

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

60076-5

Troisième édition
Third edition
2006-02

Transformateurs de puissance –

**Partie 5:
Tenue au court-circuit**

Power transformers –

**Part 5:
Ability to withstand short circuit**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 60076-5:2006

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**

60076-5

Troisième édition
Third edition
2006-02

Transformateurs de puissance –

**Partie 5:
Tenue au court-circuit**

Power transformers –

**Part 5:
Ability to withstand short circuit**

© 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 Varembe, PO Box 131, CH-1211 Geneva 20, Switzerland
Telephone: +41 22 919 02 11 Telefax: +41 22 919 03 00 E-mail: inmail@iec.ch Web: www.iec.ch



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

W

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

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	4
1 Domaine d'application	8
2 Références normatives.....	8
3 Exigences relatives à la tenue au court-circuit.....	8
3.1 Généralités.....	8
3.2 Conditions de surintensités	10
4 Démonstration de la tenue au court-circuit.....	16
4.1 Tenue thermique au court-circuit	16
4.2 Tenue aux effets dynamiques de court-circuit.....	22
Annexe A (informative) Evaluation théorique de la capacité de résister aux effets dynamiques de court-circuit	40
Annexe B (informative) Définition de transformateur similaire	70
Figure 1 – Transformateur connecté en étoile-triangle	28
Figure 2 – Autotransformateur étoile-étoile	30
Tableau 1 – Valeurs minimales de l'impédance de court-circuit reconnues pour transformateurs à deux enroulements séparés.....	12
Tableau 2 – Puissance apparente de court-circuit du réseau	12
Tableau 3 – Valeurs maximales admissibles de la température moyenne de chaque enroulement après court-circuit.....	20
Tableau 4 – Valeurs du facteur $k \times \sqrt{2}$	24
Tableau A.1 – Comparaison des forces et les contraintes dans les transformateurs colonnes	60
Tableau A.2 – Comparaison des forces et des contraintes dans les transformateurs cuirassés	64
Tableau A.3 — Valeurs pour le facteur K_3	68
Tableau A.4 — Valeurs pour le facteur K_4	68

CONTENTS

FOREWORD.....	5
1 Scope.....	9
2 Normative references	9
3 Requirements with regard to ability to withstand short circuit.....	9
3.1 General	9
3.2 Overcurrent conditions	11
4 Demonstration of ability to withstand short circuit.....	17
4.1 Thermal ability to withstand short circuit.....	17
4.2 Ability to withstand the dynamic effects of short circuit	23
Annex A (informative) Theoretical evaluation of the ability to withstand the dynamic effects of short circuit	41
Annex B (informative) Definition of similar transformer.....	71
Figure 1 – Star/delta connected transformer	29
Figure 2 – Star/star auto-transformer	31
Table 1 – Recognized minimum values of short-circuit impedance for transformers with two separate windings	13
Table 2 – Short-circuit apparent power of the system.....	13
Table 3 – Maximum permissible values of the average temperature of each winding after short circuit.....	21
Table 4 – Values for factor $k \times \sqrt{2}$	25
Table A.1 – Comparison of forces and stresses in core-type transformers	61
Table A.2 – Comparison of forces and stresses in shell-type transformers	65
Table A.3 — Values for factor K_3	69
Table A.4 — Values for factor K_4	69

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE –

Partie 5: Tenue au court-circuit

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Électrotechnique 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 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 tels 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. Toute divergence entre la norme de la CEI et la norme nationale ou régionale correspondante doit être indiquée en termes clairs dans cette dernière.
- 5) La CEI n'a fixé aucune procédure concernant le marquage comme indication d'approbation et sa responsabilité n'est pas engagée quand un matériel est déclaré conforme à l'une de ses normes.
- 6) 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 indispensable 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 60076-5 a été établie par le comité d'études 14 de la CEI: Transformateurs de puissance.

Cette troisième édition annule et remplace la seconde édition publiée en 2000. Cette troisième édition constitue une révision technique.

Cette édition comprend les modifications techniques majeures suivantes par rapport à l'édition précédente de la norme:

- a) introduction de l'Annexe A (informative) – «Évaluation théorique de la capacité de résister aux effets dynamiques de court-circuit», au lieu de l'Annexe B (normative) précédente – «Méthode de calcul pour la démonstration de la tenue au court-circuit » (à blanc);
- b) introduction de l'Annexe B (informative) – «Définition de transformateur similaire», au lieu de l'Annexe A (informative) précédente – «Guide pour l'identification d'un transformateur similaire».

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

POWER TRANSFORMERS –

Part 5: Ability to withstand short circuit

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 60076-5 has been prepared by IEC technical committee 14: Power transformers.

This third edition cancels and replaces the second edition published in 2000. This third edition constitutes a technical revision.

This edition includes the following significant technical changes with respect to the previous edition:

- a) introduction of Annex A (informative) – “Theoretical evaluation of the ability to withstand the dynamic effects of short circuit”, in place of previous Annex B (normative) – “Calculation method for the demonstration of the ability to withstand short circuit” (blank);
- b) introduction of Annex B (informative) – “Definition of similar transformer”, in place of previous Annex A (informative) – “Guidance for the identification of a similar transformer”.

Le texte de la présente norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
14/518/FDIS	14/523/RVD

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

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

La CEI 60076 comprend les parties suivantes présentées sous le titre général *Transformateurs de puissance*:

- Partie 1: Généralités
- Partie 2: Echauffement
- Partie 3: Niveaux d'isolement, essais diélectriques et distances d'isolement dans l'air
- Partie 4: Guide pour les essais au choc de foudre et au choc de manoeuvre – Transformateurs de puissance et bobines d'inductance
- Partie 5: Tenue au court-circuit
- Partie 6: Réacteurs¹
- Partie 7: Guide de charge pour transformateurs immergés dans l'huile
- Partie 8: Guide d'application
- Partie 10: Détermination des niveaux de bruit
- Partie 10-1: Détermination des niveaux de bruit – Guide d'application
- Partie 11: Transformateurs de type sec
- Partie 12: Guide de charge pour transformateurs de type sec¹
- Partie 13: Transformateurs auto-protégés remplis de liquide
- Partie 14: Conception et application des transformateurs de puissance immergés dans du liquide utilisant des matériaux isolants haute température
- Partie 15: Gas-filled-type power transformers (titre français non disponible)¹

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.

¹ A l'étude.

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

FDIS	Report on voting
14/518/FDIS	14/523/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.

IEC 60076 consists of the following parts, under the general title *Power transformers*:

- Part 1: General
- Part 2: Temperature rise
- Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air
- Part 4: Guide to the lightning impulse and switching impulse testing – Power transformers and reactors
- Part 5: Ability to withstand short circuit
- Part 6: Reactors ¹
- Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers
- Part 8: Application guide
- Part 10: Determination of sound levels
- Part 10-1: Determination of sound levels – Application guide
- Part 11: Dry-type transformers
- Part 12: Loading guide for dry-type power transformers¹
- Part 13: Self-protected liquid-filled transformers
- Part 14: Design and application of liquid-immersed power transformers using high-temperature insulation materials
- Part 15: Gas-filled-type power transformers¹

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.

¹ Under consideration.

TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE –

Partie 5: Tenue au court-circuit

1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 60076 identifie les exigences pour les transformateurs de puissance pour résister sans dommage aux effets des surcharges occasionnées par des courts-circuits externes. Elle décrit les procédés de calcul utilisés pour démontrer l'aptitude thermique d'un transformateur de puissance à supporter de telles surcharges ainsi que l'essai spécial et la méthode de calcul utilisée pour démontrer son aptitude à résister aux effets mécaniques afférents. Les exigences s'appliquent aux transformateurs définis dans le domaine d'application de la CEI 60076-1.

2 Références normatives

Les documents de références suivants sont indispensables pour l'application du présent document. Pour des 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) ²

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

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

CEI 60076-11:2004, *Transformateurs de puissance – Partie 11: Transformateurs de type sec*

3 Exigences relatives à la tenue au court-circuit

3.1 Généralités

Les transformateurs ainsi que tout l'équipement et les accessoires doivent être conçus et construits pour résister sans dommage aux effets thermiques et mécaniques des courts-circuits extérieurs dans les conditions spécifiées en 3.2.

Les courts-circuits extérieurs ne sont pas limités aux courts-circuits triphasés; ils comprennent les défauts entre phases, entre deux phases et la terre et entre phase et terre. Les courants issus de ces conditions dans les enroulements sont désignés comme surintensités dans la présente partie de la CEI 60076.

² Parue également la version 2.1 (2000) regroupant l'édition 2 de 1993 et son amendement de 1999.

POWER TRANSFORMERS –

Part 5: Ability to withstand short circuit

1 Scope

This part of IEC 60076 identifies the requirements for power transformers to sustain without damage the effects of overcurrents originated by external short circuits. It describes the calculation procedures used to demonstrate the thermal ability of a power transformer to withstand such overcurrents and both the special test and the theoretical evaluation method used to demonstrate the ability to withstand the relevant dynamic effects. The requirements apply to transformers as defined in the scope of IEC 60076-1.

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)²

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

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

IEC 60076-11:2004, *Power transformers – Part 11: Dry-type transformers*

3 Requirements with regard to ability to withstand short circuit

3.1 General

Transformers together with all equipment and accessories shall be designed and constructed to withstand without damage the thermal and dynamic effects of external short circuits under the conditions specified in 3.2.

External short circuits are not restricted to three-phase short circuits; they include line-to-line, double-earth and line-to-earth faults. The currents resulting from these conditions in the windings are designated as overcurrents in this part of IEC 60076.

² There exists a consolidated edition 2.1 (2000) that includes edition 2.0 and its amendment.

3.2 Conditions de surintensités

3.2.1 Considérations générales

3.2.1.1 Conditions d'application nécessitant une considération particulière

Les situations suivantes qui affectent l'amplitude, la durée ou la fréquence d'apparition de surintensité, nécessitent une considération particulière et doivent être clairement indiquées dans les spécifications:

- les transformateurs de régulation à très basse impédance, qui dépendent de l'impédance des appareils directement connectés pour limiter les surintensités;
- les transformateurs élévateurs sensibles aux fortes surintensités produites par la connexion du générateur au réseau hors synchronisme;
- les transformateurs directement connectés à des machines tournantes telles que les moteurs ou les condensateurs synchrones qui peuvent se comporter comme des générateurs pour fournir du courant au transformateur dans les conditions de défaut du réseau;
- les transformateurs spéciaux et les transformateurs installés dans les réseaux caractérisés par des taux de défaut élevés (voir 3.2.6);
- la tension de fonctionnement supérieure à la tension assignée maintenue à la borne ou aux bornes non défectueuses durant une condition de défaut.

3.2.1.2 Limitations en courant relatives aux transformateurs survolteurs-dévolteurs

Quand l'impédance combinée du transformateur survolteur-dévolteur et du réseau conduit à un niveau de courant de court-circuit tel que le transformateur ne peut pas, soit physiquement, soit économiquement, être conçu pour résister, le constructeur et l'acheteur doivent se mettre d'accord sur la surintensité maximale admise. Dans ce cas, il convient que l'acheteur prenne des dispositions pour limiter la surintensité à la valeur maximale déterminée par le constructeur et indiquée sur la plaque signalétique.

3.2.2 Transformateurs à deux enroulements séparés

3.2.2.1 Pour les besoins de la présente norme, on distingue, pour les transformateurs triphasés ou les bancs de transformateur en triphasé, trois catégories selon la puissance assignée:

- catégorie I: 25 kVA à 2 500 kVA;
- catégorie II: 2 501 kVA à 100 000 kVA;
- catégorie III: au-delà de 100 000 kVA.

3.2.2.2 En l'absence d'autres spécifications, le courant de court-circuit symétrique (en valeur efficace, voir 4.1.2) doit être calculé en tenant compte de l'impédance de court-circuit du transformateur et de l'impédance du réseau.

Pour les transformateurs de la catégorie I, on doit négliger dans le calcul du courant de court-circuit, l'impédance du réseau si celle-ci est égale ou inférieure à 5 % de l'impédance de court-circuit du transformateur.

La valeur de crête du courant de court-circuit doit être calculée selon les indications de 4.2.3.

3.2.2.3 Le Tableau 1 donne les valeurs minimales communément reconnues pour l'impédance de court-circuit des transformateurs pour le courant assigné (pour la prise principale). Si des valeurs plus faibles sont spécifiées, la tenue au court-circuit du transformateur doit faire l'objet d'un accord entre le constructeur et l'acheteur.

3.2 Overcurrent conditions

3.2.1 General considerations

3.2.1.1 Application conditions requiring special consideration

The following situations affecting overcurrent magnitude, duration, or frequency of occurrence require special consideration and shall be clearly identified in transformer specifications:

- regulating transformers with very low impedance that depend on the impedance of directly connected apparatus to limit overcurrents;
- unit generator transformers susceptible to high overcurrents produced by connection of the generator to the system out of synchronism;
- transformers directly connected to rotating machines, such as motors or synchronous condensers, that can act as generators to feed current into the transformer under system fault conditions;
- special transformers and transformers installed in systems characterized by high fault rates (see 3.2.6);
- operating voltage higher than rated maintained at the unfaulted terminal(s) during a fault condition.

3.2.1.2 Current limitations concerning booster transformers

When the combined impedance of the booster transformer and the system results in short-circuit current levels for which the transformer cannot feasibly or economically be designed to withstand, the manufacturer and the purchaser shall mutually agree on the maximum allowed overcurrent. In this case, provision should be made by the purchaser to limit the overcurrent to the maximum value determined by the manufacturer and stated on the rating plate.

3.2.2 Transformers with two separate windings

3.2.2.1 For the purpose of this standard, three categories for the rated power of three-phase transformers or three-phase banks are recognized:

- category I: 25 kVA to 2 500 kVA;
- category II: 2 501 kVA to 100 000 kVA;
- category III: above 100 000 kVA.

3.2.2.2 In the absence of other specifications, the symmetrical short-circuit current (for the r.m.s. value, see 4.1.2) shall be calculated using the measured short-circuit impedance of the transformer plus the system impedance.

For transformers of category I, the contribution of the system impedance shall be neglected in the calculation of the short-circuit current if this impedance is equal to, or less than, 5 % of the short-circuit impedance of the transformer.

The peak value of the short-circuit current shall be calculated in accordance with 4.2.3.

3.2.2.3 Commonly recognized minimum values for the short-circuit impedance of transformers at the rated current (principal tapping) are given in Table 1. If lower values are required, the ability of the transformer to withstand short circuit shall be subject to agreement between the manufacturer and the purchaser.

Tableau 1 – Valeurs minimales de l'impédance de court-circuit reconnues pour transformateurs à deux enroulements séparés

Impédance de court-circuit au courant assigné	
Puissance assignée kVA	Impédance minimale de court-circuit %
de 25 à 630	4,0
631 à 1 250	5,0
1 251 à 2 500	6,0
2 501 à 6 300	7,0
6 301 à 25 000	8,0
25 001 à 40 000	10,0
40 001 à 63 000	11,0
63 001 à 100 000	12,5
supérieur à 100 000	>12,5

NOTE 1 Pour les puissances nominales supérieures à 100 000 kVA, les valeurs font généralement l'objet d'un accord entre le constructeur et l'acheteur.

NOTE 2 Dans le cas d'éléments monophasés destinés à constituer un groupe triphasé, les valeurs de puissance nominale s'entendent comme étant celles du banc de transformateur en triphasé.

3.2.2.4 Il appartient à l'acheteur de spécifier dans son appel d'offres la puissance apparente de court-circuit du réseau à l'endroit où est installé le transformateur afin d'obtenir la valeur du courant de court-circuit symétrique à utiliser dans le calcul et dans les essais.

Si le niveau de la puissance apparente de court-circuit du réseau n'est pas spécifié, on doit utiliser les valeurs données au Tableau 2.

Tableau 2 – Puissance apparente de court-circuit du réseau

Tension la plus élevée pour le matériel (U_m) kV	Puissance apparente de court-circuit MVA	
	Pratique européenne courante	Pratique nord-américaine courante
7,2; 12; 17,5 et 24	500	500
36	1 000	1 500
52 et 72,5	3 000	5 000
100 et 123	6 000	15 000
145 et 170	10 000	15 000
245	20 000	25 000
300	30 000	30 000
362	35 000	35 000
420	40 000	40 000
525	60 000	60 000
765	83 500	83 500

NOTE Si ce n'est pas spécifié, il convient de considérer une valeur comprise entre 1 et 3 pour le rapport des impédances homopolaire et directe du réseau.

Table 1 – Recognized minimum values of short-circuit impedance for transformers with two separate windings

Short-circuit impedance at rated current	
Rated power kVA	Minimum short-circuit impedance %
25 to 630	4,0
631 to 1 250	5,0
1 251 to 2 500	6,0
2 501 to 6 300	7,0
6 301 to 25 000	8,0
25 001 to 40 000	10,0
40 001 to 63 000	11,0
63 001 to 100 000	12,5
above 100 000	>12,5

NOTE 1 Values for rated power greater than 100 000 kVA are generally subject to agreement between manufacturer and purchaser.

NOTE 2 In the case of single-phase units connected to form a three-phase bank, the value of rated power applies to three-phase bank rating.

3.2.2.4 The short-circuit apparent power of the system at the transformer location should be specified by the purchaser in his enquiry in order to obtain the value of the symmetrical short-circuit current to be used for the design and tests.

If the short-circuit apparent power of the system is not specified, the values given in Table 2 shall be used.

Table 2 – Short-circuit apparent power of the system

Highest voltage for equipment, U_m kV	Short-circuit apparent power MVA	
	Current European practice	Current North American practice
7,2; 12; 17,5 and 24	500	500
36	1 000	1 500
52 and 72,5	3 000	5 000
100 and 123	6 000	15 000
145 and 170	10 000	15 000
245	20 000	25 000
300	30 000	30 000
362	35 000	35 000
420	40 000	40 000
525	60 000	60 000
765	83 500	83 500

NOTE If not specified, a value between 1 and 3 should be considered for the ratio of zero-sequence to positive-sequence impedance of the system.

3.2.2.5 Pour les transformateurs à deux enroulements séparés, seul le court-circuit triphasé est normalement pris en compte car il est considéré comme couvrant de manière adéquate tous les autres types de défauts possibles (exception faite du cas spécial traité dans la note de 3.2.5).

NOTE Dans le cas d'enroulement connectés en zig-zag, le courant de défaut entre phase et terre peut atteindre des valeurs supérieures à celles d'un courant de court-circuit triphasé. Cependant, ces fortes valeurs sont limitées dans les deux phases concernées, à un demi enroulement et, de plus, les courants dans les autres enroulements connectés en étoile sont inférieurs à ceux du courant de court-circuit triphasé. Les risques électrodynamiques de l'ensemble des enroulements peuvent être supérieurs soit en court-circuit triphasé, soit en court-circuit monophasé ceci dépendant de la technologie des enroulements. Il est recommandé que le constructeur et l'acheteur se mettent d'accord sur le type de court-circuit à prendre en considération.

3.2.3 Transformateurs à plus de deux enroulements et autotransformateurs

Les surintensités dans les enroulements, y compris les enroulements de stabilisation et les enroulements auxiliaires, doivent être déterminées à partir des impédances du transformateur et de celles du ou des réseaux. Il doit être tenu compte des différents types de défauts pouvant intervenir en service sur le réseau, par exemple les défauts entre phase et terre et les défauts entre phases, associés aux conditions de mise à la terre du réseau et du transformateur en question; voir la CEI 60076-8. Les caractéristiques de chaque réseau (au moins le niveau de la puissance apparente de court-circuit et la gamme dans laquelle est compris le rapport entre l'impédance homopolaire et l'impédance directe) doivent être spécifiées par l'acheteur dans son appel d'offre.

Les enroulements de stabilisation montés en triangle des transformateurs triphasés doivent pouvoir résister aux surintensités résultant des différentes possibilités de défauts du réseau qui peuvent survenir en fonctionnement avec les conditions de mise à la terre du réseau concerné.

Dans le cas de transformateurs monophasés raccordés de manière à constituer un groupe triphasé, les enroulements de stabilisation doivent pouvoir supporter un court-circuit à leurs bornes, à moins que l'acheteur n'ait spécifié que des précautions spéciales seront prises pour éviter tout risque de court-circuit entre phases.

