

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

60076-5

Deuxième édition
Second edition
2000-07

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 60076-5:2000

Numéros des publications

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

Publications consolidées

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

Validité de la présente publication

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

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

Les renseignements relatifs à des questions à l'étude et des travaux en cours entrepris par le comité technique qui a établi cette publication, ainsi que la liste des publications établies, se trouvent dans les documents ci-dessous:

- «Site web» de la CEI*
- **Catalogue des publications de la CEI**
Publié annuellement et mis à jour régulièrement
(Catalogue en ligne)*
- **Bulletin de la CEI**
Disponible à la fois au «site web» de la CEI* et comme périodique imprimé

Terminologie, symboles graphiques et littéraux

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

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

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

Numbering

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

Consolidated publications

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

Validity of this publication

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

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

Information on the 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 to be found at the following IEC sources:

- **IEC web site***
- **Catalogue of IEC publications**
Published yearly with regular updates
(On-line catalogue)*
- **IEC Bulletin**
Available both at the IEC web site* and as a printed periodical

Terminology, graphical and letter symbols

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

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

* See web site address on title page.

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

60076-5

Deuxième édition
Second edition
2000-07

Transformateurs de puissance –

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

Power transformers –

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

© IEC 2000 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

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

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

International Electrotechnical Commission
Telefax: +41 22 919 0300

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



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

S

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

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	4
Articles	
1 Domaine d'application	8
2 Références normatives	8
3 Prescriptions 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 mécanique au court-circuit	22
Annexe A (informative) Guide pour l'identification d'un transformateur similaire	40
Annexe B (normative) Méthode de calcul pour la démonstration de la tenue aux effets dynamiques du court-circuit	42
Figure 1 – Transformateur connecté étoile-triangle	28
Figure 2 – Autotransformateur étoile-étoile	30
Tableau 1 – Valeurs minimales caractéristiques d'impédances de court-circuit de 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

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
Clause	
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) Guidance for the identification of a similar transformer	41
Annex B (normative) Calculation method for the demonstration of the ability to withstand the dynamic effects of short circuit	43
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

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE –

Partie 5: Tenue au court-circuit

AVANT-PROPOS

- 1) La CEI (Commission Électrotechnique Internationale) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI, entre autres activités, publie des Normes internationales. Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les documents produits se présentent sous la forme de recommandations internationales. Ils sont publiés comme normes, spécifications techniques, rapports techniques ou guides et agréés comme tels par les Comités nationaux.
- 4) Dans le but d'encourager l'unification internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent à appliquer de façon transparente, dans toute la mesure possible, les Normes internationales de la CEI dans leurs normes nationales et régionales. Toute divergence entre la norme de la CEI et la norme nationale ou régionale correspondante doit être indiquée en termes clairs dans cette dernière.
- 5) La CEI n'a fixé aucune procédure concernant le marquage comme indication d'approbation et sa responsabilité n'est pas engagée quand un matériel est déclaré conforme à l'une de ses normes.
- 6) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Norme internationale peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 60076-5 a été établie par le comité d'études 14 de la CEI: Transformateurs de puissance.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition parue en 1976 et l'amendement 2 (1994). Cette deuxième édition constitue une révision technique.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
14/346/FDIS	14/353/RVD

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

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

L'annexe A est donnée uniquement à titre d'information.

L'annexe B fait partie intégrante de cette norme.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

POWER TRANSFORMERS –

Part 5: Ability to withstand short circuit

FOREWORD

- 1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, the IEC publishes International Standards. Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. The IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested National Committees.
- 3) The documents produced have the form of recommendations for international use and are published in the form of standards, technical specifications, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.
- 5) The IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with one of its standards.
- 6) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this International Standard may be the subject of patent rights. The IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

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

This second edition cancels and replaces the first edition published in 1976 and amendment 2 (1994). This second edition constitutes a technical revision.

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

FDIS	Report on voting
14/346/FDIS	14/353/RVD

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

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

Annex A is for information only.

Annex B forms an integral part of this standard.

Le comité a décidé que cette publication reste valable jusqu'en 2004. A cette date, selon décision préalable du comité, la publication sera

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

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60076-5:2000

Withdrawn

The committee has decided that this publication remains valid until 2004. At this date, in accordance with the committee's decision, the publication will be

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

Withdrawn
IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60076-5:2000

TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE –

Partie 5: Tenue au court-circuit

1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 60076 définit les prescriptions pour que les transformateurs de puissance supportent sans dommage les 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 utilisés pour démontrer son aptitude à résister aux effets mécaniques afférents. Les prescriptions s'appliquent aux transformateurs définis dans le domaine d'application de la CEI 60076-1.

