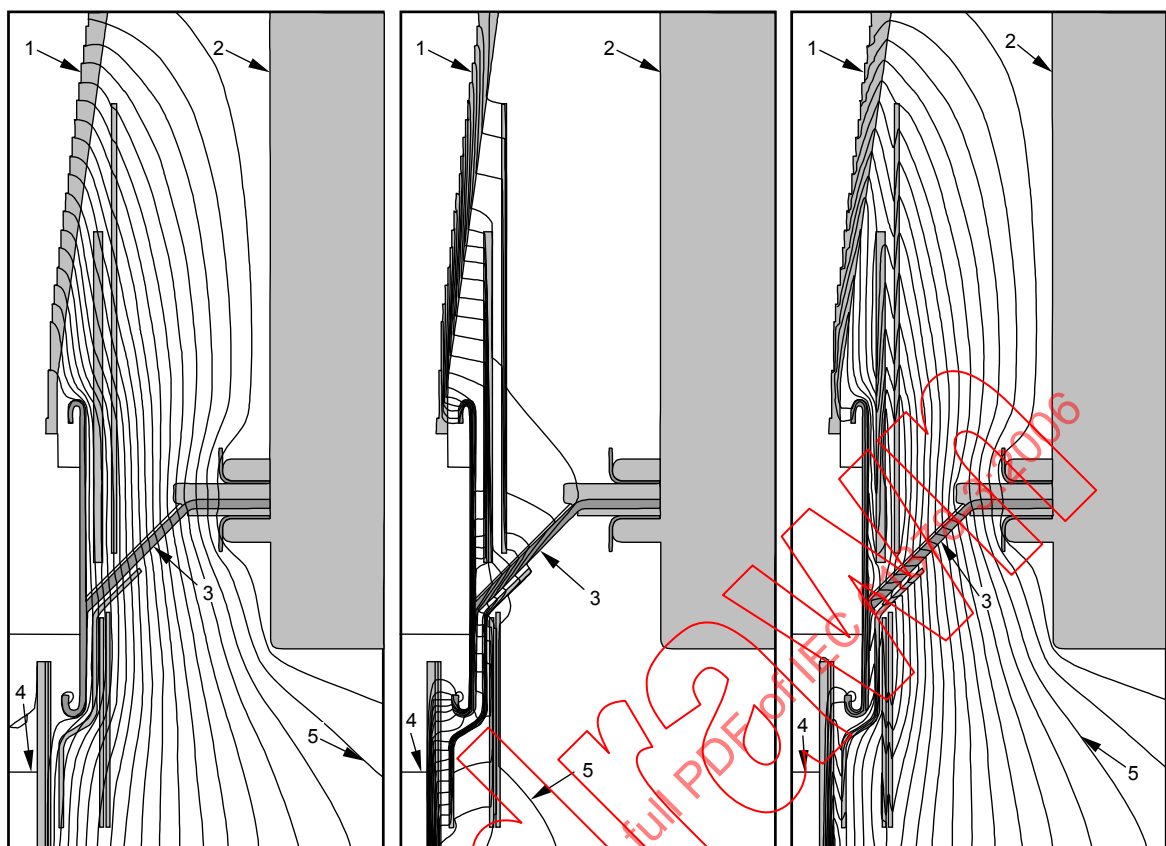
B – Oil conservator

C – Valve side

D – Outdoor area

E – Valve hall

Figure 23a – Outdoor bushing**Figure 23b – Through-wall transformer bushing****Figure 23 – Arrangement of valve bushings**