NOTE Il peut ne pas être économique de dimensionner les enroulements auxiliaires pour résister aux court-circuits sur leurs bornes. Dans de tels cas, il faut que le niveau des surintensités soit limité par des moyens appropriés tels des bobines d'inductances séries ou, dans certains cas, des fusibles. Des précautions doivent être prises pour se prémunir contre les défauts dans la zone comprise entre le transformateur et l'appareillage de protection.

3.2.4 Transformateurs survolteurs-dévolteurs

L'impédance des transformateurs survolteurs-dévolteurs peut être très faible et, par conséquent, les surintensités dans les enroulements sont déterminées principalement par les caractéristiques du réseau à l'endroit où est installé le transformateur. Ces caractéristiques doivent être spécifiées par l'acheteur dans son appel d'offre.

Si un transformateur survolteur-dévolteur est directement associé à un transformateur pour les besoins de variation de la tension et ou de déphasage, il doit être capable de résister aux surintensités résultant de l'impédance combinée des deux appareils.

3.2.5 Transformateurs directement associés à d'autres appareils

Lorsqu'un transformateur est directement associé à d'autres appareils dont l'impédance limiterait le courant de court-circuit, on peut prendre en compte, après accord entre le constructeur et l'acheteur, la somme des impédances du transformateur, du réseau et des appareils directement associés.

3.2.2.5 For transformers with two separate windings, normally only the three-phase short circuit is taken into account, as the consideration of this case is substantially adequate to cover also the other possible types of fault (exception is made in the special case considered in the note to 3.2.5).

NOTE In the case of winding in zigzag connection, the single-line-to-earth fault current may reach values higher than the three-phase short-circuit current. However, these high values are limited, in the two limbs concerned, to a half of the coil and furthermore the currents in the other star-connected winding are lower than for a three-phase short circuit. Electrodynamical hazard to the winding assembly may be higher either at three- or single-phase short circuit depending on the winding design. The manufacturer and the purchaser should agree which kind of short circuit is to be considered.

3.2.3 Transformers with more than two windings and auto-transformers

The overcurrents in the windings, including stabilizing windings and auxiliary windings, shall be determined from the impedances of the transformer and the system(s). Account shall be taken of the different forms of system faults that can arise in service, for example, line-to-earth faults and line-to-line faults associated with the relevant system and transformer earthing conditions (see IEC 60076-8). The characteristics of each system (at least the short-circuit apparent power level and the range of the ratio between zero-sequence impedance and positive-sequence impedance) shall be specified by the purchaser in his enquiry.

Delta-connected stabilizing windings of three-phase transformers shall be capable of withstanding the overcurrents resulting from different forms of system faults that can arise in service associated with relevant system earthing conditions.

In the case of single-phase transformers connected to form a three-phase bank, the stabilizing winding shall be capable of withstanding a short circuit on its terminals, unless the purchaser specifies that special precautions will be taken to avoid the risk of line-to-line short circuits.

NOTE It may not be economical to design auxiliary windings to withstand short circuits on their terminals. In such cases, the overcurrent level should be limited by appropriate means, such as series reactors or, in some instances, fuses. Care should be taken to guard against faults in the zone between the transformer and the protective apparatus.

3.2.4 Booster transformers

The impedance of booster transformers can be very low and, therefore, the overcurrents in the windings are determined mainly by the characteristics of the system at the location of the transformer. These characteristics shall be specified by the purchaser in his enquiry.

If a booster transformer is directly associated to a transformer for the purpose of voltage amplitude and/or phase variation, it shall be capable of withstanding the overcurrents resulting from the combined impedance of the two machines.

3.2.5 Transformers directly associated with other apparatus

Where a transformer is directly associated with other apparatus, the impedance of which would limit the short-circuit current, the sum of the impedance of the transformer, the system and the directly associated apparatus may, by agreement between the manufacturer and the purchaser, be taken into account.

Cela s'applique, par exemple, aux transformateurs élévateurs si la connexion entre le générateur et le transformateur est faite de telle sorte que la possibilité d'un défaut entre phases ou entre deux phases et la terre se produisant à cet endroit soit négligeable.

NOTE Si la connexion entre le générateur et le transformateur est faite de cette façon, les conditions de court-circuit les plus sévères peuvent se produire, dans le cas d'un transformateur élévateur connecté en étoile-triangle avec neutre à la terre, lorsqu'un défaut entre phase et terre se produit sur le réseau raccordé à l'enroulement connecté en étoile ou dans le cas d'une non-synchronisation des phases.

3.2.6 Transformateurs spéciaux et transformateurs installés dans des réseaux caractérisés par un fort taux de défaut

La tenue d'un transformateur aux surintensités fréquentes provenant d'applications particulières (par exemple les transformateurs de four à arc ou les transformateurs fixes alimentant des appareils de traction) ou de conditions d'exploitation particulières (par exemple, un grand nombre de défauts se produit dans les réseaux connectés) doit faire l'objet d'un accord entre le constructeur et l'acheteur. L'acheteur doit informer à l'avance le constructeur des conditions anormales de fonctionnement prévues.

3.2.7 Dispositif de changement de prise

Lorsque le transformateur en est muni, le dispositif de changement de prise doit être capable de supporter les mêmes surintensités dues aux courts-circuits que les enroulements. Cependant, le changeur de prise en charge n'est pas prévu pour commuter le courant de court-circuit.

3.2.8 Borne neutre

La borne neutre des enroulements connectés en étoile ou en zigzag doit être conçue pour la surintensité la plus élevée qui peut traverser cette borne.

4 Démonstration de la tenue au court-circuit

Les exigences de cet article s'appliquent à la fois aux transformateurs immergés dans l'huile et aux transformateurs de type sec, tels qu'ils sont spécifiés respectivement dans la CEI 60076-1 et la CEI 60076-11.

4.1 Tenue thermique au court-circuit

4.1.1 Généralités

Selon la présente norme, la tenue thermique au court-circuit doit être démontrée par le calcul. Ce calcul doit être réalisé conformément aux exigences de 4.1.2 à 4.1.5.

4.1.2 Valeur du courant de court-circuit symétrique I

Pour les transformateurs triphasés avec deux enroulements séparés, la valeur efficace du courant de court-circuit symétrique I doit être calculée comme suit:

$$I = \frac{U}{\sqrt{3} \times (Z_t + Z_s)} \quad [\text{kA}] \quad (1)$$

où

Z_s est l'impédance de court-circuit du réseau.

$$Z_s = \frac{U_s^2}{S}, \text{ en ohms } (\Omega) \text{ par phase (équivalent au montage étoile);} \quad (2)$$

This applies, for example, to unit generator transformers if the connection between generator and transformer is constructed in such a way that the possibility of line-to-line or double-earth faults in this region is negligible.

NOTE If the connection between generator and transformer is constructed in this way, the most severe short-circuit conditions may occur, in the case of a star/delta-connected unit generator transformer with earthed neutral, when a line-to-earth fault occurs on the system connected to the star-connected winding, or in the case of out-of-phase synchronization.

3.2.6 Special transformers and transformers to be installed in systems characterized by high fault rates

The ability of the transformer to withstand frequent overcurrents, arising from the particular application (for example, arc furnace transformers and stationary transformers for traction systems), or the condition of operation (for example, high number of faults occurring in the connected system(s)), shall be subjected to special agreement between the manufacturer and the purchaser. Notice of any abnormal operation conditions expected in the system(s) shall be given by the purchaser to the manufacturer in advance.

3.2.7 Tap-changing equipment

Where fitted, tap-changing equipment shall be capable of carrying the same overcurrents due to short circuits as the windings. However, the on-load tap-changer is not required to be capable of switching the short-circuit current.

3.2.8 Neutral terminal

The neutral terminal of windings with star or zigzag connection shall be designed for the highest overcurrent that can flow through this terminal.

4 Demonstration of ability to withstand short circuit

The requirements of this clause apply to both oil-immersed and dry-type transformers as specified in IEC 60076-1 and IEC 60076-11, respectively.

4.1 Thermal ability to withstand short circuit

4.1.1 General

According to this standard, the thermal ability to withstand short circuit shall be demonstrated by calculation. This calculation shall be carried out in accordance with the requirements of 4.1.2 to 4.1.5.

4.1.2 Value of symmetrical short-circuit current I

For three-phase transformers with two separate windings, the r.m.s. value of the symmetrical short-circuit current I shall be calculated as follows:

$$I = \frac{U}{\sqrt{3} \times (Z_t + Z_s)} \quad (\text{kA}) \quad (1)$$

where

Z_s is the short-circuit impedance of the system.

$$Z_s = \frac{U_s^2}{S}, \text{ in ohms } (\Omega) \text{ per phase (equivalent star connection)} \quad (2)$$

où

U_s est la tension assignée du réseau, en kilovolts (kV);

S est la puissance apparente de court-circuit du réseau, en mégavoltampères (MVA).

U et Z_t sont définies comme suit:

a) pour la prise principale:

U est la tension assignée U_r de l'enroulement considéré, en kilovolts (kV);

Z_t est l'impédance de court-circuit du transformateur assimilée à l'enroulement à l'étude; elle est calculée comme suit:

$$Z_t = \frac{z_t \times U_r^2}{100 \times S_r}, \text{ en ohms } (\Omega) \text{ par phase (équivalent au montage étoile)}^3 \quad (3)$$

où

z_t est l'impédance de court-circuit mesurée à courant et fréquence assignés pour la prise principale et pour la température de référence, exprimée en pourcentage;

S_r est la puissance assignée du transformateur, en mégavoltampères (MVA);

b) pour les prises autres que la prise principale:

U est, sauf spécification contraire, la tension de prise⁴ de l'enroulement à l'étude, en kilovolts (kV);

Z_t est l'impédance de court-circuit du transformateur assimilée à l'enroulement et à la prise considérée, en ohms (Ω) par phase.

Pour les transformateurs ayant plus de deux enroulements, les autotransformateurs, les transformateurs survolteurs-dévolteurs et les transformateurs directement associés à d'autres appareils, les surintensités sont calculées suivant 3.2.3, 3.2.4 ou 3.2.5, selon le cas.

Pour tous les transformateurs, excepté les cas donnés en 3.2.2.2, l'effet de l'impédance de court-circuit du ou des réseaux doit être pris en compte.

NOTE Dans le cas des enroulements connectés en zigzag, le courant de court-circuit pour un défaut entre phase et terre peut atteindre des valeurs considérablement plus élevées que pour un défaut triphasé. Il est recommandé de prendre en compte l'accroissement de ce courant dans le calcul de l'élévation de température de l'enroulement zigzag.

4.1.3 Durée du courant de court-circuit symétrique

Sauf spécification contraire, la durée du courant I à utiliser dans le calcul concernant la tenue thermique au court-circuit doit être de 2 s.

NOTE Pour les autotransformateurs et pour les transformateurs avec un courant de court-circuit dépassant 25 fois le courant nominal, on peut adopter, après accord entre le constructeur et l'acheteur, une durée du courant de court-circuit inférieure à 2 s.

4.1.4 Valeur maximale moyenne autorisée de la température de chaque enroulement

La température moyenne θ_1 de chaque enroulement, après le passage du courant de court-circuit symétrique I de valeur et de durée spécifiées respectivement en 4.1.2 et 4.1.3, ne doit pas dépasser la valeur maximale indiquée au Tableau 3, quelle que soit la prise de réglage .

³ Pour plus de compréhension du contenu de 4.2.3, les symboles Z_t et z_t sont ici utilisés respectivement pour Z et z et pour les mêmes données que dans la CEI 60076-1.

⁴ Pour la définition de «tension de prise», voir 5.2 de la CEI 60076-1.

where

U_s is the rated voltage of the system, in kilovolts (kV);

S is the short-circuit apparent power of the system, in megavoltamperes (MVA).

U and Z_t are defined as follows:

a) for the principal tapping:

U is the rated voltage U_r of the winding under consideration, in kilovolts (kV);

Z_t is the short-circuit impedance of the transformer referred to the winding under consideration; it is calculated as follows:

$$Z_t = \frac{z_t \times U_r^2}{100 \times S_r}, \text{ in ohms } (\Omega) \text{ per phase (equivalent star connection)}^3 \quad (3)$$

where

z_t is the measured short-circuit impedance at rated current and frequency at the principal tap and at reference temperature, as a percentage;

S_r is the rated power of the transformer, in megavoltamperes (MVA);

b) for tapplings other than the principal tapping:

U is, unless otherwise specified, the tapping voltage⁴ of the winding under consideration, in kilovolts (kV);

Z_t is the short-circuit impedance of the transformer referred to the winding and the tapping under consideration, in ohms (Ω) per phase.

For transformers having more than two windings, auto-transformers, booster transformers and transformers directly associated with other apparatus, the overcurrents are calculated in accordance with 3.2.3, 3.2.4 or 3.2.5, as appropriate.

For all transformers, excluding the case given in 3.2.2.2, the effect of the short-circuit impedance of the system(s) shall be taken into consideration.

NOTE At the zigzag connected windings, the short-circuit current for a single-line-to-earth fault may reach considerably higher values than at the three-phase fault. This increase in current should be taken into consideration when calculating the temperature rise of the zigzag winding.

4.1.3 Duration of the symmetrical short-circuit current

The duration of the current I to be used for the calculation of the thermal ability to withstand short circuit shall be 2 s unless a different duration is specified.

NOTE For auto-transformers and for transformers with short-circuit current exceeding 25 times the rated current, a short-circuit current duration below 2 s may be adopted by agreement between the manufacturer and the purchaser.

4.1.4 Maximum permissible value of the average temperature of each winding

The average temperature θ_1 of each winding after loading with a symmetrical short-circuit current I of a value and duration as specified in 4.1.2 and 4.1.3, respectively, shall not exceed the maximum value stated in Table 3 at any tapping position.

³ Here symbols Z_t and z_t are used instead of Z and z , respectively, adopted for the same quantities in IEC 60076-1, for the sake of clarity in connection with the content of 4.2.3.

⁴ For the definition of tapping voltage, see 5.2 of IEC 60076-1.

La température initiale d'enroulement θ_0 à utiliser dans les équations (4) et (5) doit correspondre à la somme de la température ambiante maximale admissible et de l'échauffement correspondant de l'enroulement au régime assigné mesuré par variation de résistance. Si l'échauffement mesuré de l'enroulement n'est pas disponible, alors la température initiale θ_0 doit correspondre à la somme de la température ambiante maximale autorisée, et de l'échauffement autorisé pour le système d'isolation de l'enroulement.

Tableau 3 – Valeurs maximales admissibles de la température moyenne de chaque enroulement après court-circuit

Type de transformateur	Température du système d'isolation °C (classe thermique entre parenthèses)	Valeur maximale de température °C	
		Cuivre	Aluminium
Immergé dans l'huile	105 (A)	250	200
Sec	105 (A)	180	180
	120 (E)	250	200
	130 (B)	350	200
	155 (F)	350	200
	180 (H)	350	200
	200	350	200
	220	350	200

NOTE 1 Dans le cas d'enroulements faits avec des alliages d'aluminium haute résistance à la traction, des valeurs maximales de température plus élevées peuvent être autorisées après accord entre fabricant et acheteur, mais sans jamais excéder celles du cuivre.

NOTE 2 Si des systèmes d'isolation utilisés dans les transformateurs immergés dans l'huile sont autres que de classe A, des valeurs maximales différentes de température peuvent être permises après accord entre constructeur et acheteur.

4.1.5 Calcul de la température θ_1

La température moyenne θ_1 atteinte par l'enroulement après court-circuit doit être calculée d'après la formule:

$$\theta_1 = \theta_0 + \frac{2 \times (\theta_0 + 235)}{\frac{106\,000}{J^2 \times t} - 1} \text{ pour le cuivre (4)} \quad \theta_1 = \theta_0 + \frac{2 \times (\theta_0 + 225)}{\frac{45\,700}{J^2 \times t} - 1} \text{ pour l'aluminium (5)}$$

où

θ_0 est la température d'enroulement initiale, en degrés Celsius (°C);

J est la densité de courant de court-circuit, en ampères par millimètre carré (A/mm²), basée sur la valeur efficace du courant de court-circuit symétrique;

t est la durée, en secondes (s).

NOTE Les équations (4) et (5) sont basées sur des conditions adiabatiques et sont valables seulement pour une courte durée, n'excédant pas 10 s. Les coefficients sont basés sur les propriétés suivantes des matériaux:

	Cuivre	Aluminium
Chaleur spécifique à 100 °C (J/kg·°C)	398,4	928
Densité à 100 °C (kg/m ³)	8 894	2 685
Résistivité à 100 °C (μΩ·m)	0,0224	0,0355

The initial winding temperature θ_0 to be used in equations (4) and (5) shall correspond to the sum of the maximum permissible ambient temperature and the temperature rise of the winding at rated conditions measured by resistance. If the measured winding temperature rise is not available, then the initial winding temperature θ_0 shall correspond to the sum of the maximum permissible ambient temperature and the temperature rise allowed for the winding insulation system.

Table 3 – Maximum permissible values of the average temperature of each winding after short circuit

Transformer type	Insulation system temperature, °C (thermal class in brackets)	Maximum value of temperature, °C	
		Copper	Aluminium
Oil-immersed	105 (A)	250	200
Dry	105 (A)	180	180
	120 (E)	250	200
	130 (B)	350	200
	155 (F)	350	200
	180 (H)	350	200
	200	350	200
	220	350	200

NOTE 1 In the case of windings made of high tensile strength aluminium alloys, higher maximum values of temperature, but not exceeding those relevant to copper, may be allowed by agreement between the manufacturer and the purchaser.

NOTE 2 When insulation systems other than thermal class A are employed in oil-immersed transformers, different maximum values of temperature may be allowed by agreement between the manufacturer and the purchaser.

4.1.5 Calculation of temperature θ_1

The average temperature θ_1 attained by the winding after short circuit shall be calculated by the formula:

$$\theta_1 = \theta_0 + \frac{2 \times (\theta_0 + 235)}{\frac{106\,000}{J^2 \times t} - 1} \quad \text{for copper} \quad (4) \qquad \theta_1 = \theta_0 + \frac{2 \times (\theta_0 + 225)}{\frac{45\,700}{J^2 \times t} - 1} \quad \text{for aluminium} \quad (5)$$

where

θ_0 is the initial winding temperature, in degrees Celsius (°C);

J is the short-circuit current density, based on the r.m.s. value of the symmetrical short-circuit current, in amperes per square millimetre (A/mm²);

t is the duration, in seconds (s).

NOTE Equations (4) and (5) are based on adiabatic conditions and are valid for only a short-time duration, not exceeding 10 s. The coefficients are based on the following material properties:

	Copper	Aluminium
Specific heat at 100 °C (J/kg·°C)	398,4	928
Density at 100 °C (kg/m ³)	8 894	2 685
Resistivity at 100 °C (μΩ·m)	0,022 4	0,035 5

4.2 Tenue aux effets dynamiques de court-circuit

4.2.1 Généralités

Si cela est prescrit par l'acheteur, la tenue aux effets dynamiques de court-circuit doit être démontrée:

- par essais, ou
- par calcul et considérations de conception et de fabrication .

Le choix de la méthode de démonstration à utiliser doit faire l'objet d'un accord entre acheteur et constructeur avant de passer commande.

Quand l'essai de court-circuit a été choisi, il doit être considéré comme un essai spécial (voir 3.11.3 de la CEI 60076-1) et doit être spécifié avant de passer commande. L'essai doit être réalisé conformément aux exigences de 4.2.2 à 4.2.7.

Parfois, des transformateurs de forte puissance ne peuvent pas être testés suivant la présente norme, par exemple pour des limitations d'essai. Dans ces cas, les conditions d'essai doivent faire l'objet d'un accord entre acheteur et constructeur.

Lorsqu'une démonstration basée sur le calcul et des considérations de conception et de fabrication est choisie, les lignes directrices données dans l'Annexe A doivent être suivies.

4.2.2 Conditions du transformateur avant les essais de court-circuit

4.2.2.1 Sauf convention contraire, les essais doivent être réalisés sur un transformateur neuf prêt à être mis en service. Des accessoires de protection tels qu'un relais actionné gaz et huile et une soupape de pression doivent être montés sur le transformateur durant l'essai.

NOTE Le montage d'accessoires n'ayant aucune influence sur le comportement durant l'essai de court-circuit n'est pas exigé (par exemple équipement de refroidissement démontables).

4.2.2.2 Préalablement aux essais de court-circuit, le transformateur doit être soumis aux essais de routine spécifiés dans la CEI 60076-1. Cependant, l'essai au choc de foudre n'est pas exigé à ce stade.