2 Références normatives

Les documents normatifs suivants contiennent des dispositions qui, par suite de la référence qui y est faite, constituent des dispositions valables pour la présente partie de la CEI 60076. Pour les références datées, les amendements ultérieurs ou les révisions de ces publications ne s'appliquent pas. Toutefois, les parties prenantes aux accords fondés sur la présente partie de la CEI 60076 sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des documents normatifs indiqués ci-après. Pour les références non datées, la dernière édition du document normatif en référence s'applique. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des Normes internationales en vigueur.

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

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

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

3 Prescriptions 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 dans les enroulements correspondant à ces conditions sont appelés dans cette partie de la CEI 60076 «surintensités».

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 calculation method used to demonstrate its 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 normative documents contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this part of IEC 60076. For dated references, subsequent amendments to, or revisions of, any of these publications do not apply. However, parties to agreements based on this part of IEC 60076 are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent editions of the normative documents indicated below. For undated references, the latest edition of the normative document referred to applies. Members of IEC and ISO maintain registers of currently valid International Standards.

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

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

IEC 60726:1982, *Dry-type power 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.

3.2 Conditions de surintensités

3.2.1 Considérations générales

3.2.1.1 Conditions d'application requérant une attention spéciale

Les situations suivantes touchant une occurrence de grande surintensité, de durée ou répétition requièrent une attention spéciale et doivent être clairement indiquées dans les spécifications

- des transformateurs de régulation à très basse impédance, qui dépendent de l'impédance des appareils directement connectés pour limiter les surintensités;
- des transformateurs d'alternateur de centrale sensibles aux fortes surintensités produites par la connexion de l'alternateur au réseau hors synchronisme;
- des transformateurs directement connectés à des machines tournantes telles que moteurs ou compensateurs synchrones qui peuvent agir en tant que générateurs pour fournir du courant au transformateur dans des conditions de défaut de réseau;
- des transformateurs spéciaux et transformateurs installés dans des réseaux caractérisés par un fort taux de défaut; voir 3.2.6;
- des tensions d'utilisation supérieures à la tension assignée maintenue à la borne non défectueuse durant une condition de défaut.

3.2.1.2 Limitations en courant relatives aux transformateurs survolteurs

Quand la combinaison des impédances du transformateur survolteur et du système 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 le maximum de surintensité admise. Dans ce cas, il convient que l'acheteur prenne des dispositions pour limiter le courant de court-circuit à la surintensité indiquée 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 groupes triphasés, trois catégories selon la puissance nominale:

- catégorie I: jusqu'à 2 500 kVA;
- catégorie II: 2 501 kVA à 100 000 kVA;
- catégorie III: au-dessus 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 des valeurs minimales caractéristiques d'impédances de court-circuit de transformateurs, exprimées en tension de court-circuit à 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 result 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: up 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 (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 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 caractéristiques d'impédances de court-circuit de transformateurs à deux enroulements séparés

Impédance de court-circuit à courant assigné	
Puissance assignée kVA	Impédance de court-circuit minimale %
Jusqu'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
Au-dessus de 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 groupe triphasé.

3.2.2.4 Il convient que la puissance apparente de court-circuit du réseau à l'endroit où est installé le transformateur soit spécifiée par l'acheteur dans son appel d'offres pour permettre de trouver la valeur du courant de court-circuit symétrique à prendre en compte dans le calcul et dans les essais.

Si le niveau de la puissance de court-circuit 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 du réseau, 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 entre 1 et 3 pour le rapport entre l'impédance homopolaire et l'impédance directe du réseau.

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 de l'enroulement zigzag, le courant de défaut phase-terre peut atteindre des valeurs supérieures à celle d'un courant de court-circuit triphasé. Cependant, ces fortes valeurs sont limitées dans les deux phases concernées, à la moitié de la bobine et, de plus, les courants dans les autres enroulements montés en étoile sont inférieurs à ceux du courant de court-circuit triphasé. Les risques électrodynamiques de l'enroulement peuvent être soit en triphasé, soit en monophasé en fonction 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.

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 %
Up 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 subjected to agreement between manufacturer and purchaser.

NOTE 2 In 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 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. Electrodynamic 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 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 différentes sortes de défauts pouvant intervenir en service sur le réseau, par exemple des défauts phase-terre et des défauts entre phases, associés aux conditions de mise à la terre du réseau et du transformateur en question; voir 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'offres.

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

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 court-circuit entre phases.