IEC 532/06

Légende

1 – Traversée

2 – Piétement de cuve

3 – Support d'isolateur séparateur

4 – Conducteur HT

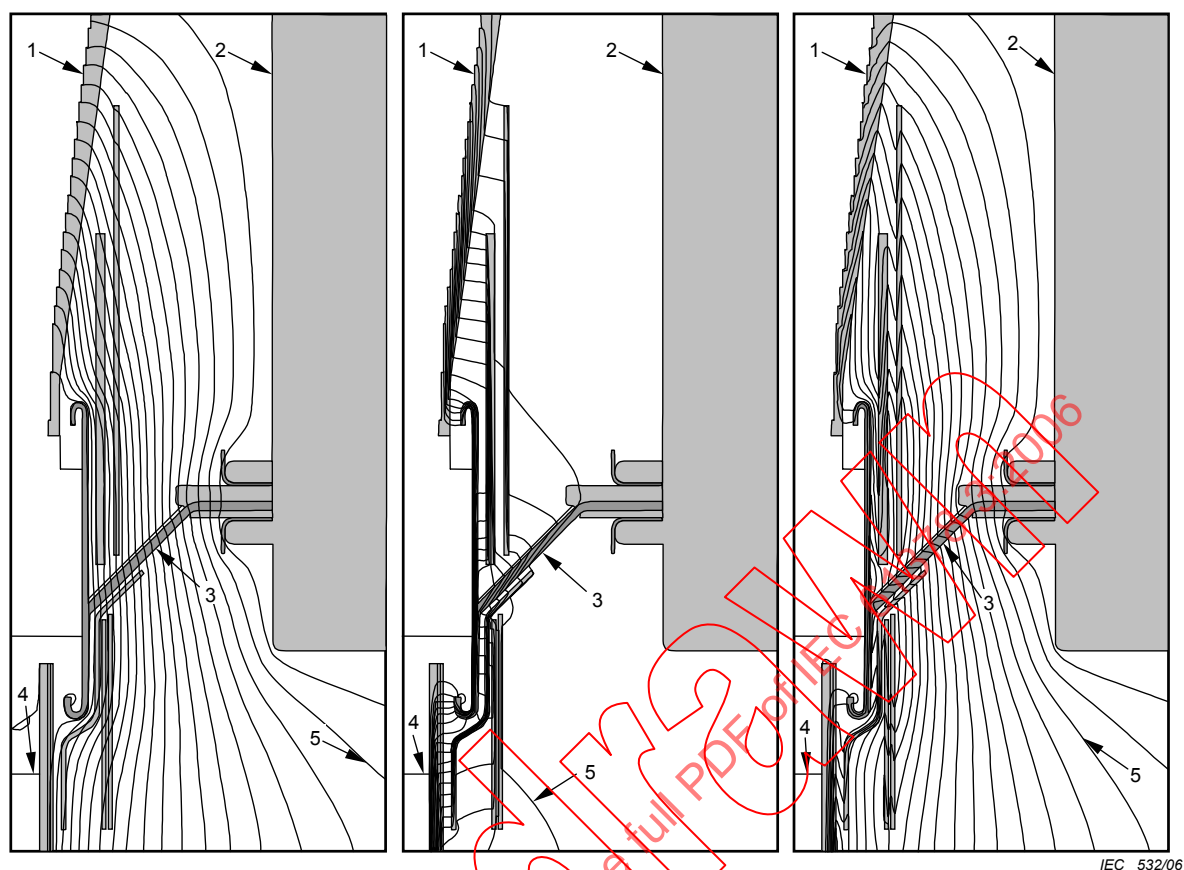
5 – Lignes équipotentielle à des intervalles de 5 %

Figure 24a – Conditions en c.a.

Figure 24b – Conditions en c.c.
(20 °C)

Figure 24c – Inversion de polarité
(20 °C)

Figure 24 – Exemples de champs électriques c.a, c.c. et combinés adjacents aux traversées CCHT et systèmes d'isolation électriques associés



IEC 532/06

Key

- | | | |
|-----------------|----------------------------------|--|
| 1 – Bushing | 3 – Insulation support/separator | 5 – Equipotential lines at 5 % intervals |
| 2 – Tank turret | 4 – HV lead | |

Figure 24a – AC conditions**Figure 24b – DC conditions
(20 °C)****Figure 24c – Polarity reversal
(20 °C)****Figure 24 – Examples of a.c., d.c. and combined electric field dispositions adjacent to HVDC bushings and associated electric insulation systems**