Si les enroulements sont munis de prises, la réactance et si nécessaire la résistance doivent être mesurées sur les positions de réglage pour lesquelles les essais de court-circuit seront effectués.

Toutes les mesures de réactances doivent être reproductibles avec un écart inférieur à $\pm 0,2\%$.

Un compte rendu contenant les résultats des essais de routine doit être disponible dès le début des essais de court-circuit.

4.2.2.3 Au début des essais de court-circuit, la température moyenne des enroulements doit être de préférence entre 10 °C et 40 °C (voir 10.1 de la CEI 60076-1).

Pendant les essais, la température d'enroulement peut augmenter du fait de la circulation du courant de court-circuit. Cet aspect doit être pris en considération lors de la mise au point du circuit d'essai pour les transformateurs de catégorie I.

4.2 Ability to withstand the dynamic effects of short circuit

4.2.1 General

If required by the purchaser, the ability to withstand the dynamic effects of short circuit shall be demonstrated either

- by tests, or
- by calculation and design and manufacture considerations.

The choice of method of demonstration to be used shall be subject to agreement between the purchaser and the manufacturer prior to placing the order.

When a short-circuit test is selected, it shall be regarded as a special test (see 3.11.3 of IEC 60076-1) and it shall be specified prior to placing the order. The test shall be carried out in accordance with the requirements in 4.2.2 to 4.2.7.

Large power transformers sometimes cannot be tested according to this standard due, for example, to testing limitations. In these cases, the testing conditions shall be agreed between the purchaser and the manufacturer.

When demonstration based on calculation and design and manufacture considerations is selected, the guidelines given in Annex A shall be followed.

4.2.2 Condition of the transformer before the short-circuit tests

4.2.2.1 Unless otherwise agreed, the tests shall be carried out on a new transformer ready for service. Protection accessories, such as a gas-and-oil-actuated relay and pressure-relief device, shall be mounted on the transformer during the test.

NOTE The mounting of accessories having no influence on behaviour during short circuit (for example, detachable cooling equipment) is not required.

4.2.2.2 Prior to the short-circuit tests, the transformer shall be subjected to the routine tests which are specified in IEC 60076-1. However, the lightning impulse test is not required at this stage.

If the windings are provided with tappings, the reactance and, if required, also the resistance shall be measured for the tapping positions at which short-circuit tests will be carried out.

All the reactance measurements shall be to a repeatability of better than $\pm 0,2$ %.

A report containing the result of the routine tests shall be available at the beginning of short-circuit tests.

4.2.2.3 At the beginning of short-circuit tests, the average temperature of the winding shall preferably be between 10 °C and 40 °C (see 10.1 of IEC 60076-1).

During the tests, winding temperature may increase owing to the circulation of the short-circuit current. This aspect shall be taken into consideration when arranging the test circuit for transformers of category I.

4.2.3 Valeur de crête du courant d'essai \hat{i} pour les transformateurs à deux enroulements

L'essai doit être réalisé avec l'asymétrie du courant maintenue maximale en ce qui concerne la phase en essai.

L'amplitude \hat{i} de la première crête du courant d'essai asymétrique est calculée comme suit:

$$\hat{i} = I \times k \times \sqrt{2} \tag{6}$$

où le courant de court-circuit symétrique I est déterminé conformément à 4.1.2.

Le facteur k prend en compte le décalage initial du courant d'essai et $\sqrt{2}$ prend en compte la valeur de crête par rapport à la valeur efficace d'une onde sinusoïdale.

Le facteur $k \times \sqrt{2}$, ou facteur de crête, dépend du rapport X/R ,

où

X est la somme des réactances du transformateur et du réseau ($X_t + X_s$), en ohms (Ω);

R est la somme des résistances du transformateur et du réseau ($R_t + R_s$), en ohms (Ω), où R_t est à la température de référence (voir 10.1 de la CEI 60076-1).

Si l'impédance de court-circuit du réseau est incluse dans le calcul du courant de court-circuit, le rapport X/R du réseau, s'il n'est pas spécifié, doit être supposé comme égal à celui du transformateur. Le Tableau 4 spécifie la valeur du facteur de crête en fonction du rapport X/R à utiliser à des fins pratiques⁵.

Tableau 4 – Valeurs du facteur $k \times \sqrt{2}$

X/R	1	1,5	2	3	4	5	6	8	10	14
$k \times \sqrt{2}$	1,51	1,64	1,76	1,95	2,09	2,19	2,27	2,38	2,46	2,55

NOTE Pour les autres valeurs du rapport X/R comprises entre 1 et 14, le facteur $k \times \sqrt{2}$ peut être déterminé par interpolation linéaire.

NOTE Lorsque $Z_s < 0,05 Z_t$, on peut utiliser pour la prise principale x_t et r_t au lieu de X_t et R_t (en ohms), où

x_t est la composante réactive de z_t , en pourcentage (%);

r_t est la composante résistive, à température de référence, de z_t , en pourcentage (%);

z_t est l'impédance de court-circuit du transformateur, à la température de référence, en pourcentage (%).

Sauf spécification contraire, dans le cas $X/R > 14$, le facteur $k \times \sqrt{2}$ est supposé être égal à:

$1,8 \times \sqrt{2} = 2,55$ pour les transformateurs de catégorie II,

$1,9 \times \sqrt{2} = 2,69$ pour les transformateurs de catégorie III.

⁵ Le Tableau 4 est basé sur l'expression suivante pour le facteur de crête:

$$k \times \sqrt{2} = (1 + (e^{-(\phi + \pi/2)R/X} \sin \phi)) \times \sqrt{2}$$

où

e est la base du logarithme naturel;

ϕ est l'angle de phase qui est égal à $\arctan X/R$, en radians.

4.2.3 Test current peak value \hat{i} for two-winding transformers

The test shall be performed with current holding maximum asymmetry as regards the phase under test.

The amplitude \hat{i} of the first peak of the asymmetrical test current is calculated as follows:

$$\hat{i} = I \times k \times \sqrt{2} \quad (6)$$

where the symmetrical short-circuit current I is determined in accordance with 4.1.2.

The factor k accounts for the initial offset of the test current and $\sqrt{2}$ accounts for the peak-to-r.m.s. value of a sinusoidal wave.

The factor $k \times \sqrt{2}$, or peak factor, depends on the ratio X/R

where

X is the sum of the reactances of the transformer and the system ($X_t + X_s$), in ohms (Ω);

R is the sum of resistances of the transformer and the system ($R_t + R_s$), in ohms (Ω), where R_t is at reference temperature (see 10.1 of IEC 60076-1).

When the short-circuit impedance of the system is included in the short-circuit current calculation, the X/R ratio of the system, if not specified, shall be assumed to be equal to that of the transformer. Table 4 specifies the value for the peak factor as a function of the X/R ratio to be used for practical purposes ⁵.

Table 4 – Values for factor $k \times \sqrt{2}$

X/R	1	1,5	2	3	4	5	6	8	10	14
$k \times \sqrt{2}$	1,51	1,64	1,76	1,95	2,09	2,19	2,27	2,38	2,46	2,55
NOTE For other values of X/R between 1 and 14, the factor $k \times \sqrt{2}$ may be determined by linear interpolation.										

NOTE When $Z_s < 0,05 Z_t$, instead of X_t and R_t (in ohms), x_t and r_t may be used for the principal tapping where

x_t is the reactive component of z_t , in per cent (%);

r_t is the resistance component, at reference temperature, of z_t , in per cent (%);

z_t is the short-circuit impedance of the transformer, at reference temperature, in per cent (%).

If not otherwise specified, in the case $X/R > 14$ the factor $k \times \sqrt{2}$ is assumed to be equal to

$1,8 \times \sqrt{2} = 2,55$ for transformers of category II;

$1,9 \times \sqrt{2} = 2,69$ for transformers of category III.

⁵ Table 4 is based on the following expression for the peak factor:

$$k \times \sqrt{2} = (1 + (e^{-(\phi + \pi/2)R/X} \sin \phi)) \times \sqrt{2}$$

where

e is the base of natural logarithm;

ϕ is the phase angle which is equal to $\arctan X/R$, in radians.

4.2.4 Tolérance sur la valeur de crête asymétrique et la valeur efficace symétrique du courant d'essai de court-circuit

Si la durée de l'essai de court-circuit est suffisamment longue, le courant asymétrique dont la première amplitude de crête i se transformera en courant symétrique de valeur efficace I (voir 4.1.2).

La valeur de crête du courant obtenu dans les essais ne doit pas s'écarter de plus de 5 % et le courant symétrique ne doit pas s'écarter de plus de 10 % de la valeur spécifiée respective.

4.2.5 Procédure d'essai de court-circuit pour les transformateurs à deux enroulements

4.2.5.1 Pour obtenir le courant d'essai conformément à 4.2.4, la tension à vide de la source peut être plus élevée que la tension nominale de l'enroulement alimenté. La mise en court-circuit de l'enroulement peut soit suivre (court-circuit post-établi), soit précéder (court-circuit préétabli) la mise sous tension de l'autre enroulement du transformateur⁶.

Dans le cas d'un court-circuit post-établi, la tension ne doit pas dépasser 1,15 fois la tension nominale de l'enroulement, sauf accord contraire entre le constructeur et l'acheteur.

Si le court-circuit préétabli est utilisé pour un transformateur à enroulements concentriques simples, il convient que l'alimentation se fasse de préférence par l'enroulement le plus éloigné du noyau, L'enroulement le plus proche du noyau doit être court-circuité de façon à éviter la saturation du noyau magnétique, qui pourrait entraîner un appel de courant magnétisant excessif superposé au courant de court-circuit pendant les premières périodes.

Si des facilités d'essai nécessitent que l'alimentation soit connectée à l'enroulement intérieur, des précautions spéciales doivent être prises, par exemple la prémagnétisation du noyau pour éviter l'enclenchement du courant magnétisant .

Pour les transformateurs à enroulements alternés ou les transformateurs à enroulements concentriques doubles, la méthode du court-circuit préétabli ne doit être utilisée qu'après accord entre le constructeur et l'acheteur.

Pour éviter un suréchauffement préjudiciable, un intervalle de temps approprié doit intervenir entre les applications successives de surintensités. Cette durée doit être définie par accord entre l'acheteur et le constructeur.

NOTE Lors des essais de transformateurs de catégorie I, il peut être nécessaire de considérer le changement du facteur X/R causé par l'augmentation de température durant l'essai et d'y fournir une compensation dans le circuit d'essai.

4.2.5.2 Pour obtenir la valeur de crête initiale du courant (voir 4.2.3) dans l'enroulement de phase en essai, l'instant d'enclenchement doit être réglé au moyen d'un interrupteur synchrone.

Pour vérifier les valeurs des courants d'essai i et I , des enregistrements avec oscilloscope doivent toujours être faits.

Pour obtenir l'asymétrie maximale du courant dans un des enroulements de phase, il faut que l'enclenchement se produise au moment du passage à zéro de la tension appliquée à cet enroulement.

⁶ Une autre procédure d'essai consiste à appliquer simultanément deux tensions en opposition de phase aux deux enroulements en essai. Les deux enroulements peuvent être alimentés soit par la même source de puissance ou par deux sources de puissance séparées et synchronisées. Cette méthode est avantageuse dans la prévention de toute saturation du noyau et réduira l'exigence de puissance requise de l'alimentation.

4.2.4 Tolerance on the asymmetrical peak and symmetrical r.m.s. value of the short-circuit test current

If the duration of the short-circuit test is sufficiently long, the asymmetrical current having first peak amplitude i will change into the symmetrical current having r.m.s. value I (see 4.1.2).

The peak value of the current obtained in testing shall not deviate by more than 5 % and the symmetrical current by more than 10 % from the respective specified value.

4.2.5 Short-circuit testing procedure for transformers with two windings

4.2.5.1 In order to obtain a test current according to 4.2.4, the no-load voltage of the source may be higher than the rated voltage of the winding supplied. The short-circuiting of the winding may either follow (post-set short circuit) or precede (pre-set short circuit) the application of the voltage to the other winding of the transformer⁶.

If the post-set short circuit is used, the voltage shall not exceed 1,15 times the rated voltage of the winding, unless otherwise agreed between the manufacturer and the purchaser.

If the pre-set short circuit is used for a transformer with single-concentric windings, the supply should preferably be connected to the winding furthest from the core. The winding closer to the core is to be short-circuited in order to avoid saturation of the magnetic core which could lead to an excessive magnetizing current superimposed on the short-circuit current during the first few cycles.

When available testing facilities require the supply to be connected to the inner winding, special precautions shall be taken, for example, pre-magnetization of the core, to prevent the inrush of magnetizing current.

For transformers with sandwich windings or transformers with double-concentric windings, the pre-set short-circuit method shall be used only after agreement between the manufacturer and the purchaser.

In order to avoid injurious overheating, an appropriate time interval shall occur between successive overcurrent applications. This time shall be defined by agreement between the manufacturer and the purchaser.

NOTE When testing transformers of category I, it might be necessary to consider the change of X/R factor caused by the temperature increase during the test and provide for its compensation in the test circuit.

4.2.5.2 To obtain the initial peak value of the current (see 4.2.3) in the phase winding under test, the moment of switching on shall be adjusted by means of a synchronous switch.

In order to check the values i and I of the test currents, oscillographic records shall always be taken.

In order to obtain the maximum asymmetry of the current in one of the phase windings, the switching-on shall occur at the moment the voltage applied to this winding passes through zero.

⁶ Another testing procedure consists of applying simultaneously two opposite-phase voltages to the two windings under test. The two windings can be supplied either from the same power source or from two separate and synchronized power sources. The method is advantageous in preventing any saturation of the core and will reduce the power requirement of the supply.

NOTE 1 Pour les enroulements connectés en étoile, l'asymétrie maximale est obtenue en enclenchant lorsque la tension de phase passe par zéro. Le facteur k de la valeur de crête i peut être déterminé à partir des oscillogrammes des courants de phase. Pour les essais triphasés sur des enroulements connectés en triangle, cette condition est réalisée en enclenchant lorsque la tension entre phases passe par zéro. Une des méthodes de détermination du facteur k consiste à enclencher pendant les essais de réglage préliminaires lorsque la tension entre phases passe par un maximum. Dans ce cas, on détermine le facteur k à partir des oscillogrammes des courants de phase.

Une autre méthode pour déterminer les courants de phase d'un enroulement connecté en triangle consiste à interconnecter de façon convenable, les enroulements secondaires des transformateurs de courant, mesurant les courants de phase. L'oscillographe peut être réglé pour enregistrer les courants de phase.

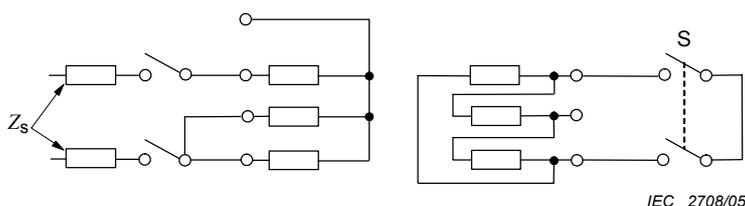
NOTE 2 Pour les transformateurs à connexion en étoile-zigzag appartenant à la catégorie I et avec une variation de tension à flux constant, ayant une valeur $x_t/r_t \leq 3$ (voir 4.2.3), les trois phases sont enclenchées simultanément sans utiliser d'interrupteur synchrone. Pour les autres transformateurs à connexion en étoile-zigzag, les modalités d'enclenchement font l'objet d'un accord entre le constructeur et l'acheteur.

4.2.5.3 La fréquence de l'alimentation d'essai doit être, en principe, la fréquence assignée du transformateur. Toutefois, après accord entre l'acheteur et le constructeur, il est permis de tester des transformateurs 60 Hz avec une alimentation 50 Hz et des transformateurs 50 Hz avec une alimentation 60 Hz, à condition que l'on obtienne les valeurs des courants d'essai prescrites comme spécifié en 4.2.3 et 4.2.4.

Cette procédure nécessite que la tension de l'alimentation d'essai soit convenablement ajustée par rapport à la tension assignée du transformateur.

4.2.5.4 Pour les transformateurs triphasés, il convient d'utiliser une source d'alimentation triphasée, tant que les exigences de 4.2.4 peuvent être respectées. Si ce n'est pas le cas, on peut utiliser une source monophasée, comme indiqué ci-dessous. Pour les enroulements connectés en triangle, la source monophasée est branchée entre deux points du triangle et la tension durant l'essai doit être la même que la tension entre phases lors d'un essai triphasé. Pour les enroulements connectés en étoile, la source monophasée est branchée entre une borne de ligne et les deux autres bornes réunies. La tension monophasée durant l'essai doit être égale à $\sqrt{3}/2$ fois la tension entre phases lors d'un essai triphasé.

Des exemples de deux schémas d'essai monophasés possibles simulant un essai triphasé sont donnés aux Figures 1 et 2.



Composants

Z_s impédance du réseau d'essai

S interrupteur synchrone pour un court-circuit post-établi ou barre de connexion rigide pour un court-circuit pré-établi.

Figure 1 – Transformateur connecté en étoile/triangle

NOTE 1 For star-connected windings, the maximum asymmetry is obtained by switching on when the phase voltage passes through zero. The factor k of the peak value i can be determined from oscillograms of the line currents. For three-phase tests on delta-connected windings, this condition is obtained by switching on when the line-to-line voltage passes through zero. One of the methods of determining the factor k is by switching on during the preliminary adjustment tests at a maximum of the line-to-line voltage. In this case, the factor k is found from oscillograms of the line currents.

Another method for determining the phase current in a delta-connected winding is by suitably interconnecting the secondary windings of the current transformers measuring the line currents. The oscillograph can be set to record the phase currents.

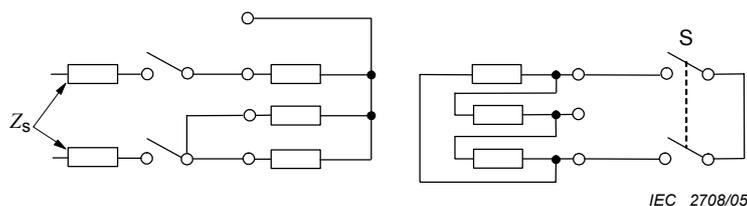
NOTE 2 For transformers with star-zigzag connection belonging to category I and with constant flux voltage variation having value for $x_t/r_t \leq 3$ (see 4.2.3), the three phases are switched on simultaneously without the use of a synchronous switch. For other transformers with star-zigzag connection, the method of switching on is subject to agreement between the manufacturer and the purchaser.

4.2.5.3 The frequency of the test supply shall be, in principle, the rated frequency of the transformer. Nevertheless, if agreed between the purchaser and the manufacturer, it is permissible to test 60 Hz transformers with a 50 Hz power supply and 50 Hz transformers with a 60 Hz power supply provided that the prescribed test current values, as required in 4.2.3 and 4.2.4, are obtained.

This procedure requires that the voltage of the test supply is suitably adjusted with respect to the rated voltage of the transformer.

4.2.5.4 For three-phase transformers, a three-phase supply should be used, as long as the requirements in 4.2.4 can be met. If this is not the case, a single-phase supply, as described below, may be used. For delta-connected windings, the single-phase supply is provided between two corners of the delta and the voltage during the test shall be the same as the voltage between phases during a three-phase test. For star-connected windings, the single-phase voltage is supplied between one line terminal and the other two line terminals connected together. The single-phase voltage during the test shall be equal to $\sqrt{3}/2$ times the voltage between phases during the three-phase test.

Examples of two possible single-phase test arrangements simulating the three-phase test are given in Figures 1 and 2.

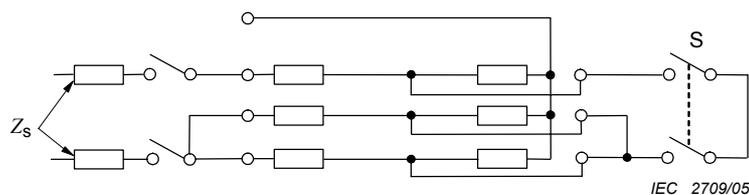


Components

Z_s test system impedance;

S synchronous switch for a post-set short circuit or rigid connection bar for a pre-set short circuit.

Figure 1 – Star/delta connected transformer



Composants

Z_s impédance du réseau d'essai

S interrupteur synchrone pour un court-circuit post-établi ou barre de connexion rigide pour un court-circuit pré-établi.