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

3.2.4 Transformateurs survolteurs

Les impédances des transformateurs survolteurs peuvent être très faibles 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'offres.

Si un transformateur survolteur est directement associé à un transformateur dans le but de l'amplification de tension et/ou la variation de phase, il doit être capable de résister aux surintensités résultant de l'impédance combinée des deux machines.

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.

Cela s'applique, par exemple, aux transformateurs de centrale si le raccordement entre l'alternateur et le transformateur est exécuté 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 le raccordement alternateur-transformateur est fait de cette façon, les conditions de court-circuit les plus sévères peuvent apparaître dans le cas d'un transformateur de centrale à couplage étoile-triangle avec neutre à la terre, lorsqu'un défaut phase-terre se produit sur le réseau raccordé à l'enroulement connecté en étoile ou dans le cas d'une non-synchronisation des phases.

3.2.3 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 must be limited by appropriate means, such as series reactors or, in some instances, fuses. Care must 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 impedance of the transformer, the system and the directly associated apparatus may, by agreement between the manufacturer and the purchaser, be taken into account.

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

La tenue d'un transformateur à de fréquentes surintensités provenant des conditions d'exploitation ou d'une utilisation particulière (par exemple les transformateurs de four ou les transformateurs fixes alimentant des appareils de traction) doit faire l'objet d'un accord entre le constructeur et l'acheteur. L'acheteur doit informer à l'avance le constructeur des conditions attendues de tout fonctionnement anormal.

3.2.7 Dispositif de changement de prises

Lorsque le transformateur en est muni, le dispositif de changement de prises doit être capable de supporter les mêmes surintensités dues aux courts-circuits que les enroulements. Il n'est toutefois pas requis que le changeur de prise en charge soit en mesure de 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 la traverser.

4 Démonstration de la tenue au court-circuit

Les prescriptions de cet article s'appliquent tant aux transformateurs immergés dans l'huile qu'aux transformateurs de type sec, tels qu'ils sont spécifiés respectivement dans la CEI 60076-1 et la CEI 60726.

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.

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

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:

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 60726, 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.

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

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) pour la prise principale:

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

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

$$Z_t = \frac{z_t \times U_r^2}{100 \times S_r} \text{ en ohms } (\Omega) \text{ par phase (équivalent du montage étoile)}^1) \quad (3)$$

où

z_t est l'impédance de court-circuit mesurée à courant et fréquence assignés pour l'enroulement principal et pour la température de référence, exprimée en pour-cent;

S_r est la puissance assignée du transformateur, en mégavoltampères,

b) pour les prises autres que la prise principale:

U est, sauf spécification contraire, la tension de prise²⁾ de l'enroulement en question pour la connexion considérée, en kilovolts;

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

Pour les transformateurs ayant plus de deux enroulements, les autotransformateurs, les transformateurs survolteurs 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 ce qui convient.

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

NOTE Dans le cas de montage zigzag des enroulements, le courant de court-circuit pour un défaut phase-terre peut être de valeur considérablement plus élevée que pour un défaut sur les trois phases. Il est recommandé de prendre en compte l'accroissement de 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 admissible de la température moyenne de chaque enroulement

La température moyenne la plus élevée 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.

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 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, et de l'échauffement permis pour le système d'isolation de l'enroulement.

¹⁾ Dans cette formule les symboles Z_t et z_t remplacent Z et z , respectivement adoptés pour les mêmes paramètres dans la CEI 60076-1, dans un souci de clarté lié au contenu de 4.2.3.

²⁾ Pour la définition de «tension de prise», voir 5.2 de la CEI 60076-1.

a) for the principal tapping:

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

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

$$Z_t = \frac{z_t \times U_r^2}{100 \times S_r}, \text{ in ohms } (\Omega) \text{ per phase (equivalent star connection)}^{1)} \quad (3)$$

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;

b) for tapplings other than the principal tapping:

U is, unless otherwise specified, the tapping voltage²⁾ of the winding under consideration, in kilovolts;

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

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.

¹⁾ 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.

²⁾ For definition of "tapping voltage", see 5.2 of IEC 60076-1.

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
	220	350	200

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

NOTE 2 Quand la classe d'isolement utilisée dans les transformateurs immergés dans l'huile est autre que la 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 la plus élevée θ_1 atteinte par l'enroulement après court-circuit doit être calculée d'après la formule:

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

où

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

J est la densité de courant de court-circuit, en ampères par millimètre carré, 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 [$\mu\Omega \cdot m$]	0,0224	0,0355
Source: Table des constantes physiques et chimiques – Kay et Laby – 15 ^{ème} édition, Longmans, 1986.		