Figure 2 – Autotransformateur étoile-étoile

NOTE 1 Les essais avec une alimentation monophasée s'appliquent principalement aux transformateurs des catégories II et III et présentent rarement un intérêt pour les transformateurs de la catégorie I.

NOTE 2 Pour les enroulements connectés en étoile à isolation non uniforme, il est nécessaire de vérifier que l'isolation du neutre est suffisante ou non pour les essais monophasés.

NOTE 3 Si, pour des enroulements connectés en étoile, l'alimentation électrique de puissance est insuffisante pour faire l'essai en monophasé décrit ci-dessus, et si le neutre est disponible, le constructeur et l'acheteur peuvent convenir de l'utilisation d'une alimentation électrique monophasée entre borne de ligne et le neutre, à condition que le neutre soit capable de supporter le courant correspondant. Avec ce schéma d'essai, il peut être utile de connecter entre elles les bornes correspondantes des phases non soumises à l'essai de manière à mieux contrôler leur tension, à condition que cela soit faisable et que le circuit soit correct.

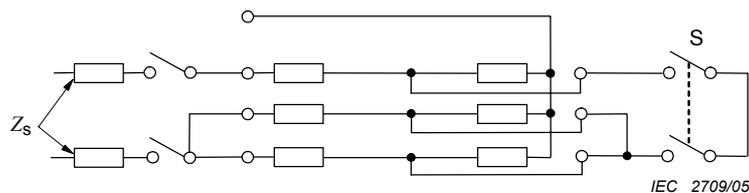
4.2.5.5 En l'absence de spécification particulière, le nombre d'essai sur les transformateurs monophasés et triphasés est déterminé comme suit, sans tenir compte des essais préliminaires de réglage effectués à moins de 70 % du courant spécifié pour s'assurer du bon fonctionnement du montage d'essai en ce qui concerne l'instant de mise en marche, le courant de réglage, l'amortissement et la durée.

Pour les transformateurs monophasés de catégorie I et de catégorie II, le nombre d'essais doit être de trois. Sauf spécification contraire, pour les transformateurs monophasés munis de prises, chacun des trois essais est réalisé dans une position différente du changeur de prises, soit un essai sur la position correspondant au rapport de transformation le plus élevé, un essai sur la prise principale et un essai sur la position correspondant au rapport de transformation le plus bas.

Pour les transformateurs triphasés de catégorie I et de catégorie II, le nombre total d'essais doit être de neuf, à raison de trois sur chaque phase. Sauf spécification contraire, les neuf essais sur chacun des transformateurs triphasés à prises sont réalisés dans des positions différentes du changeur de prises, c'est-à-dire trois essais dans la position correspondant au rapport de transformation le plus élevé sur l'une des phases extérieures, trois essais sur la prise principale sur la phase du milieu et trois essais dans la position correspondant au rapport de transformation le plus bas sur l'autre phase extérieure.

Pour les transformateurs de catégorie III, il est nécessaire, à chaque fois, que le constructeur et l'acheteur conviennent du nombre d'essais, et des positions du changeur de prises. Toutefois, afin de simuler d'aussi près que possible les effets des événements de court-circuit répétitifs susceptibles d'apparaître en service, de permettre un meilleur contrôle du comportement de l'appareil en essai et de permettre une interprétation significative des éventuelles variations de l'impédance de court-circuit mesurée, il est recommandé que le nombre des essais soit comme suit:

- pour les transformateurs monophasés: trois;
- pour les transformateurs triphasés: neuf.



Components

Z_s test system impedance;

S synchronous switch for a post-set short circuit or rigid connection bar for a pre-set short circuit.

Figure 2 – Star/star auto-transformer

NOTE 1 The use of tests with single-phase supply applies mainly to transformers of category II or III and is seldom of interest for category I transformers.

NOTE 2 For star-connected windings with non-uniform insulation, it is necessary to check whether or not the insulation of the neutral is sufficient for single-phase testing.

NOTE 3 If, for star-connected windings, the power supply is insufficient for the single-phase testing described above and the neutral is available, the manufacturer and the purchaser may agree upon the use of single-phase power supply between line terminal and the neutral, provided that the neutral is capable of carrying the relevant current. With this test arrangement, it might be convenient to mutually connect the corresponding terminals of the phases not submitted to test in order to better control their voltage, provided that this is feasible and the circuitry is correct.

4.2.5.5 In the absence of any particular specification, the number of tests on three-phase and single-phase transformers is determined as follows, not including preliminary adjustment tests carried out at less than 70 % of the specified current to check the proper functioning of the test set-up with regard to the moment of switching on, the current setting, the damping and the duration.

For categories I and II single-phase transformers, the number of tests shall be three. Unless otherwise specified, the three tests on a single-phase transformer with tap-changers are made in a different position of the tap-changer, i.e. one test in the position corresponding to the highest voltage ratio, one test on the principal tapping and one test in the position corresponding to the lowest voltage ratio.

For categories I and II three-phase transformers, the total number of tests shall be nine, i.e. three tests on each phase. Unless otherwise specified, the nine tests on a three-phase transformer with tap-changers are made in different positions of the tap-changer, i.e. three tests in the position corresponding to the highest voltage ratio on one of the outer phases, three tests on the principal tapping on the middle phase and three tests in the position corresponding to the lowest voltage ratio on the other outer phase.

For transformers of category III, an agreement between the manufacturer and the purchaser is always needed with regard to the number of tests and the position of the tap-changer. However, in order to simulate as closely as possible the effects of repetitive short-circuit events likely to occur in service, to allow a better monitoring of the behaviour of the unit under test and to permit a meaningful judgement in connection with possible variations of the measured short-circuit impedance, it is recommended that the number of tests is as follows:

- for single-phase transformers: three;
- for three-phase transformers: nine.

En ce qui concerne la position du changeur de prises et la séquence d'essai, la même procédure que celle décrite pour les transformateurs de catégories I et II est recommandée.

La durée de chaque essai doit être la suivante:

- 0,5 s pour les transformateurs de catégorie I,
- 0,25 s pour les transformateurs des catégories II et III,

avec une tolérance de ± 10 %.

4.2.6 Procédure d'essai de court-circuit pour les transformateurs avec plus de deux enroulements et pour les autotransformateurs

Diverses conditions de défaut peuvent se produire dans le cas des transformateurs avec plus de deux enroulements et les autotransformateurs (voir 3.2.3). En général, de telles situations sont plus complexes que celles qui concernent les courts-circuits triphasés qui peuvent être considérés comme la situation de référence pour les transformateurs à deux enroulements (voir 3.2.2.5).

Des schémas d'essai spéciaux sont souvent nécessaires pour reproduire certaines conditions de défaut au moyen d'essais. Il convient que le choix des moyens d'essai soit fait, par principe, sur la base de l'analyse des résultats de calcul des forces électrodynamiques qui peuvent apparaître dans tous les cas de défaut possibles.

Le schéma d'essai, les valeurs de courant, la séquence et le nombre d'essais sont toujours soumis à un accord entre le constructeur et l'acheteur.

Il est recommandé que la tolérance concernant les valeurs de courant définies après accord et la durée des essais soient cohérentes avec celles prescrites pour les transformateurs à deux enroulements et que la séquence d'essai soit choisie en prenant comme critère l'augmentation prévisible des forces électrodynamiques.

4.2.7 Détection des défauts et évaluation des résultats d'essai

4.2.7.1 Avant les essais de court-circuit, on doit effectuer les essais et les mesures conformément à 4.2.2 et inspecter le dispositif de protection par détection de gaz (si le transformateur en est muni). Ces essais et mesures sont destinés à servir de référence pour la détection des défauts.

4.2.7.2 Pendant chaque essai (y compris les essais préliminaires), on doit enregistrer à l'oscillographe:

- les tensions appliquées;
- les courants (voir 4.2.5.2).

De plus, on doit procéder à un examen visuel de l'extérieur du transformateur en essai et à un enregistrement en continu par caméra vidéo.

NOTE 1 Des moyens supplémentaires de détection peuvent être utilisés pour obtenir des informations et améliorer l'évaluation de l'essai, comme enregistrer le courant entre la cuve (isolée) et la terre, enregistrer le bruit et les vibrations, enregistrer les variations de pressions d'huile à différents endroits dans la cuve pendant le passage du courant de court-circuit, etc.

NOTE 2 Des déclenchements aléatoires des relais de détection d'émission de gaz et de mouvement d'huile peuvent se produire durant l'essai du fait des vibrations. Cette circonstance n'est pas significative pour l'aptitude du transformateur à supporter le court-circuit, à moins que du gaz combustible ne soit trouvé dans le relais.

NOTE 3 Des étincelles électriques temporaires peuvent apparaître à travers les joints de réservoir au moment de la mise sous tension et des étincelles internes sur les joints de châssis aux moments de la mise sous tension et du court-circuit.

With regard to tap-changer position and test sequence, the same procedure as described for transformers of categories I and II is recommended.

The duration of each test shall be

- 0,5 s for transformers of category I,
- 0,25 s for transformers of categories II and III,

with a tolerance of $\pm 10\%$.

4.2.6 Short-circuit testing procedure for transformers with more than two windings and auto-transformers

Various fault conditions may be considered for transformers with more than two windings and auto-transformers (see 3.2.3). In general, such conditions are of a more complex nature in comparison with the three-phase short circuit which can be considered the reference case for two-winding transformers (see 3.2.2.5).

Special testing circuits are often necessary in order to reproduce some of the fault events by means of tests. The choice of the test duties to be performed should be made, as a rule, on the basis of the analysis of the results of calculations of electrodynamic forces occurring in all possible fault cases.

The testing arrangements, the current values, the sequence and the number of tests are always subject to agreement between the manufacturer and the purchaser.

It is recommended that the tolerance on the agreed test current values and the duration of the tests be in line with those prescribed for two-winding transformers and that the test sequence be selected according to the expected increase of electrodynamic forces.

4.2.7 Detection of faults and evaluation of test results

4.2.7.1 Before the short-circuit testing, measurements and tests shall be carried out according to 4.2.2 and the gas-and-oil actuated relay (if any) inspected. These measurements and tests serve as references for the detection of faults.

4.2.7.2 During each test (including preliminary tests), oscillographic recordings shall be taken of

- the applied voltages;
- the currents (see 4.2.5.2).

Furthermore, the outside of the transformer under test shall be observed visually and continuously video recorded.

NOTE 1 Additional means of detection may be used to obtain information and improve the evaluation of the test event, such as recording of the current between the tank (insulated) and earth, recordings of noise and vibrations, recordings of oil pressure variations occurring at different locations inside the tank during short-circuit current flow, etc.

NOTE 2 Random gas-and-oil-actuated relay tripping may occur during the tests due to vibration. This circumstance is not significant for the ability of the transformer to withstand short circuit unless combustible gas is found in the relay.

NOTE 3 Temporary sparks across tank joints may occur at the energizing stage and internal sparking at the frame joints at the energizing and short-circuit stages.

4.2.7.3 Après chaque essai, les oscillogrammes pris durant les essais doivent être vérifiés, le relais actionné au gaz et à l'huile doit être inspecté et la réactance de court-circuit mesurée. Pour les transformateurs triphasés, la réactance mesurée doit être évaluée sur la base d'une phase, soit par une mesure directe phase-neutre de la réactance dans le cas d'un enroulement en étoile soit déduite d'une configuration en triangle par une méthode appropriée.

NOTE 1 On peut utiliser des moyens d'évaluation supplémentaires pour juger du résultat de l'essai tels que les mesures de résistance d'enroulement, les techniques d'essai en impulsions à basse tension (pour la comparaison entre les oscillogrammes obtenus à l'état initial et après l'essai), l'analyse du spectre de réponse en fréquence, l'analyse de la fonction de transfert, les mesures à vide et la comparaison des résultats d'analyse des gaz dissous avant et après essai.

NOTE 2 Toute différence entre les résultats de mesures effectuées avant et après l'essai peut être l'indice d'un défaut possible. Il est particulièrement important de suivre tout au long des essais successifs, les variations possibles de la réactance de court-circuit mesurée après chaque essai, variations qui peuvent être progressives ou qui peuvent tendre à disparaître.

NOTE 3 Dans l'idée de détecter des défauts entre spires, il est recommandé de réaliser les mesures d'impédance de court-circuit aussi bien du côté haute tension que du côté basse tension.

4.2.7.4 A l'issue des essais, les parties extérieures du transformateur et le relais actionné au gaz et à l'huile (s'il y en a un) doivent être examinés. Les résultats des mesures de réactance de court-circuit ainsi que les oscillogrammes pris aux différents stades des essais doivent être examinés afin d'indiquer les anomalies possibles durant les essais, plus particulièrement tout signe de modification de la réactance de court-circuit.

NOTE 1 A la fin des essais, si les enroulements sont munis de prises, il convient de mesurer la réactance pour toutes les positions de prises pour lesquelles les essais de court-circuit ont été effectués.

NOTE 2 Généralement, il convient que la variation de la réactance de court-circuit montre une tendance à la diminution au cours des essais. Il peut y avoir également une variation notable de la réactance dans le temps après les essais. C'est pourquoi, s'il y a une importante variation de la réactance dépassant les limites autorisées constatée sur les mesures effectuées immédiatement après les essais, il peut être prudent de refaire les mesures après un laps de temps afin de vérifier si la variation de réactance est confirmée. Cette dernière valeur de réactance est retenue comme valeur finale pour déterminer la conformité avec les exigences de la norme.

Différentes procédures sont à appliquer à ce stade des essais pour les transformateurs des catégories I, II et III. Ces procédures et les limites de réactance sont décrites aux points a) et b) suivants.

a) Transformateurs de catégories I et II

Sauf accord contraire, la partie active doit être extraite de la cuve afin de permettre l'inspection du circuit magnétique et des enroulements, et son état doit être comparé à l'état avant essai afin de mettre en évidence d'éventuels défauts apparents tels que le changement de la position des conducteurs, déplacements, etc. qui, en dépit de la réussite aux essais individuels, peuvent altérer le fonctionnement sans risque du transformateur.

Tous les essais individuels, y compris les essais diélectriques à 100 % de la valeur d'essai prescrite (voir la CEI 60076-3), doivent être répétés. Si un essai de choc de foudre est spécifié, il doit être effectué à ce stade. Toutefois, pour les transformateurs de catégorie I, la répétition des essais individuels, à l'exception des essais diélectriques, peut être omise.

Pour considérer le transformateur comme ayant satisfait à l'essai de court-circuit, les conditions ci-après doivent être remplies:

- 1) Les résultats des essais de court-circuit et les mesures et les vérifications effectuées pendant les essais ne révèlent aucune condition de défaut.
- 2) Les essais diélectriques et autres essais individuels, lorsqu'ils s'appliquent, ont été répétés avec succès ainsi que l'essai de choc de foudre, s'il est spécifié.
- 3) L'inspection hors de la cuve ne révèle aucun défaut tel que le déplacement de tôles, les déformations d'enroulements, de connexions ou des structures d'appui susceptibles de mettre en danger la sécurité de fonctionnement du transformateur.
- 4) Aucune trace de décharge électrique interne.

4.2.7.3 After each test, the oscillograms taken during the test shall be checked, the gas-and-oil-actuated relay inspected and the short-circuit reactance measured. For three-phase transformers, the measured reactance shall be evaluated on a 'per-phase' basis, either by direct measurement of the phase-to-neutral reactance in case of a star-connected winding or derived from a delta winding configuration by a suitable method.

NOTE 1 Additional means of evaluation may be used to judge the result of the test, such as winding resistance measurements, low-voltage impulse testing techniques (for comparison between the oscillograms obtained in the original state and those after the test), analysis of frequency response spectrum, transfer function analysis, no-load current measurements and comparison of dissolved gas analysis results before and after test.

NOTE 2 Any differences between the results of measurements made before and after the test may be used as a criterion for determining possible defects. It is particularly important to observe, during successive tests, possible changes in the short-circuit reactance measured after each test, which may be progressive or tending to vanish.

NOTE 3 In order to detect turn-to-turn faults, it is advisable to perform short-circuit reactance measurements from the HV as well as LV side.

4.2.7.4 After completion of the tests, the outside of the transformer and the gas-and-oil-actuated relay, if any, shall be inspected. The results of the short-circuit reactance measurements and the oscillograms taken during the different stages of the tests shall be examined for any indication of possible anomalies during the tests, especially any indications of change in the short-circuit reactance.

NOTE 1 At the end of the tests, if the windings are provided with tapping, the reactance should be measured for all the tapping positions at which the short-circuit tests have been carried out.

NOTE 2 Generally, the short-circuit reactance variation should show a tendency to diminish in the course of the tests. There may also be a certain change of reactance with time after the tests. Hence, if there is a high variation of reactance exceeding the prescribed limits, based on measurements made immediately after the test, it may be prudent to repeat the measurements after an interval in order to check whether the variation is maintained. This last value of reactance is accepted as the final value when determining compliance with the requirements of the standard.

Different procedures are followed at this stage for transformers of categories I, II and III. These procedures and reactance limits are given in the following items a) and b).

a) Transformers of categories I and II

Unless otherwise agreed, the active part shall be removed from the tank for inspection of the core and windings and compared with its state before the test, in order to reveal possible apparent defects such as changes in lead position, displacements, etc. which, in spite of successful routine tests, might endanger the safe operation of the transformer.

All the routine tests, including dielectric tests at 100 % of the prescribed test value (see IEC 60076-3), shall be repeated. If a lightning impulse test is specified, it shall be performed at this stage. However, for transformers of category I, the repetition of the routine tests with the exception of the dielectric tests may be omitted.

In order to consider the transformer as having passed the short-circuit test, the following conditions shall be fulfilled.

- 1) The results of the short-circuit tests and the measurements and checks performed during tests do not reveal any condition of faults.
- 2) The dielectric tests and other routine tests when applicable, have been successfully repeated and the lightning impulse test, if specified, successfully performed.
- 3) The out-of-tank inspection does not reveal any defects such as displacements, shift of laminations, deformation of windings, connections or supporting structures, so significant that they might endanger the safe operation of the transformer.
- 4) No traces of internal electrical discharge are found.

- 5) les valeurs de réactance de court-circuit, en ohms, évaluées pour chaque phase à la fin des essais ne diffèrent pas des valeurs d'origine de plus de:
- 2 % pour les transformateurs à bobines concentriques circulaires⁷ et bobines non circulaires de type alterné. Toutefois, pour les transformateurs utilisant le feuillard métallique comme conducteur dans les enroulements basse tension et dont la puissance nominale ne dépasse pas 10 000 kVA, des valeurs plus élevées ne dépassant pas 4 % sont acceptables pour les transformateurs ayant une impédance de court-circuit de 3 % ou plus. Si l'impédance de court-circuit est inférieure à 3 %, la limite supérieure de 4 % est soumise à un accord entre le constructeur et l'acheteur;
 - 7,5 % pour les transformateurs avec des bobines concentriques non circulaires ayant une impédance de court-circuit de 3 % ou plus. La valeur de 7,5 % peut être réduite par accord entre le fabricant et l'acheteur, mais elle ne doit pas être inférieure à 4 %.

NOTE 3 Pour les transformateurs munis de bobines concentriques non circulaires ayant une impédance de court-circuit inférieure à 3 %, la variation maximale de réactance ne peut pas être spécifiée de façon générale. La connaissance pratique de certains types de construction peut conduire à accepter pour de tels transformateurs une variation de $(22,5 - 5,0 \cdot Z_t) \%$, Z_t étant l'impédance de court-circuit exprimée en pourcentage.

NOTE 4 Les transformateurs appartenant à la partie supérieure de la catégorie II et ayant des tensions les plus élevées pour le matériel U_m ne dépassant pas 52 kV demandent une attention particulière et peuvent nécessiter un ajustement de la limite de variation de la réactance ci-dessus.

Si l'une des conditions ci-dessus n'est pas remplie, le transformateur doit être démonté, autant que nécessaire, pour établir la cause de l'écart.

b) Transformateurs de catégorie III

La partie active doit être rendue visible pour permettre l'inspection du circuit magnétique et des enroulements, et son état doit être comparé à l'état avant essai afin de mettre en évidence d'éventuels défauts apparents tels que le changement de la position des conducteurs, déplacements, etc. qui, en dépit de la réussite aux essais individuels, peuvent altérer le fonctionnement sans risque du transformateur.

Tous les essais individuels, y compris les essais diélectriques à 100 % de la valeur d'essai prescrite (voir la CEI 60076-3), doivent être répétés. Si un essai de choc de foudre est spécifié, il doit être effectué à ce stade.

Pour considérer le transformateur comme ayant satisfait aux essais de court-circuit, les conditions ci-après doivent être remplies:

- 1) Les résultats des essais de court-circuit et les mesures et les vérifications effectuées pendant les essais ne révèlent aucune condition de défaut.
- 2) Les essais individuels ont été répétés avec succès ainsi que l'essai de choc de foudre, s'il est spécifié.
- 3) L'inspection hors de la cuve ne révèle aucun défaut tel que le déplacement de tôles, les déformations d'enroulements, de connexions ou des structures d'appui susceptibles de mettre en danger la sécurité de fonctionnement du transformateur.
- 4) Aucune trace de décharge électrique interne.
- 5) Les valeurs de réactance de court-circuit, en ohms, évaluées pour chaque phase à la fin des essais ne diffèrent pas des valeurs d'origine de plus de 1 %.

Si la variation de la réactance est comprise entre 1 % et 2 %, l'acceptation est sujette à accord entre l'acheteur et le constructeur. Dans ce cas, un examen plus détaillé peut être demandé, comprenant un démontage de la partie active si nécessaire pour établir la cause de l'écart. Cependant, avant le démontage, il est suggéré que des moyens de diagnostic supplémentaires soient utilisés (voir note 1 de 4.2.7.3).

⁷ Les bobines circulaires comprennent toutes les bobines enroulées sur une forme cylindrique, même si, par exemple, du fait de la présence des conducteurs de sortie dans les enroulements de feuille métallique, il se peut qu'il y ait des variations locales à la forme cylindrique.

- 5) The short-circuit reactance values, in ohms, evaluated for each phase at the end of the tests, do not differ from the original values by more than
- 2 % for transformers with circular concentric coils⁷ and sandwich non-circular coils. However, for transformers having metal foil as a conductor in the low-voltage winding and with rated power up to 10 000 kVA, higher values, not exceeding 4 %, are acceptable for transformers with a short-circuit impedance of 3 % or more. If the short-circuit impedance is less than 3 %, the above limit of 4 % is subject to agreement between the manufacturer and the purchaser;
 - 7,5 % for transformers with non-circular concentric coils having a short-circuit impedance of 3 % or more. The value of 7,5 % may be reduced by agreement between the manufacturer and the purchaser, but not below 4 %.

NOTE 3 For transformers with non-circular concentric coils having a short-circuit impedance below 3 %, the maximum variation in reactance cannot be specified in a general manner. Practical knowledge of certain types of construction leads to the acceptance for such transformers of a variation equal to $(22,5 - 5,0 \cdot Z_t) \%$, Z_t being the short-circuit impedance in per cent.

NOTE 4 Transformers falling in the upper range of category II and having highest voltage for equipment U_m not exceeding 52 kV deserve particular attention and may require an adjustment of the above reactance variation limit.

If any of the above conditions are not met, the unit shall be dismantled, as necessary, to establish the cause of the deviation.

b) Transformers of category III

The active part shall be made visible for inspection of the core and windings and compared with its state before the test, in order to reveal possible apparent defects such as changes in lead position, displacements, etc. which, in spite of successful routine tests, might endanger the safe operation of the transformer.

All the routine tests, including dielectric tests at 100 % of the prescribed test value (see IEC 60076-3), shall be repeated. If a lightning impulse test is specified, it shall be performed at this stage.

In order to consider the transformer as having passed the short-circuit tests, the following conditions shall be fulfilled.

- 1) The results of the short-circuit tests and the measurements and checks performed during tests do not reveal any condition of faults.
- 2) The routine tests have been successfully repeated and the lightning impulse test, if specified, successfully performed.
- 3) The out-of-tank inspection does not reveal any defects such as displacements, shift of laminations, deformation of windings, connections or supporting structures, so significant that they might endanger the safe operation of the transformer.
- 4) No traces of internal electrical discharge are found.
- 5) The short-circuit reactance values, in ohms, evaluated for each phase at the end of the tests do not differ from the original values by more than 1 %.

If the reactance variation is in the range 1 % to 2 %, the acceptance is subject to agreement between the purchaser and the manufacturer. In this case, a more detailed examination may be required, including a dismantling of the unit as necessary to establish the cause of the deviation. However, before dismantling, it is suggested that additional diagnostic means be applied (see 4.2.7.3, Note 1).

⁷ Circular coils include all coils wound on a cylindrical form, even though, for example, because of the presence of the exit leads in metal foil windings, there might be local deviations from the cylindrical shape.

NOTE 5 En relation avec l'impact économique du coût d'un transformateur de catégorie III et l'implication du coût de tout contrôle visuel approfondi étendu aux parties internes de celui-ci, il est recommandé qu'une série de photographies soit prise de la position des câbles d'enroulement, des prises, de l'alignement des entretoises et de la configuration des composants de l'isolation d'extrémité, etc., pour permettre une comparaison précise des parties avant et après les essais. Dans ce contexte, une vérification de la compression axiale des enroulements peut être utile. Par nécessité, il est laissé à l'accord mutuel entre les parties d'accepter l'existence de déplacements et changements mineurs, pourvu que la fiabilité du transformateur en service n'en soit pas affectée.

NOTE 5 In connection with the economical impact of the cost of a transformer of category III and the cost implication of any thorough visual inspection extended to the inner parts of the unit, it is recommended that a series of photographs be taken of the position of the winding leads, taps, alignment of spacers and configuration of the end-insulation components, etc. to allow accurate comparison of the parts before and after the tests. In this context, a check of the axial compression of the windings could be useful. By necessity, it is left to mutual agreement between the parties to accept the existence of small displacements and changes, provided that the service reliability of the transformer is not affected.

Annexe A (informative)

Evaluation théorique de la capacité de résister aux effets dynamiques de court-circuit

A.1 Domaine d'application

Cette annexe donne des lignes directrices pour l'évaluation théorique de l'aptitude d'un transformateur de puissance à résister aux effets dynamiques de court-circuit, basée sur le calcul et la considération des caractéristiques de conception et des pratiques en matière de fabrication.

NOTE Des informations complémentaires concernant les aspects techniques de la capacité de court-circuit des transformateurs de puissance sont données dans la Brochure CIGRE 209: « Les performances au court-circuit des transformateurs de puissance » – Août 2002.

A.2 Généralités

L'évaluation théorique de l'aptitude d'un transformateur de puissance à résister aux effets dynamiques de court-circuit comprend une revue de conception couvrant les principaux aspects de résistance mécanique du transformateur. La documentation nécessaire pour les besoins englobe l'ensemble des données techniques, telles que les fiches des données relatives à la conception électromagnétique, les calculs des courants de court-circuit, les forces électromagnétiques et les contraintes mécaniques, complétés par des schémas, des spécifications de matériaux, des pratiques en matière de fabrication et les procédures d'élaboration, etc., documents qui sont produits soit pour décrire la conception électromagnétique et mécanique spécifique du transformateur, soit en tant que partie de la documentation de la technologie du fabricant.

Il convient que la revue de conception vérifie les valeurs les plus critiques des forces mécaniques et des contraintes apparaissant lors de la conception résultant des conditions de défauts spécifiés. Il convient que ces valeurs soient comparées à celles relatives à un transformateur de référence testé avec succès au court-circuit, à condition que le transformateur à l'étude soit similaire⁸, ou soient contrôlées par rapport aux règles de conception du fabricant pour assurer la résistance au court-circuit. La structure de support des enroulements et le système de serrage global, ainsi que les pratiques en matière de fabrication sont également des sujets à considérer dans la revue de conception.

La revue de conception décrite dans la présente annexe s'applique principalement aux transformateurs des catégories II et III.

Pour les transformateurs de catégorie I, qui sont normalement classés comme des unités qui sont achetées en grand volume, il convient de préférer la procédure d'évaluation consistant à effectuer un essai de tenue de court-circuit sur une ou deux unités. L'essai de court-circuit d'une ou deux unités d'une commande d'une série est normalement considéré comme la manière la plus rapide et la moins chère pour vérifier la conformité. Néanmoins, pour ces transformateurs il est également possible d'adopter la procédure d'évaluation se composant d'une revue de conception.

⁸ Pour la définition du transformateur similaire, se reporter à l'Annexe B.

Annex A (informative)

Theoretical evaluation of the ability to withstand the dynamic effects of short circuit

A.1 Scope

This annex gives guidelines for the theoretical evaluation of the ability of a power transformer to withstand the dynamic effects of short circuit, based on calculation and consideration of the design characteristics and manufacturing practices.

NOTE Additional information on technical issues relating to the short-circuit capability of power transformers are given in Cigre Brochure 209, "The Short-circuit Performance of Power Transformers", August 2002.

A.2 General

The theoretical evaluation of the ability of a power transformer to withstand the dynamic effects of short circuit consists of a design review covering the main mechanical strength aspects of the transformer. The documentation needed for the purpose includes all necessary technical data, such as electromagnetic design data sheets, calculations of short-circuit currents, electromagnetic forces and mechanical stresses, supplemented by drawings, material specifications, manufacturing practices and process instructions, etc., either produced for the specific purpose of the electromagnetic and mechanical design of the transformer or as part of the manufacturer's technology documentation.

The design review should check the most critical mechanical force and stress values appearing in the design as a consequence of the fault conditions specified. Such values should either be compared with the corresponding ones relating to a reference transformer successfully short-circuit tested, on condition that the transformer under consideration is similar⁸ or be checked against the manufacturer's design rules for short-circuit strength. The winding support structure and overall clamping arrangement, as well as the manufacturing practices are also matter for consideration in the design review.

The design review described in this annex mainly applies to transformers of categories II and III.

For transformers of category I, which are normally classified as units that are purchased in bulk, the evaluation procedure consisting in carrying out a short-circuit withstand test on one or two units should be preferred. Short-circuit testing of one or two of units of a bulk order is normally considered as the quickest and cheapest way to verify conformance. Nevertheless, for these transformers it is also possible to adopt the evaluation procedure consisting of a design review.

⁸ As regards the definition of similar transformer, see Annex B.

En ce qui concerne les transformateurs des catégories II et III, il est admis que parfois il s'avère être difficile pour le fabricant de trouver dans ses dossiers un transformateur de référence adapté pour les besoins de comparaison, par rapport à la similarité. Dans ce cas, pour les besoins de l'évaluation, le transformateur peut être comparé simultanément à un nombre limité de transformateurs testés avec succès au court-circuit à condition que chacune de ses caractéristiques, comme mentionnées en Annexe B, soit égale à l'essai correspondant sur au moins un des transformateurs choisis pour référence.

Par exemple, l'évaluation de la conception d'un autotransformateur triphasé équipé d'un enroulement tertiaire connecté en triangle et à puissance réduite peut être divisée en deux parties, à savoir:

- pour les enroulements série et commun: par comparaison avec les données de conception concernant un autotransformateur triphasé sans enroulement tertiaire;
- pour l'enroulement tertiaire: par comparaison avec un transformateur triphasé avec un enroulement tertiaire à puissance réduite, sur lequel l'enroulement tertiaire a également été soumis aux essais.

A.3 Lignes directrices pour réaliser la revue de conception

A.3.1 Généralités

Il convient que la revue de conception comporte les étapes suivantes:

- Examen du transformateur sur la base de documents techniques pertinents.
- Évaluation du transformateur:
 - soit par comparaison avec un transformateur de référence qui a satisfait à l'essai de court-circuit,
 - ou par vérification par rapport aux règles de conception du fabricant pour la résistance au court-circuit.
- Résultat de la revue de conception du transformateur et l'accusé de réception des réponses.

A.3.2 Informations concernant le transformateur à évaluer

Il convient que le dossier à présenter par le fabricant pour les besoins de la revue de conception contienne les éléments suivants:

- a) Les fiches des données relatives à la conception électromagnétiques, selon besoins pour le calcul.
- b) Les dessins ou graphiques de la disposition complète des enroulements et de l'isolation à l'intérieur de la fenêtre du circuit magnétique avec l'indication des types de matériaux.
- c) Le calcul des valeurs de courants de court-circuit (à la fois les valeurs crête et les valeurs efficaces symétriques) affectant chaque enroulement individuel à la suite des exigences spécifiées relatives à l'endurance et aux types de défaut pris en considération, en tenant bien compte des positions de prise dans le cas du ou des enroulements munis de prises.
- d) Le calcul des principales forces de court-circuit (les valeurs crête se produisant à la crête la plus élevée du courant respectif), en se référant aux cas de défaut, les positions de prises et les positions géométriques et relatives des enroulements considérés pour les besoins de conception. Les informations complètes doivent être fournies si des configurations géométriques simplifiées ont été adoptées pour les enroulements, le noyau magnétique et la cuve pour les besoins des calculs du flux de fuite magnétique et des forces électromagnétiques.

With regard to transformers of categories II and III, it is acknowledged that sometimes it turns out to be difficult for the manufacturer to find in his files a reference transformer fit for the purpose of comparison, with respect to similarity. In this case, for the purpose of evaluation the transformer may be simultaneously compared with a limited number of successfully short-circuit tested transformers on condition that each of its characteristics, as listed in Annex B, equals the corresponding one on at least one of the transformers selected for reference.

For example, the evaluation of the design of a three-phase autotransformer provided with a delta-connected tertiary winding at reduced capacity can be split into two parts, namely:

- as regards the series and common windings: comparison with the design data relevant to a three-phase autotransformer with no tertiary winding;
- as regards the tertiary winding: comparison with a three-phase transformer with a tertiary winding at reduced capacity, on which the tertiary winding has also been tested.

A.3 Guidelines for conducting the design review

A.3.1 General

The design review should consist of the following steps.

- Examination of the transformer based on pertinent technical documentation.
- Evaluation of the transformer either
 - by comparison with a reference transformer which has passed the short-circuit test successfully, or
 - by check against the manufacturer's design rules for short-circuit strength.
- Result of the design review and formal acknowledgement of the transformer.

A.3.2 Information relating to the transformer to be evaluated

The evidence to be presented by the manufacturer for the purpose of the design review should include the following items.

- a) Electromagnetic design data sheets as needed for calculation.
- b) Drawings or sketches of the complete winding and insulation arrangement within the core window with indication of the types of material.
- c) Calculation of the short-circuit current values (both peak and symmetrical r.m.s. values) affecting each single winding as a result of the service duty requirements specified and types of fault taken into consideration, with also due regard to the tapping positions in case of winding(s) provided with taps.
- d) Calculation of the main short-circuit forces (peak values occurring at the highest peak of the respective current), with reference to the fault cases, tapping positions and geometrical and relative positions of windings considered for design purposes. Full information has to be given if any simplified geometrical configurations have been adopted for the windings, core and tank for the purpose of magnetic leakage field and electromagnetic force calculations.

Les forces axiales de court-circuit des transformateurs colonnes, et respectivement les forces radiales de court-circuit des transformateurs cuirassés, sont très sensibles aux positions relatives des enroulements de f.m.m. en opposition. Le constructeur doit spécifier quels sont les déplacements maximaux dus aux tolérances de fabrication qu'il a considérés ainsi que les configurations des enroulements (plans de symétrie et conditions aux limites) qu'il a supposés pour les besoins des calculs des efforts de court-circuit.

Les forces électromagnétiques suivantes doivent être considérées:

- Pour les transformateurs colonnes:
 - la force radiale vers l'intérieur ou vers l'extérieur sur chaque enroulement physique,
 - la force de compression axiale maximale sur chaque enroulement physique (F_c^*),⁹
 - la force de poussée en extrémité axiale maximale (vers le haut ou le bas) pour chaque enroulement physique,
 - la force axiale maximale globale par colonne bobinée s'exerçant sur l'anneau commun de serrage (ou le plateau de serrage), s'il est utilisé, et sur le système de serrage du circuit magnétique,
 - la force de poussée agissant sur les câbles de sortie de chaque enroulement basse tension (T_t^*)¹⁰.
- Pour les transformateurs cuirassés:
 - les forces axiales qui agissent sur chaque bobine et sur les groupes de chacun des enroulements à l'intérieur et à l'extérieur de la fenêtre de circuit magnétique,
 - les forces radiales agissant sur les groupes alternés de bobines,
 - force totale sur les cales de coin entre phase et les cales de pression contre le circuit magnétique et contre les structures de renforcement de cuve,
 - force totale sur les tôles du circuit magnétique,
 - force totale sur les structures de renforcement de cuve.

Pour chaque enroulement physique, le système de forces le plus sévère résultant des cas de défaut et des positions de prise considérées dans la conception doit être identifié. En ce qui concerne la structure entière du transformateur, on doit considérer les forces résultant du cas de défaut impliquant la quantité la plus élevée de puissance réactive prélevée depuis le ou les systèmes électrique(s).

- e) Le calcul des contraintes mécaniques de base sur les conducteurs d'enroulement et les structures adjacentes couplées mécaniquement ayant pour origine les forces de court-circuit. Les contraintes mécaniques suivantes doivent être considérées:
- ◆ Pour les transformateurs colonnes:
 - contrainte moyenne circonférentielle de traction sur les enroulements extérieurs (σ_t^*)¹¹,

⁹ Voir la Note 1 en fin de cette annexe.

¹⁰ Pour la définition et le calcul de la force de poussée agissant sur les câbles de sortie de l'enroulement basse tension, voir A.3.3.2.2.

¹¹ Pour le calcul de la contrainte moyenne circonférentielle de traction, les enroulements de type disques et hélice comportant un ou plusieurs canaux dans leur épaisseur radiale peuvent être considérés comme des anneaux sans canaux.

Axial short-circuit forces with core-type transformers and radial short-circuit forces with shell-type transformers, respectively, are very sensitive to the relative positions of the windings holding m.m.f.s of opposite sign. The manufacturer should specify which are the amounts of displacement due to workshop tolerances he has considered as well as the winding configurations (planes of symmetry and boundary conditions) he has assumed for the purpose of short-circuit force calculations.

The following electromagnetic forces should be considered.

- With core-type transformers:
 - radial inward or outward force on each physical winding;
 - maximum axial compression force on each physical winding (F_c^*)⁹;
 - maximum axial end thrust force (up/down) on each physical winding;
 - maximum axial force-per-limb on common press ring (or plate), if used, and core clamps;
 - thrust force acting on the lead exits of each main low-voltage winding (T_f^*)¹⁰.
- With shell-type transformers:
 - axial forces acting on each coil and on winding groups at the inside and the outside of the core window;
 - radial forces acting on pancake coils;
 - total force on inter-phase wedges and press blocks against the core and tank reinforcement structures;
 - total force on core laminations;
 - total force on tank reinforcement structures.

For each physical winding, the most severe force condition resulting from the fault cases and tapping positions considered in design has to be identified. As regards the whole structure of the transformer, one has to consider the forces resulting from the fault case involving the highest amount of reactive power drawn from the system(s).

- e) Calculation of basic mechanical stresses on winding conductors and adjacent mechanically coupled structures originated by the short-circuit forces. The following mechanical stresses should be considered.
- With core-type transformers:
 - mean hoop tensile stress on outer windings (σ_t^*)¹¹;

⁹ See Note 1 at the end of this annex.

¹⁰ For the definition and calculation of the thrust force acting on the low-voltage winding lead exits, see A.3.3.2.2.

¹¹ As regards mean hoop tensile stress calculation, disc- and helical-type windings provided with one or more cooling ducts within their radial width can be treated like solid rings with no ducts.

- contrainte moyenne circonférentielle de compression sur les enroulements intérieurs de type disque, en hélice ou simple couche (σ_c^*)¹²,
 - contrainte équivalente moyenne circonférentielle de compression sur des enroulements de type multicouches intérieurs ($\sigma_{c, eq}^*$)¹³,
 - contrainte due à la flexion radiale des conducteurs entre les réglettes verticales et entre les entretoises utilisées pour construire tout canal de refroidissement axial dans la largeur radiale d'enroulement (σ_{br}^*),
 - contrainte due à la flexion axiale des conducteurs entre les cales radiales des enroulements de type hélicoïdaux ou de type disques (σ_{ba}^*),
 - contraintes de compression sur les cales radiales des enroulements de type disques ou en hélice (σ_{sp}^*)¹⁴,
 - contraintes de compression sur l'isolation papier des conducteurs des enroulements de type couche (σ_{pi}^*),
 - contraintes de compression sur les structures d'isolation empilées d'extrémité (σ_{es}^*) et les anneaux d'extrémité (σ_{er}^*),
 - contraintes de compression sur des anneaux de serrage commun (ou des plateaux) si utilisés (σ_{pr}^*),
 - les contraintes de traction dans les tirants (plaques de renforcement) du système de serrage (σ_{rod}^*).
- ◆ Pour les transformateurs cuirassés:
- contrainte due à la flexion axiale des conducteurs entre les cales entre bobine (σ_{ba}^*),
 - contraintes de compression sur l'isolation papier des conducteurs (σ_{pi}^*) et sur les cales (σ_{sp}^*) entre bobines,
 - contraintes de compression sur les cales de coin entre phases (σ_{iw}^*) et sur les cales de pression contre le circuit magnétique et contre les structures de renforcement de cuve (σ_{pb}^*),
 - contrainte de traction et de flexion sur les tôles du circuit magnétique (σ_{cl}^*),
 - contrainte de traction et de flexion sur structures de renforcement de cuve (σ_{tr}^*).

Pour chaque enroulement physique et ses constituants, la condition de contrainte la plus sévère qui a pour origine les forces de court-circuit doit être considérée.

- f) Les schémas, les croquis, ou les sorties d'ordinateur, en ce qui concerne la structure de support des enroulements et le système de serrage du circuit magnétique et des bobines, telles que:

¹² Pour le calcul de la contrainte moyenne circonférentielle de compression, les enroulements de type disques et hélice comportant un ou plusieurs canaux dans leur épaisseur radiale peuvent être considérés comme des anneaux sans canaux.

¹³ Dans le cas de deux couches identiques, la contrainte équivalente moyenne circonférentielle de compression est égale à la moyenne arithmétique des contraintes respectives. Dans le cas de trois couches ou plus, la contrainte ci-dessus est supposée être égale à 1,1 fois la moyenne arithmétique des contraintes de compression calculées sur les diverses couches.

¹⁴ La contrainte de compression sur les cales radiales est calculée en considérant la zone couverte par les conducteurs nus et en négligeant tout effet relatif à leur rayon de courbure.

- mean hoop compressive stress on disc-, helical-, single-layer-type inner windings (σ_c^*)¹²;
 - equivalent mean hoop compressive stress on layer-type inner windings ($\sigma_{c, eq}^*$)¹³;
 - stress due to radial bending on conductors in the span between axial sticks and between spacers used to build any axial cooling ducts within the winding radial width (σ_{br}^*);
 - stress due to axial bending on conductors in the span between radial spacers with disc- and helical-type windings (σ_{ba}^*);
 - compressive stress on radial spacers with disc- and helical-type windings (σ_{sp}^*)¹⁴;
 - compressive stress on conductor paper insulation with layer-type windings (σ_{pi}^*);
 - compressive stresses on end stack insulation structures (σ_{es}^*) and end rings (σ_{er}^*);
 - compressive stress on common press rings (or plates), if used (σ_{pr}^*);
 - tensile stress on tie rods (flitch plates) of the clamping structure (σ_{rod}^*).
- With shell-type transformers:
 - stress due to axial bending on conductors in the span between coil spacers (σ_{ba}^*);
 - compressive stress on conductor paper insulation (σ_{pi}^*) and on spacers (σ_{sp}^*) in pancake coils;
 - compressive stress on inter-phase wedges (σ_{iw}^*) and on press blocks against the core and tank reinforcement structures (σ_{pb}^*);
 - tensile and bending stress on core laminations (σ_{cl}^*);
 - tensile and bending stress on tank reinforcement structures (σ_{tr}^*).

For each physical winding and structural component, the most severe stress condition originated by the short-circuit forces should be considered.

- f) Drawings, sketches, or computer outputs, concerning the winding support structure and core-and-coil clamping arrangement, such as

¹² As regards mean hoop compressive stress calculation, disc- and helical-type windings provided with one or more cooling ducts within their radial width can be treated like solid rings with no ducts.

¹³ In the case of two equal layers the equivalent mean hoop compressive stress is equal to the arithmetic mean of the respective stresses. In the case of three or more layers, the above stress is assumed to be equal to 1,1 times the arithmetic mean of the compressive stresses calculated on the various layers.

¹⁴ Compressive stress on radial spacers is calculated by considering the area covered by the bare conductors and by neglecting any effect relating to their corner radius.

- ◆ Pour les transformateurs colonnes:
 - disposition des supports radiaux contre les branches du circuit magnétique, configuration des structures d'isolation empilées d'extrémité, anneaux commun de serrage (ou des plateaux) si utilisés, agencement du serrage global du circuit magnétique et des bobinages, etc.
 - ◆ Pour les transformateurs cuirassés:
 - système de serrage axial, cales de serrage, empilage d'isolants, disposition de calage en tête de bobine et entre les phases, barrières isolantes entre les enroulements et le noyau magnétique, etc.;
 - structure de renfort de la base de la cuve pour supporter le circuit magnétique, disposition des ressorts assurant le serrage du circuit magnétique, structures de renforcement de cuve, autres dispositions de fixation de l'empilage des tôles magnétiques, etc.
 - ◆ En général:
 - moyens pour fixer de façon sûre les câbles de sorties des enroulements et les câbles de connexion ou les barres de connexion Basse Tension aux traversées, ainsi que le faisceau de câbles au changeur de prises, etc.;
 - moyens pour appliquer une précontrainte initiale axiale.
- g) Instructions pour l'assurance de la qualité et le contrôle de la qualité à la fois des matériaux et des procédures de fabrication, avec la référence spécifique aux étapes de fabrication comme par exemple:
- bobinage des conducteurs sur le tour et le contrôle de la tension appliquée, mise à la cote et stabilisation axiale des enroulements et des bobines, assemblage dans les tolérances spécifiées, séchage et imprégnation avec l'huile, application de la précontrainte (force de serrage), le serrage/fixation des supports d'enroulement, des câbles d'extrémité et des dispositifs de serrage, etc.;
 - en particulier pour les transformateurs cuirassés: serrage et pressage des bobines à l'intérieur et à l'extérieur de la fenêtre du circuit magnétique au moyen de cales entre phases, les cales assurant le serrage contre le circuit magnétique et contre les structures de renforcement de cuve, etc.
- h) vérifications concernant les principaux composants externes du transformateur, en particulier les traversées haute tension, spécialement dans le cas où elles sont montées inclinées sur des buselures, etc.

A.3.3 Évaluation du transformateur

A.3.3.1 Généralités

Dans l'évaluation du transformateur, deux méthodes alternatives peuvent être étudiées, basées soit en comparant avec un transformateur de référence qui a passé avec succès l'essai de court-circuit (voir A.3.3.2) soit en contrôlant les règles de conception documentées vis à vis de la tenue au court-circuit qui ont été adoptées par le fabricant pour sa production normale (voir A.3.3.3).

Ces méthodes alternatives sont décrites ci-dessous.

A.3.3.2 Évaluation en comparant avec un transformateur de référence

A.3.3.2.1 Identification du transformateur de référence

Le transformateur de référence est considéré approprié pour les besoins de la comparaison à condition qu'il remplisse les exigences suivantes:

- Ses caractéristiques sont telles que le transformateur en évaluation peut être considéré similaire.

- with core-type transformers:
 - arrangement of the radial supports against the core limb, configuration of the end stack insulation structures, common press rings (or plates), if used, overall core-and-coil clamping arrangement, etc.;
 - with shell-type transformers:
 - axial clamping arrangement, press blocks, fillers, wedging arrangement for coil heads and between phases, insulation barriers between windings and core, etc.;
 - supports of the core against the tank, arrangement of the springs to hold the core, tank reinforcement structures, other fastening provisions of the lamination stack, etc.;
 - in general:
 - means for securely fastening the winding lead exits and LV connection leads or bars to the bushings and lead runs to tap-changers, etc.;
 - means for the application of any axial pre-load.
- g) Instructions for quality assurance and quality control concerning both materials and manufacturing practices, with specific reference to manufacturing activities such as
- winding of the conductors on the mandrel and control of the pulling force, sizing and elastic stabilizing of windings and coils, assembling within specified tolerances, drying and impregnation with oil, application of pre-load (clamping force), fastening/securing of winding supports, leads and clamping devices, etc.;
 - specifically for shell-type transformers: clamping and pressing of the coils at the inside and the outside of the core window by means of inter-phase wedges, press blocks for the purpose of clamping against the core and tank reinforcements, etc.
- h) Checks concerning main transformer external components, in particular high-voltage bushings, especially in the case where they are slope-mounted on turrets, etc.

A.3.3 Evaluation of the transformer

A.3.3.1 General

In the evaluation of the transformer, two alternative methods can be pursued, based either on the comparison with a reference transformer that has passed the short-circuit test successfully (see A.3.3.2) or the check against documented design rules for short-circuit strength adopted by the manufacturer in regular production (see A.3.3.3).

These alternative methods are described below.

A.3.3.2 Evaluation by comparison with a reference transformer

A.3.3.2.1 Acknowledgement of the reference transformer

The reference transformer is judged suitable for the purpose of comparison on condition that it fulfils the following requirements.

- Its characteristics are such that the transformer on evaluation can be considered similar.

- En principe, il a été conçu par les mêmes méthodes de calcul et les mêmes critères de tenue mécanique que ceux utilisés pour le transformateur en évaluation.
- Il a été fabriqué selon des pratiques fondamentalement identiques à celles utilisées pour le transformateur en évaluation, les mêmes instructions concernant l'assurance qualité et le contrôle de qualité.
- La plage de validité des règles pour la tenue au court-circuit adoptée pour la conception couvre les caractéristiques des deux transformateurs.

Le transformateur de référence doit avoir passé avec succès l'essai de court-circuit.

L'identification du ou des transformateurs de référence comprend les étapes suivantes:

- Vérifier qu'il est adapté pour les besoins de la comparaison comme décrit ci-dessus.
- Examen du ou des rapports au sujet du ou des essais de court-circuit.
- Connaissance des principales données relatives à la conception électromagnétique, aux calculs réalisés et aux critères de tenue mécaniques adoptés pour la conception.
- Connaissance des pratiques adoptées pour la fabrication, l'assurance de la qualité et les instructions relatives au contrôle de la qualité.

A.3.3.2.2 Evaluation comparative

Il convient de débiter l'évaluation comparative par l'examen et la comparaison de l'enroulement et des principales structures d'isolation et du système de serrage des deux transformateurs, particulièrement à la lumière de leurs caractéristiques de tenue mécaniques apparentes respectives. À partir de cette évaluation comparative il devrait être possible de conclure que la robustesse du transformateur en évaluation est en principe égale à celle du transformateur de référence en ce qui concerne sa structure mécanique de base.

Les valeurs de force et de contraintes correspondantes (voir A.3.2) calculées sur les deux transformateurs doivent alors être comparées. Dans ce but, l'utilisation du Tableau A.1 ou A.2 est recommandée. Toute valeur de force ou de contrainte concernant le transformateur réel en évaluation et le transformateur de référence doit être intégrée dans la cellule correspondante dans les colonnes marquées «réelle» (réelle) et «réf» pour référence, respectivement. La valeur de force ou de contrainte la plus élevée résultant des conditions de court-circuit considérées dans la conception doit être utilisée pour chaque enroulement physique et composants associés et pour l'ensemble de la structure mécanique du transformateur.

A la suite de la comparaison, le transformateur est considéré capable de résister aux effets dynamiques du court-circuit à condition qu'aucune de ses valeurs de force ou de contrainte à compléter dans le Tableau A.1 ou A.2 ne dépasse 1,2 fois la valeur correspondante calculée sur le transformateur de référence, sauf pour les forces et les contraintes suivantes pour lesquelles des exigences plus rigoureuses à appliquer sont suggérées pour les transformateurs à colonnes:

- contrainte moyenne circonférentielle de compression sur les enroulements intérieurs de type disque, en hélice ou simple couche

$$\sigma_{c, act}^* \leq 1,1 \cdot \sigma_{c, ref}^*$$
- contrainte équivalente moyenne circonférentielle de compression sur des enroulements de type multicouches intérieurs

$$\sigma_{c, eq, act}^* \leq 1,1 \cdot \sigma_{c, eq, ref}^*$$

- It has been designed by basically the same calculation methods and mechanical withstand criteria as those employed for the transformer under evaluation.
- It has been manufactured according to basically the same practices, quality assurance and quality control instructions as those employed for the transformer under evaluation.
- The validity range of the rules for short-circuit strength adopted for design covers the characteristics of both transformers.

The reference transformer should have passed the short-circuit test successfully.

The acknowledgement of the reference transformer(s) consists of the following steps.

- A check that it is suitable for the purpose of comparison as described above.
- Examination of the report(s) concerning the short-circuit test(s).
- Acknowledgement of the main electromagnetic design data, calculations performed and mechanical withstand criteria adopted for design.
- Acknowledgement of the practices adopted for manufacture and quality assurance and quality control instructions.

A.3.3.2.2 Comparative evaluation

The comparative evaluation should start with the examination and comparison of the winding and main insulation structures and clamping arrangement of the two transformers, especially in the light of their respective apparent mechanical withstand characteristics. From this comparative evaluation it should be possible to conclude that the transformer on evaluation is, in principle, as robust as the reference transformer with regard to its basic mechanical structure.

Corresponding force and stress values (see A.3.2) calculated on the two transformers are then to be compared. For this purpose, the use of Table A.1 or Table A.2 is recommended. Any force or stress figure relating to the actual transformer on evaluation and to the reference transformer should be entered into the corresponding cell in the columns marked “act.” (actual) and “ref.” (reference), respectively. The highest force or stress value resulting from the short-circuit conditions considered in design should be used both for each physical winding and associated components and for the whole mechanical structure of the transformer.

As a result of the comparison, the transformer is considered able to withstand the dynamic effects of short circuit on condition that none of its force or stress figures to be filled in Table A.1 or Table A.2 exceeds 1,2 times the corresponding one calculated on the reference transformer, except for the following stresses and forces for which more stringent requirements are suggested to be applied for core-type transformers.

- Mean hoop compressive stress on disc- helical- and single-layer-type windings

$$\sigma_{c, \text{act}}^* \leq 1,1 \cdot \sigma_{c, \text{ref}}^*$$

- Equivalent mean hoop compressive stress on multi-layer-type windings

$$\sigma_{c, \text{eq, act}}^* \leq 1,1 \cdot \sigma_{c, \text{eq, ref}}^*$$

- force de poussée agissant sur les câbles de sortie de l'enroulement basse tension ¹⁵⁾

$$T_{f, \text{act}}^* \leq 1,1 \cdot T_{f, \text{ref}}^*$$

A.3.3.3 Evaluation par le contrôle des règles de conception du fabricant vis-à-vis de la tenue au court-circuit

A.3.3.3.1 Connaissance des informations de conception du fabricant pour la tenue au court-circuit

Il convient que les règles pour la tenue au court-circuit sur lesquelles le fabricant a basé la conception de l'unité à évaluer reposent sur une base expérimentale solide. Cela signifie qu'il convient que ces règles découlent de l'analyse soit des résultats d'un certain nombre d'essais de tenue au court-circuit réalisés sur des transformateurs réels soit du résultat d'essais réalisés sur des modèles de transformateur représentatifs combinés à tout retour d'expérience positif en matière de performances au court-circuit basée sur une exploitation prolongée sans incident d'un certain nombre de transformateurs, soit en s'appuyant simultanément sur ces deux types de démonstrations. Il convient pour le fabricant de présenter les informations suivantes:

- La liste des transformateurs construits par le fabricant qui ont été sujets à l'essai de court-circuit, y compris les données principales du transformateur, telles que la puissance assignée, la tension assignée, la gamme de prise, l'impédance de court-circuit.
- Les résultats des essais réalisés sur des modèles, le cas échéant, et leur impact sur les règles de conception.
- Le contenu des normes techniques pour la tenue au court-circuit des transformateurs de puissance utilisées par le constructeur dans ses procédures habituelles de conception et de fabrication.
- Le retour d'expérience et le taux de défaillance en service vis-à-vis des performances en court-circuit.
- Le nombre d'unités produites et le nombre d'années de service des transformateurs fonctionnant sans incident.

A partir des informations ci-dessus, il convient de montrer que le fabricant a des règles de conception adaptées à la tenue aux courts-circuits.

A.3.3.3.2 Procédure de vérification

Il convient de débiter la procédure de vérification par un examen préliminaire de l'enroulement et des principales structures d'isolation et du système de serrage du transformateur. A partir de cet examen il devrait s'ensuivre que les dispositions et le système de serrage adoptés sont compatibles avec ceux adoptés par le fabricant dans sa production de transformateurs robustes au court-circuit.

L'étape suivante comprend la comparaison de toutes les valeurs de force et de contraintes (voir A.3.2) calculées sur le transformateur avec les valeurs admissibles ou critiques correspondantes que le fabricant a adoptées dans sa pratique en matière de conception¹⁶.

¹⁵ La force de poussée agissant sur les câbles de sortie de l'enroulement basse tension (kN) est supposée par convention être égale au produit de la contrainte circonférentielle moyenne de compression sur l'enroulement (kN/mm²) par la section des câbles de sortie (mm²). La force de poussée s'exerçant vers le haut pourrait déformer l'enroulement suivant un mode de ruine type vissage et serrage. Dans les rares cas où l'enroulement basse tension est extérieur, la contrainte est de type traction et l'enroulement pourrait présenter une tendance à se dérouler,

¹⁶ Une valeur admissible signifie toute valeur de force ou de contrainte à laquelle la structure peut résister sans altération de sa tenue et de sa fonction; une valeur critique signifie toute valeur de force ou de contrainte qui occasionne une déformation permanente, une perte de stabilité ou un effondrement de la structure.

- Thrust force acting on the low-voltage winding lead exits ¹⁵

$$T_{f, \text{act}}^* \leq 1,1 \cdot T_{f, \text{ref}}^*$$

A.3.3.3 Evaluation by check against the manufacturer's design rules for short-circuit strength

A.3.3.3.1 Acknowledgement of the manufacturer's design information for short-circuit strength

The rules for short-circuit strength on which the manufacturer has based the design of the unit to be evaluated should possess a solid experimental basis. This means that these rules should stem from the analysis either of the results of a number of short-circuit withstand tests performed on actual transformers or the outcome of tests performed on representative transformer models combined to any indirect supportive evidence based on a long duration, trouble-free operation of a number of transformers in the field as regards the short-circuit performance, or both. The manufacturer should present the following information.

- The list of transformers built by the manufacturer which have been subject to the short-circuit test, including main transformer data, such as rated power, rated voltage, tapping range, and short-circuit impedance.
- The results of the tests performed on models, if any, and their impact on the design rules.
- The contents of the technical standards for short-circuit strength of power transformers used by the manufacturer in regular design and production activities.
- Service records and in-field failure rates as regards short-circuit performance.
- The number of units produced and the number of service years of successfully operated transformers.

From the above information it should be proved that the manufacturer has adequate design rules for short-circuit strength.

A.3.3.3.2 Checking procedure

The checking procedure should start with a preliminary examination of the winding and main insulation structures and clamping arrangement of the transformer. From this examination, it should result that both such structures and the clamping arrangement are consistent with the corresponding ones adopted by the manufacturer in his production of short-circuit safe transformers.

The next step consists of comparing any force and stress values (see A.3.2) calculated on the transformer with the corresponding allowable or critical values that the manufacturer has adopted in his design practice¹⁶. Such values could be different for different manufacturers.

¹⁵ The thrust force acting on the low-voltage winding lead exits (kN) is assumed conventionally to be equal to the product of mean hoop compressive stress on the winding (kN/mm²) and cross-sectional area of the lead exit (mm²). The thrust force might deform the winding by tightening it up with a screwing pattern. In the rare case that the low-voltage winding is an outer winding, the stress is of a tensile nature and the winding might show a tendency to unwind.

¹⁶ Allowable value means any force or stress value that the structure can withstand without being impaired in its strength and function; critical value means any force or stress value which causes any permanent deformation, loss of stability or collapse on the structure.

De telles valeurs peuvent être différentes pour différents fabricants. Dans ce but, l'utilisation du Tableau A.1 ou A.2 est recommandée. Toute valeur de force ou de contrainte concernant le transformateur en évaluation doit être intégrée dans la cellule correspondante dans les colonnes marquées «réelles» (réel). Toute valeur de force ou de contrainte admissible ou critique que le fabricant a adoptée comme règle générale de conception doit être intégrée dans la cellule appropriée dans les colonnes marquées «admissible» (admissible) ou «critique» (critique). La valeur de force ou de contrainte la plus élevée résultant des conditions de court-circuit considérées dans la conception doit être utilisée pour chaque enroulement physique et composants associés et pour l'ensemble de la structure, respectivement.

NOTE Dans le cas des transformateurs colonnes, une attention spécifique est attirée sur l'importance des contraintes de compression sur les enroulements. Les enroulements soumis à des contraintes circonférentielles de compression peuvent être endommagés en raison soit d'une flexion excessive des conducteurs entre des réglettes verticales consécutives (flambage forcé) soit en raison du dépassement d'un point d'équilibre correspondant à une forme stable conduisant à des déformations radiales importantes des conducteurs à un ou plusieurs endroits de la circonférence de l'enroulement (flambage libre).

Le flambage forcé se produit typiquement sur des enroulements fournis avec des supports relativement rigides sur leurs contours internes.

Le flambage libre est un mode de ruine plus commun, qui se produit soudainement dès que la valeur critique de contrainte circonférentielle de compression pour la structure est atteinte.

La détermination de la valeur critique de contrainte circonférentielle de compression pour le flambage libre est une tâche très complexe, en raison à la fois de la nature hétérogène des enroulements et de l'influence résultant des processus de fabrication.

Pour les raisons ci-dessus, aucune formule spécifique pour les contraintes critiques circonférentielles de compression sur des enroulements n'a été donnée.

Des informations complémentaires à propos du flambage et des autres aspects techniques en rapport à la tenue au court-circuit des transformateurs de puissance sont données dans la Brochure 209 du Cigré: « Les performances de court-circuit des Transformateurs de puissance » – Août 2002.

A la suite du contrôle, le transformateur est considéré comme étant capable de résister aux effets dynamiques du court-circuit à condition qu'aucune de ses valeurs de forces ou de contraintes remplies dans le Tableau A.1 ou A.2 ne dépasse la valeur de force ou de contrainte maximale admissible adoptée par le fabricant pour les besoins de conception et 0,8 fois la valeur de contrainte critique correspondante identifiée par le fabricant.

Les limites de forces et de contraintes admissibles qui sont données ci-dessous pour les besoins du guide sont basées sur l'expérience prenant en considération des conditions limites, telles que les propriétés des matériaux, les tolérances, les détails de conception mécaniques et le processus de fabrication. Néanmoins, ces limites ne doivent pas être considérées comme des limites normalisées et peuvent être dépassées dans la conception dans la mesure où le constructeur peut démontrer toute expérience solide et documentée avec des valeurs plus élevées.

a) Pour les transformateurs colonnes:

- contrainte moyenne circonférentielle de traction sur les enroulements de type disques et en hélice, et sur chaque couche individuel des enroulements de type multicouches¹⁷

$$\sigma_{t, act}^* \leq 0,9 \cdot R_{p0,2}$$

- contrainte moyenne circonférentielle de compression sur les enroulements de type disque, en hélice, et de type simple couche

- avec câbles continûment transposés non collés (CTCs)¹⁸ et multibrins

$$\sigma_{c, act}^* \leq 0,35 \cdot R_{p0,2}$$

¹⁷ La contrainte d'essai $R_{p0,2}$ est la contrainte de traction qui produit, lorsque la charge est encore appliquée, un allongement non proportionnel égal à 0,2 % de la longueur du calibre.

¹⁸ CTCs signifie Conducteurs Transposés de manière Continue.

For this purpose, the use of Table A.1 or Table A.2 is recommended. Any force or stress figure relating to the transformer on evaluation should be entered into the appropriate cell in the column marked “act.” (actual). Any corresponding allowable or critical force or stress figure that the manufacturer has adopted as a design rule should be entered into the appropriate cell in the columns marked “all.” (allowable) or “crit.” (critical). The highest force or stress value resulting from the short-circuit conditions considered in design should be used for each physical winding and associated components and for the whole structure, respectively.

NOTE In the case of core-type transformers, specific attention is drawn to the importance of hoop compressive stresses on the windings. Windings subjected to hoop compressive stresses may fail because of either inward over-bending of conductors in the spans between two consecutive supports (forced buckling) or loss of form stability resulting in heavy radial deformations of conductors at one or few locations on the winding circumference (free buckling).

Forced buckling typically occurs on windings provided with relatively stiff supports at their inner contour.

Free buckling is a more common pattern of collapse, which occurs suddenly as soon as the critical compressive stress value for the structure is attained.

Setting any critical compressive stress value for free buckling is a highly complex task, both because of the non-homogeneous nature of the windings and the influence resulting from the manufacturing processes.

For the reasons above, no specific formulas for critical hoop compressive stresses on windings have been given.

Additional information about buckling and other technical issues relating to the short-circuit capability of power transformers are given in Cigre Brochure 209, “The Short-circuit Performance of Power Transformers”, August 2002.

As a result of the check, the transformer is considered to be able to withstand the dynamic effects of short circuit on condition that none of its force or stress figures filled in Table A.1 or Table A.2 exceeds the corresponding maximum allowable force or stress figure adopted by the manufacturer for design purposes and 0,8 times the corresponding critical stress value identified by the manufacturer.

The allowable force and stress limits which are given below for the purpose of guidance are based on past experience, under due consideration of the boundary conditions, such as material properties, tolerances, mechanical design details and production processes. Nevertheless, they are not to be considered as standard limits and may be exceeded in the design on condition that the manufacturer can demonstrate any solid and documented experience with higher values.

a) With core-type transformers

- Mean hoop tensile stress on disc- and helical-type windings and on each individual layer of multi-layer-type windings ¹⁷

$$\sigma_{t, act}^* \leq 0,9 \cdot R_{p0,2}$$

- Mean hoop compressive stress on disc-, helical- and single-layer-type windings
 - with regular strands and non-bonded CTCs¹⁸

$$\sigma_{c, act}^* \leq 0,35 \cdot R_{p0,2}$$

¹⁷ The proof stress $R_{p0,2}$ is the tensile stress which produces, when the load is still applied, a non-proportional elongation equal to 0,2 % of the gauge length.

¹⁸ CTCs means continuously transposed conductors.

- avec des CTCs renforcés par de la résine et multibrins

$$\sigma_{c, act}^* \leq 0,6 \cdot R_{p0,2}$$
- contrainte équivalente moyenne circonférentielle de compression sur des enroulements de type multicouches
 - avec câbles CTCs non collés et multibrins

$$\sigma_{c, eq, act}^* \leq 0,35 \cdot R_{p0,2}$$
 - avec des CTCs renforcés par de la résine et multibrins

$$\sigma_{c, eq, act}^* \leq 0,6 \cdot R_{p0,2}$$
- contrainte due à la flexion radiale des conducteurs entre les réglettes verticales ou les espaceurs

$$\sigma_{br, act}^* \leq 0,9 \cdot R_{p0,2}$$
- contrainte due à la flexion axiale des conducteurs entre les cales radiales

$$\sigma_{ba, act}^* \leq 0,9 \cdot R_{p0,2}$$
- force de compression axiale maximale sur chaque enroulement physique en rapport avec le déversement latéral du conducteur¹⁹

$$F_{c, act}^* \leq 0,8 \cdot F_{tilt}^*$$
- contraintes de compression sur les cales radiales²⁰
 - en présence de papier couvrant des conducteurs

$$\sigma_{sp, act}^* \leq 80 \text{ MPa}$$
 - en présence d'émail pur recouvrant les conducteurs

$$\sigma_{sp, act}^* \leq 120 \text{ MPa}$$
- contraintes de compression sur l'isolation papier des conducteurs avec enroulements de type couche

$$\sigma_{pi, act}^* \leq 35 \text{ MPa}$$
- contrainte de compression sur les anneaux de cerclage d'extrémité en cartons (type bobiné)

$$\sigma_{er, act}^* \leq 40 \text{ MPa}$$
- contraintes de compression sur les anneaux d'extrémité en cartons (type empilés)

$$\sigma_{er, act}^* \leq 80 \text{ MPa}$$
- contraintes de compression sur anneaux communs de serrage en cartons ou sur les plateaux de serrage (si utilisé)

$$\sigma_{pr, act}^* \leq 80 \text{ MPa}$$
- les contraintes de traction dans les tirants (plaques de renforcement) du système de serrage²¹

$$\sigma_{rod}^* \leq R_{eL}$$

¹⁹ Pour F_{tilt}^* , voir la Note 2 à la fin de la présente annexe.

²⁰ Valable pour des cales faites en carton comprimé.

²¹ R_{eL} est la contrainte de rupture la plus faible du matériau, pratiquement égale à $R_{p0,2}$.

- with resin-bonded strands and CTCs

$$\sigma_{c, act}^* \leq 0,6 \cdot R_{p0,2}$$
- Equivalent mean hoop compressive stress on multi-layer-type windings
 - with regular strands and non-bonded CTCs

$$\sigma_{c, eq, act}^* \leq 0,35 \cdot R_{p0,2}$$
 - with resin-bonded strands and CTCs

$$\sigma_{c, eq, act}^* \leq 0,6 \cdot R_{p0,2}$$
- Stress due to radial bending on conductors in the span between axial sticks or spacers

$$\sigma_{br, act}^* \leq 0,9 \cdot R_{p0,2}$$
- Stress due to axial bending on conductors in the span between radial spacers

$$\sigma_{ba, act}^* \leq 0,9 \cdot R_{p0,2}$$
- Max. axial compression force on each physical winding in relation to conductor tilting¹⁹

$$F_{c, act}^* \leq 0,8 \cdot F_{tilt}^*$$
- Compressive stress on radial spacers²⁰
 - in the presence of paper covering on conductors

$$\sigma_{sp, act}^* \leq 80 \text{ MPa}$$
 - in the presence of pure enamel coating on conductors

$$\sigma_{sp, act}^* \leq 120 \text{ MPa}$$
- Compressive stress on conductor paper insulation with layer-type windings

$$\sigma_{pi, act}^* \leq 35 \text{ MPa}$$
- Compressive stress on pressboard end rings (wound-type)

$$\sigma_{er, act}^* \leq 40 \text{ MPa}$$
- Compressive stress on pressboard end rings (stacked-type)

$$\sigma_{er, act}^* \leq 80 \text{ MPa}$$
- Compressive stress on pressboard common press rings or press plates (if used)

$$\sigma_{pr, act}^* \leq 80 \text{ MPa}$$
- Tensile stress on tie rods (flitch plates) of the clamping structure²¹

$$\sigma_{rod}^* \leq R_{eL}$$

¹⁹ For F_{tilt}^* see Note 2 at the end of this annex.

²⁰ Valid for spacers made of pre-compressed pressboard.

²¹ R_{eL} is the lower yield stress of the material, practically equal to $R_{p0,2}$.

b) Pour les transformateurs cuirassés:

- contrainte due à la flexion axiale des conducteurs entre les cales entre bobines

$$\sigma_{ba, act}^* \leq 0,9 \cdot R_{p0,2}$$
- contraintes de compression sur l'isolation papier des conducteurs et sur les cales

$$\sigma_{pi, act}^* \sigma_{sp, act}^* \leq 35 \text{ MPa}$$
- contraintes de compression sur les cales entre phases et sur les cales faites en carton

$$\sigma_{iw, act}^* \sigma_{pb, act}^* \leq 80 \text{ MPa}$$
- contraintes de compression sur les cales de coin entre phases et sur les cales de pression faites en plastiques renforcés de fibres ou en bois lamifié

$$\sigma_{iw, act}^* \sigma_{pb, act}^* \leq 120 \text{ MPa}$$
- contrainte de traction et de flexion sur les tôles du circuit magnétique

$$\sigma_{cl, act}^* \leq R_{eL}$$
- contrainte de traction et de flexion sur structures de renforcement de cuve

$$\sigma_{tr, act}^* \leq R_{eL}$$
- Pression sur les zones de recouvrement des tôles magnétiques²²

$$P_{act} \geq P$$

A.3.4 Résultat de la revue de conception et connaissance du transformateur en évaluation

Le résultat de la revue de conception est positif si:

- les exigences de spécifications ont été vérifiées pour couvrir dûment les conditions réelles du système électrique;
- la conception couvre entièrement la spécification;
- la revue de conception a été réalisée selon A.3.1/A.3.2 pour identifier toutes les forces et contraintes résultantes;
- l'évaluation du transformateur à l'étude a été réalisée selon A.3.3.2 ou A.3.3.3 et la conformité avec les critères sur les forces de court-circuit et les critères sur les contraintes énumérés dans la présente annexe se déduit de façon évidente à partir du contenu du Tableau A.1 ou du Tableau A.2;
- la conception mécanique et le processus de production/de fabrication ont été jugés satisfaisant pour fournir le comportement au court-circuit requis du transformateur.

L'acheteur est prié de reconnaître formellement que la revue de conception du transformateur a été effectuée positivement en suivant les directives décrites dans la présente Annexe. A la lumière de ce qui précède, un rapport approprié convient d'être signé conjointement par l'acheteur et le fabricant.

La signature de l'acheteur n'exempte pas le fabricant de ses engagements à l'égard de l'absence de non-conformité et de la capacité du transformateur en question à résister aux effets dynamiques de court-circuit en rapport avec les exigences en service spécifiées.

Les informations communiquées à l'acheteur à l'occasion de la revue de conception demeurent la propriété intellectuelle du fabricant et doivent rester confidentielles.

²²⁾ Pour P, voir la note 3 à la fin de la présente annexe.

b) With shell-type transformers

- Stress due to axial bending on conductors in the span between coil spacers

$$\sigma_{ba, act}^* \leq 0,9 \cdot R_{p0,2}$$

- Compressive stress on conductor paper insulation and spacers

$$\sigma_{pi, act}^* \sigma_{sp, act}^* \leq 35 \text{ MPa}$$

- Compressive stress on inter-phase wedges and press blocks made of pressboard

$$\sigma_{iw, act}^* \sigma_{pb, act}^* \leq 80 \text{ MPa}$$

- Compressive stress on inter-phase wedges and press blocks made of fibre reinforced plastics or laminated wood

$$\sigma_{iw, act}^* \sigma_{pb, act}^* \leq 120 \text{ MPa}$$

- Tensile and bending stress on core laminations

$$\sigma_{cl, act}^* \leq R_{eL}$$

- Tensile and bending stress on tank reinforcement structures

$$\sigma_{tr, act}^* \leq R_{eL}$$

- Pressure on the areas of the overlap of the laminations²²

$$P_{act} \geq P$$

A.3.4 Result of the design review and acknowledgement of the transformer under evaluation

The result of the design review is positive if

- the requirements of the specification have been checked to duly cover the actual system conditions;
- the design fully covers the specification;
- the design review has been performed according to A.3.1/A.3.2 to identify all the resultant forces and stresses;
- the evaluation of the transformer under consideration has been performed according to A.3.3.2 or A.3.3.3 and the compliance with the short-circuit force and stress criteria listed in this Annex is evident from the content of Table A.1 or Table A.2;
- the mechanical design and production/manufacturing processes have been judged to adequately provide the required short-circuit performance of the transformer.

The purchaser is requested to formally acknowledge that the design review of the transformer has been carried out with positive result by following the guidelines described in this annex. In this light, an appropriate statement should be signed jointly by the purchaser and the manufacturer.

The purchaser's signature does not exempt the manufacturer from any of his obligations as regards absence of non-conformities and the ability of the transformer in question to withstand the dynamic effects of short circuit in connection with the service duty requirements specified.

The information released to the purchaser in the occasion of the design review remains the manufacturer's intellectual property and should be kept confidential.

²² For P see Note 3 at the end of this annex.

Tableau A.1 – Comparaison des forces et les contraintes dans les transformateurs colonnes

Type de force/contrainte	Enroulement basse tension				Enroulement moyenne tension				Enroulement haute tension				Enroulement de prise			
	réel	réf	admissible	critique	réel	réf	admissible	critique	réel	réf	admissible	critique	réel	réf	admissible	critique
Contrainte moyenne circonférentielle de traction sur les enroulements de type à disque, en hélice et de type couche (MPa)																
Contrainte moyenne circonférentielle de compression sur les enroulements de type disque, en hélice, et de type simple couche (MPa)																
Contrainte équivalente moyenne circonférentielle de compression sur des enroulements de type multicouches (MPa)																
Contrainte due à la flexion radiale des conducteurs entre les réglettes verticales et les espaceurs (MPa)																
Contrainte due à la flexion axiale des conducteurs entre les cales radiales (MPa)																
Effort de poussée qui agit sur les câbles de sortie d'enroulement basse tension (kN)																
Force de compression axiale maximale sur chaque enroulement physique (kN)																

Table A.1 – Comparison of forces and stresses in core-type transformers

Type of force/stress	LV winding				MV winding				HV winding				Tap winding			
	act.	ref.	all.	crit.	act.	ref.	all.	crit.	act.	ref.	all.	crit.	act.	ref.	all.	crit.
Mean hoop tensile stress on disc-, helical- and layer-type windings (MPa)																
Mean hoop compressive stress on disc, helical, single layer type windings (MPa)																
Equivalent mean hoop compressive stress on multi-layer-type windings (MPa)																
Stress due to radial bending of conductors between axial sticks and spacers (MPa)																
Stress due to axial bending of conductors between radial spacers (MPa)																
Thrust force acting on the low-voltage winding lead exits (kN)																
Maximum axial compression force on each physical winding (kN)																

Tableau A.1 (suite)

Type de force/contrainte	Enroulement basse tension				Enroulement moyenne tension				Enroulement haute tension				Enroulement de prise			
	réel	réf	admissible	critique	réel	réf	admissible	critique	réel	réf	admissible	critique	réel	réf	admissible	critique
Force de compression axiale maximale sur enroulement comparée à la force critique pour le déversement latéral (kN)																
Force de poussée maximale en extrémité de enroulement physique - vers le haut (kN) - vers le bas (kN)																
Contrainte de compression sur l'isolation papier des conducteurs et sur les cales radiales (MPa)																
Contrainte de compression sur structures d'isolation empilées d'extrémité et sur les anneaux de cerclage d'extrémité (MPa)																
Contraintes de compression sur les anneaux communs de serrage (ou plateaux) (MPa)	réel				réf				admissible				critique			
Contraintes de traction dans les tirants (plaques de renforcement) (MPa)	réel				réf				admissible				critique			
Force de serrage par colonne (kN)	réel				réf				admissible							
<p>réel = valeur de force ou de contrainte calculée concernant le transformateur à l'étude. réf = valeur de force ou de contrainte calculée concernant le transformateur de référence. admissible = valeur de force ou de contrainte admissible (basée sur les règles de conception du fabricant). critique = valeur de force ou de contrainte critique (basée sur les règles de conception du fabricant).</p>																

Table A.1 (continued)

Type of force/stress	LV winding				MV winding				HV winding				Tap winding			
	act.	ref.	all.	crit.	act.	ref.	all.	crit.	act.	ref.	all.	crit.	act.	ref.	all.	crit.
Maximum axial compression force on winding compared to crit. force for tilting (kN)																
Maximum end thrust force on physical winding: – up (kN) – down (kN)																
Compressive stress on conductor paper insulation and radial spacers (MPa)																
Compressive stress on end stack insulation structures and end ring (MPa)																
Compressive stress on common press rings (or plates) (MPa)	act.				ref.				all.				crit.			
Tensile stress on tie rods (flich plates) (MPa)	act.				ref.				all.				crit.			
Clamping force per limb (kN)	act.				ref.				all.							
<p>act. = calculated force or stress value relating to the transformer under consideration.</p> <p>ref. = calculated force or stress value relating to the reference transformer.</p> <p>all. = allowable force or stress value (based on manufacturer's design rules).</p> <p>crit. = critical force or stress value (based on manufacturer's design rules).</p>																

Tableau A.2 – Comparaison des forces et des contraintes dans les transformateurs cuirassés

Type de force/contrainte	Enroulement basse tension				Enroulement moyenne tension				Enroulement haute tension				Enroulement de prise			
	réel	réf	admissible	critique	réel	réf	admissible	critique	réel	réf	admissible	critique	réel	réf	admissible	critique
Contrainte due à la flexion axiale des conducteurs entre les cales entre bobines (MPa)																
Contrainte de compression sur l'isolation papier des conducteurs et sur cales (MPa)																
Force totale sur les cales entre phases et les cales (kN)	réel				réf				admissible				critique			
Force totale sur les tôles du noyau magnétique (kN)	réel				réf				admissible				critique			
Force totale sur les structures de renforcement de cuve (kN)	réel				réf				admissible				critique			
Contraintes de compression sur les cales de coin entre phases et les blocs de pression (MPa)	réel				réf				admissible				critique			
Contrainte de traction / de flexion sur des tôles de noyau magnétique due aux forces radiales (MPa)	réel				réf				admissible				critique			
Contrainte de traction / de flexion sur structure de renforcement de cuve due aux forces axiales (MPa)	réel				réf				admissible				critique			
Pression sur les zones de recouvrement des tôles magnétiques (MPa)	réel				réf				admissible				critique			
réel =	valeur de force ou de contrainte calculée concernant le transformateur à l'étude.															
réf =	valeur de force ou de contrainte calculée concernant le transformateur de référence.															
admissible =	valeur de force ou de contrainte admissible (basée sur les règles de conception du fabricant).															
critique =	valeur de force ou de contrainte critique (basée sur les règles de conception du fabricant).															

Table A.2 – Comparison of forces and stresses in shell-type transformers

Type of force / stress	LV winding				MV winding				HV winding				Tap winding			
	act.	ref.	all.	crit.	act.	ref.	all.	crit.	act.	ref.	all.	crit.	act.	ref.	all.	crit.
Stress due to axial bending on conductors in the span between coil spacers (MPa)																
Compressive stress on conductor paper insulation and spacer (MPa)																
Total force on inter-phase wedges and press blocks (kN)	act.				ref.				all.				crit.			
Total force on core laminations (kN)	act.				ref.				all.				crit.			
Total force on tank reinforcement structure (kN)	act.				ref.				all.				crit.			
Compressive stress on inter-phase wedges and press blocks (MPa)	act.				ref.				all.				crit.			
Tensile / bending stress on core laminations due to radial forces (MPa)	act.				ref.				all.				crit.			
Tensile / bending stress on tank reinforcement structure due to axial forces (MPa)	act.				ref.				all.				crit.			
Pressure on the areas of the overlap of the laminations (MPa)	act.				ref.				all.				crit.			
act. = calculated force or stress value relating to the transformer under consideration. ref. = calculated force or stress value relating to the reference transformer. all. = allowable force or stress value (based on manufacturer's design rules). crit. = critical force or stress value (based on manufacturer's design rules).																

NOTE 1 Le symbole * (sommet) a été utilisé dans la présente annexe pour désigner une quantité physique (force ou contrainte) qui relie à une condition de crête maximale d'un éventuel courant de court-circuit.

NOTE 2 Avec les transformateurs colonnes, lorsqu'un enroulement physique est soumis à une force de compression axiale excessive il peut perdre ses capacités à rester mécaniquement stable. Dans ce cas, les conducteurs d'enroulement «s'inclinent»: l'ensemble des conducteurs adjacents à l'intérieur de la largeur radiale de l'enroulement tournent dans la même direction, alors que l'ensemble suivant de conducteurs adjacent par rapport à l'axe tourne dans le sens opposé. Le résultat est un modèle de déformation en zigzag assuré par les conducteurs d'enroulement.

Il est donc nécessaire que la force de compression axiale maximale F^*_c qui agit sur l'enroulement soit inférieure à la force critique F^*_{tilt} qui déclenche un effondrement de conducteur par déversement latéral. Il doit également exister une marge de sécurité adéquate entre les deux.

On doit distinguer deux cas:

- a) enroulements de type disque, en hélice ou couches ayant des conducteurs composés de conducteurs transposés de manière continue (CTCs) renforcés par résine, il n'y a aucune contrainte de conception en ce qui concerne la force de compression axiale maximale en relation avec le déversement latéral. En fait, de tels conducteurs sont extrêmement résistants au déversement latéral, indépendamment du degré de dureté du matériau cuivre. Aucun contrôle n'est donc demandé.
- b) enroulements type disque, en hélice ou en couche ayant des conducteurs composés de conducteurs transposés de manière continue (CTCs) normaux ou non collés, il convient de calculer la force critique correspondante pour le F^*_{tilt} de déversement latéral sur la base de l'équation suivante:

$$F^*_{\text{tilt}} = \left[K_1 \cdot E_0 \cdot \frac{n \cdot b_{\text{eq}} \cdot h^2}{D_{\text{mw}}} + K_2 \cdot \frac{n \cdot X \cdot b_{\text{eq}}^3 \cdot \pi \cdot D_{\text{mw}} \cdot \gamma}{h} \right] \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot 10^{-3} \quad (\text{kN})$$

où

E_0 est le module de Young du cuivre = de $1,1 \cdot 10^5$ MPa;

n est le nombre de brins ou de conducteurs doubles dans la largeur radiale de la spire, en cas de conducteurs plats,
et est égal à $g \cdot (f - 1)/2$ dans le cas d'un conducteur transposé de manière continue.

où

g est le nombre de conducteurs transposé de manière continue dans la largeur radiale d'une spire;

f est le nombre de brins dans un CTC simple;

b_{eq} est la largeur radiale du brin dans le cas de conducteurs plat (mm);

est deux fois la largeur radiale d'un conducteur simple dans le cas de conducteurs doubles reliés par résine (mm);

est la largeur radiale d'un brin unique dans le cas d'un conducteur transposé de manière continue non relié (mm);

D_{mw} est le diamètre moyen de l'enroulement (en mm);

$X = \frac{c \cdot z}{\pi \cdot D_{\text{mw}}}$ est le facteur de couverture de cale pour enroulements de type disques et en hélice

où

c est la largeur circonférentielle des cales radiales (dans la direction circulaire) (en mm);

z est le nombre de cales radiales sur la circonférence;

$X =$ 1,0 pour les enroulements de type couche;

h est la hauteur de brin si le conducteur est un conducteur plat (en mm);

est égal à deux fois la hauteur d'un brin unifilaire s'il y a deux brins parallèles dans la direction axiale qui sont recouverts ensemble du papier de guipage (en mm);

est la hauteur d'un brin unifilaire si le conducteur est un conducteur transposé de manière continue CTC (mm);

γ est la constante pour la forme de conducteur;

= 1,0 pour un rayon de courbure d'un brin normal;

= 0,85 pour les brins ou les conducteurs entièrement arrondis;

K_1 est le coefficient pour le terme de torsion = 0,5;

K_2 est le coefficient pour le terme de transposition (N/mm³);

= 45 pour les conducteurs simples et doubles;

= 22 pour le conducteur transposé de manière continue non relié;

K_3 est le facteur pris en compte pour le degré de dureté du cuivre (voir Tableau A.3);

K_4 est le facteur pris en compte pour le basculement dynamique (voir Tableau A.4).

NOTE 1 Symbol * (apex) has been used in this annex to denote a physical quantity (force or stress) that relates to a condition of maximum peak of prospective short-circuit current.

NOTE 2 With core-type transformers, when a physical winding is subject to an excessive axial compression force, it may lose its capability to remain mechanically stable. In this case, the winding conductors "tilt": the whole set of adjacent conductors inside the radial width of the winding turn in the same direction, whereas the next axially adjacent set of conductors turns in the opposite direction. The result is a zigzag deformation pattern assumed by the winding conductors.

It is, therefore, required that the maximum axial compression force F_c^* acting on the winding be less than the critical force F_{tilt}^* that triggers a collapse by conductor tilting. There should also be an adequate safety margin between the two.

One has to distinguish between two cases:

- with disc-, helical- and layer-type windings having conductors consisting of resin-bonded CTCs, there is no design constraint as regards the maximum axial compression force in relation with tilting. In fact, such conductors are extremely resistant to tilting, irrespective of the work hardening degree of the copper material. No check is therefore required;
- with disc-, helical- and layer-type windings having conductors consisting of strands or non-bonded CTCs, the corresponding critical force for tilting F_{tilt}^* should be calculated on the basis of the following equation:

$$F_{\text{tilt}}^* = \left[K_1 \cdot E_0 \cdot \frac{n \cdot b_{\text{eq}} \cdot h^2}{D_{\text{mw}}} + K_2 \cdot \frac{n \cdot X \cdot b_{\text{eq}}^3 \cdot \pi \cdot D_{\text{mw}} \cdot \gamma}{h} \right] \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot 10^{-3} \quad (\text{kN})$$

where

E_0 is the modulus of the elasticity of copper = $1,1 \times 10^5$ MPa;

n is the number of strands or twin conductors in the winding radial width, in the case of flat conductors, and is equal to $g \cdot (f - 1)/2$ in the case of a CTC;

where

g is the number of CTCs in the winding radial width;

f is the number of strands in a single CTC;

b_{eq} is the radial width of the strand in the case of flat conductors (in mm);

is twice the radial width of a single conductor in the case of resin-bonded twin conductors (in mm);

is the radial width of a single strand in the case of non-bonded CTC (in mm);

D_{mw} is the average diameter of the winding (in mm);

$X = \frac{c \cdot z}{\pi \cdot D_{\text{mw}}}$ is the spacer coverage factor for disc- and helical-type windings

where

c is the radial spacer width (in the circumferential direction) (in mm);

z is the number of radial spacers on the circumference;

X is 1,0 for layer-type windings;

h is the strand height if the conductor is a flat conductor (in mm);

is twice the height of a single strand if there are two parallel strands in the axial direction which are paper covered together (in mm);

is the height of a single strand if the conductor is a CTC (in mm);

γ is the constant for conductor shape;

is 1,0 for standard strand corner radius;

is 0,85 for fully rounded strands or conductors;

K_1 is the coefficient for the twisting term = 0,5;

K_2 is the coefficient for the bedding term (N/mm³);

is 45 for single and twin conductors;

is 22 for non-bonded CTC;

K_3 is the factor accounting for the copper work hardening degree (see Table A.3);

K_4 is the factor accounting for dynamic tilting (see Table A.4).

Tableau A.3 — Valeurs pour le facteur K_3

$R_{p0,2}$ MPa	K_3
Recuit	1,0
150	1,1
180	1,2
230	1,3
>230	1,4

Tableau A.4 — Valeurs pour le facteur K_4

Type de conducteur	Type d'enroulement	
	A disque, en hélice	En couche
Brin ou double	1,2	1,1
Conducteur transposé de manière continue non collé	1,7	1,3

On doit noter que l'équation ci-dessus pour calculer F_{tilt}^* renvoie au basculement dynamique et est basée sur une approche semi-empirique. La valeur critique réelle de la force dépend également de la construction de l'enroulement, de la nature et de l'épaisseur de l'isolation du conducteur.

NOTE 3 Il convient que la pression P qu'il est nécessaire d'appliquer sur les zones de recouvrement des tôles afin de tenir le circuit magnétique soit d'au moins:

$$P = \frac{F^* \cdot 10^3}{2 \cdot S \cdot a \cdot t \cdot h} \quad [\text{MPa}]$$

où

F^* est la force de court-circuit (valeur de crête) exercée sur la culasse d'extrémité (kN);

S est la zone de recouvrement arrondie des tôles magnétiques (mm²);

a est le facteur de frottement (p.u.);

t est le nombre de feuilles du noyau magnétique par unité de hauteur (mm⁻¹);

h est la hauteur du circuit magnétique (mm).

Table A.3 – Values for factor K_3

$R_{p0,2}$ MPa	K_3
Annealed	1,0
150	1,1
180	1,2
230	1,3
>230	1,4

Table A.4 – Values for factor K_4

Conductor type	Winding type	
	Disc-helical	Layer
Strand or twin	1,2	1,1
Non-bonded CTC	1,7	1,3

It should be noted that the above equation to calculate F_{tilt}^* refers to dynamic tilting and is based on a semi-empirical approach. The actual critical value of the force also depends on the winding construction and the nature and thickness of the conductor insulation.

NOTE 3 The pressure P which is necessary to apply on the areas of the overlap of the core laminations in order to hold the magnetic circuit should be at least

$$P = \frac{F^* \cdot 10^3}{2 \cdot S \cdot a \cdot t \cdot h} \quad (\text{MPa})$$

where

F^* is the short-circuit force (peak value) exerted onto the end yoke (kN);

S is the area of the corner overlap of the core laminations (mm²);

a is the adherence factor (p.u.);

t is the number of sheets of core laminations per unit of height (mm⁻¹);

h is the height of the magnetic circuit (mm).

Annexe B (informative)

Définition de transformateur similaire

Un transformateur est considéré similaire à un autre transformateur pris comme référence s'il a en commun avec ce dernier les caractéristiques suivantes:

- le même type d'application, par exemple transformateur élévateur de production, transformateur de distribution ou transformateur d'interconnexion;
 - conception identique, par exemple de type sec, de type immergé dans l'huile, de type colonne avec enroulements concentriques, de type alterné, de type cuirassé, à enroulements cylindriques ou non;
 - même disposition et arrangement géométrique des principaux enroulements;
 - même type de conducteurs d'enroulement, par exemple, aluminium, alliage d'aluminium, cuivre recuit ou cuivre durci, bande métallique, fil, conducteur méplat, conducteurs transposés en continu et renforcés époxy, si utilisé;
 - même type d'enroulements principaux, par exemple, en hélice, à disque, de type couche, à galettes alternées;
 - puissance absorbée en court-circuit (puissance assignée/ par unité d'impédance de court-circuit) entre 30 % et 130 % de celle du transformateur de référence;
 - forces axiales et contraintes d'enroulement se produisant en court-circuit n'excédant pas 120 % de celles du transformateur de référence;
 - même procédé de fabrication;
 - même disposition de serrage et de support d'enroulement.
-

Annex B (informative)

Definition of similar transformer

A transformer is considered similar to another transformer taken as a reference if it has the following characteristics in common with the latter:

- same type of operation, for example generator step-up unit, distribution, interconnection transformer;
 - same conceptual design, for example dry type, oil-immersed type, core type with concentric windings, sandwich type, shell type, circular coils, non-circular coils;
 - same arrangement and geometrical sequence of the main windings;
 - same type of winding conductors, for example aluminium, aluminium alloy, annealed or work-hardened copper, metal foil, wire, flat conductor, continuously transposed conductors and epoxy bonding, if used;
 - same type of main windings, for example helical-, disc-, layer-type, pancake coils;
 - absorbed power at short circuit (rated power/per unit short-circuit impedance) between 30 % and 130 % of that relating to the reference transformer;
 - axial forces and winding stresses occurring at short circuit not exceeding 120 % of those relating to the reference transformer;
 - same manufacturing processes;
 - same clamping and winding support arrangement.
-

LICENSED TO MECON Limited. - RANCHI/BANGALORE
FOR INTERNAL USE AT THIS LOCATION ONLY, SUPPLIED BY BOOK SUPPLY BUREAU.



Standards Survey

The IEC would like to offer you the best quality standards possible. To make sure that we continue to meet your needs, your feedback is essential. Would you please take a minute to answer the questions overleaf and fax them to us at +41 22 919 03 00 or mail them to the address below. Thank you!

Customer Service Centre (CSC)

International Electrotechnical Commission

3, rue de Varembé
1211 Genève 20
Switzerland

or

Fax to: **IEC/CSC** at +41 22 919 03 00

Thank you for your contribution to the standards-making process.

A Prioritaire

Nicht frankieren
Ne pas affranchir



Non affrancare
No stamp required

RÉPONSE PAYÉE

SUISSE

Customer Service Centre (CSC)
International Electrotechnical Commission
3, rue de Varembé
1211 GENEVA 20
Switzerland



Q1 Please report on **ONE STANDARD** and **ONE STANDARD ONLY**. Enter the exact number of the standard: (e.g. 60601-1-1)

.....

Q2 Please tell us in what capacity(ies) you bought the standard (tick all that apply). I am the/a:

- purchasing agent
- librarian
- researcher
- design engineer
- safety engineer
- testing engineer
- marketing specialist
- other.....

Q3 I work for/in/as a: (tick all that apply)

- manufacturing
- consultant
- government
- test/certification facility
- public utility
- education
- military
- other.....

Q4 This standard will be used for: (tick all that apply)

- general reference
- product research
- product design/development
- specifications
- tenders
- quality assessment
- certification
- technical documentation
- thesis
- manufacturing
- other.....

Q5 This standard meets my needs: (tick one)

- not at all
- nearly
- fairly well
- exactly

Q6 If you ticked NOT AT ALL in Question 5 the reason is: (tick all that apply)

- standard is out of date
- standard is incomplete
- standard is too academic
- standard is too superficial
- title is misleading
- I made the wrong choice
- other

Q7 Please assess the standard in the following categories, using the numbers:

- (1) unacceptable,
- (2) below average,
- (3) average,
- (4) above average,
- (5) exceptional,
- (6) not applicable

- timeliness.....
- quality of writing.....
- technical contents.....
- logic of arrangement of contents
- tables, charts, graphs, figures.....
- other

Q8 I read/use the: (tick one)

- French text only
- English text only
- both English and French texts

Q9 Please share any comment on any aspect of the IEC that you would like us to know:

.....





Enquête sur les normes

La CEI ambitionne de vous offrir les meilleures normes possibles. Pour nous assurer que nous continuons à répondre à votre attente, nous avons besoin de quelques renseignements de votre part. Nous vous demandons simplement de consacrer un instant pour répondre au questionnaire ci-après et de nous le retourner par fax au +41 22 919 03 00 ou par courrier à l'adresse ci-dessous. Merci !

Centre du Service Clientèle (CSC)

Commission Electrotechnique Internationale

3, rue de Varembe
1211 Genève 20
Suisse

ou

Télécopie: **CEI/CSC** +41 22 919 03 00

Nous vous remercions de la contribution que vous voudrez bien apporter ainsi à la Normalisation Internationale.

A Prioritaire

Nicht frankieren
Ne pas affranchir



Non affrancare
No stamp required

RÉPONSE PAYÉE

SUISSE

Centre du Service Clientèle (CSC)
Commission Electrotechnique Internationale
3, rue de Varembe
1211 GENÈVE 20
Suisse



Q1 Veuillez ne mentionner qu'**UNE SEULE NORME** et indiquer son numéro exact:
(ex. 60601-1-1)
.....

Q2 En tant qu'acheteur de cette norme, quelle est votre fonction?
(cochez tout ce qui convient)
Je suis le/un:

- agent d'un service d'achat
- bibliothécaire
- chercheur
- ingénieur concepteur
- ingénieur sécurité
- ingénieur d'essais
- spécialiste en marketing
- autre(s).....

Q3 Je travaille:
(cochez tout ce qui convient)

- dans l'industrie
- comme consultant
- pour un gouvernement
- pour un organisme d'essais/
certification
- dans un service public
- dans l'enseignement
- comme militaire
- autre(s).....

Q4 Cette norme sera utilisée pour/comme
(cochez tout ce qui convient)

- ouvrage de référence
- une recherche de produit
- une étude/développement de produit
- des spécifications
- des soumissions
- une évaluation de la qualité
- une certification
- une documentation technique
- une thèse
- la fabrication
- autre(s).....

Q5 Cette norme répond-elle à vos besoins:
(une seule réponse)

- pas du tout
- à peu près
- assez bien
- parfaitement

Q6 Si vous avez répondu PAS DU TOUT à Q5, c'est pour la/les raison(s) suivantes:
(cochez tout ce qui convient)

- la norme a besoin d'être révisée
- la norme est incomplète
- la norme est trop théorique
- la norme est trop superficielle
- le titre est équivoque
- je n'ai pas fait le bon choix
- autre(s)

Q7 Veuillez évaluer chacun des critères ci-dessous en utilisant les chiffres
(1) inacceptable,
(2) au-dessous de la moyenne,
(3) moyen,
(4) au-dessus de la moyenne,
(5) exceptionnel,
(6) sans objet

- publication en temps opportun
- qualité de la rédaction.....
- contenu technique
- disposition logique du contenu
- tableaux, diagrammes, graphiques,
figures
- autre(s)

Q8 Je lis/utilise: (une seule réponse)

- uniquement le texte français
- uniquement le texte anglais
- les textes anglais et français

Q9 Veuillez nous faire part de vos observations éventuelles sur la CEI:

.....
.....
.....
.....
.....
.....



LICENSED TO MECON Limited. - RANCHI/BANGALORE
FOR INTERNAL USE AT THIS LOCATION ONLY, SUPPLIED BY BOOK SUPPLY BUREAU.

ISBN 2-8318-8466-7



9 782831 884660

ICS 29.180