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
	220	350	200
NOTE 1 In 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, in amperes per square millimetre, based on the r.m.s. value of the symmetrical short-circuit current;

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]	0,0224	0,0355
Source: Table of physical and chemical constants – Kay and Laby – 15 th edition, Longmans, 1986.		

4.2 Tenue mécanique au court-circuit

4.2.1 Généralités

Si cela est prescrit par l'acheteur, la capacité à résister à l'effet mécanique de court-circuit doit être démontrée

- soit par essai,
- soit par des calculs et des considérations de conception.

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

Quand l'essai en 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 la passation de la commande. L'essai doit être réalisé suivant les prescriptions de 4.2.2 à 4.2.7.

Parfois, les grands transformateurs de puissance ne peuvent pas être essayés suivant les exigences de cette norme, par exemple par limitation des plateformes d'essai. Dans ce cas, les conditions d'essai doivent faire l'objet d'un accord entre acheteur et constructeur.

Quand une considération de calcul et de conception est choisie, une validation par comparaison avec des transformateurs similaires ou des modèles représentatifs précédemment testés est exigée. L'annexe A donne un guide pour l'identification d'un transformateur similaire.

4.2.2 Conditions dans lesquelles est présenté le transformateur avant les essais de court-circuit

4.2.2.1 Sauf convention contraire, les essais doivent être exécutés sur un transformateur neuf prêt à être mis en service. Des accessoires de protection tels que relais Bucholz et soupape de surpression doivent être montés sur le transformateur durant l'essai.

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

4.2.2.2 Préalablement aux essais de court-circuit, le transformateur doit avoir subi les essais individuels spécifiés dans la CEI 60076-1. Cependant, les essais aux chocs de foudre ne sont pas exigés à ce stade.

Si les enroulements sont munis de prises, la réactance et éventuellement la résistance sont à mesurer pour les positions correspondant aux prises sur lesquelles les essais de court-circuit seront exécutés.

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

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

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 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 calculation and design consideration is selected, validation by comparison with a previously tested similar transformer or tests on representative models is required. Guidance for the identification of a similar transformer is given in annex A.

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 the behaviour during short circuit (e.g. detachable cooling equipment), it 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 tapplings, the reactance and, if required, the resistance also have to 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 Au commencement des essais de court-circuit, la température moyenne des enroulements doit être comprise entre 10 °C et 40 °C, (voir 10.1 de la CEI 60076-1).

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

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

Les essais doivent être réalisés avec le courant de pleine asymétrie en ce qui concerne la phase en essai.

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

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

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

Le facteur k rend compte de l'effet initial du courant d'essai et $\sqrt{2}$ rend compte de la valeur crête à 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;

R est la somme des résistances du transformateur et du réseau ($R_t + R_s$), en ohms, 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 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 pratiques ³⁾.

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 d'autres valeurs de 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 pour-cent;

r_t est la composante résistive, à la température de référence, de z_t , en pour-cent;

z_t est la tension de court-circuit du transformateur, à la température de référence, en pour-cent.

³⁾ Le tableau 4 est basé sur l'équation 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.

4.2.2.3 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 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;

R is the sum of resistances of the transformer and the system ($R_t + R_s$), in ohms, 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 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 ³⁾.

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.

³⁾ Table 4 is based on the following expression for the peak factor:

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

where

e is the base of natural logarithm;

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

Si rien d'autre n'est spécifié, dans le cas $X/R > 14$, le facteur $k \times \sqrt{2}$ est supposé égal à

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

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

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

Le courant asymétrique dont la première crête est d'amplitude $\hat{i}$ (voir 4.2.3) se transformera (si la durée de l'essai au court-circuit est suffisante) en courant symétrique I (paragraphe 4.1.2).

La valeur crête du courant obtenue pendant l'essai ne doit pas s'écarter de plus de 5 % de celle spécifié, ni le courant symétrique de plus de 10 %.

4.2.5 Conduite des essais de court-circuit pour les transformateurs à deux enroulements

4.2.5.1 Pour obtenir le courant d'essai prévu en 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 transformateur ⁴⁾.

Dans le premier cas, 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 la méthode du court-circuit préétabli est utilisée pour des transformateurs 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 près étant 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, pour faciliter les essais, l'alimentation doit être 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 courant de surcharge. Cette durée doit être définie par accord entre l'acheteur et le constructeur.

NOTE Lors des essais de transformateurs de catégorie I, il pourrait 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 la crête initiale du courant (voir 4.2.3) dans l'enroulement de la phase en essai, l'instant d'enclenchement doit être réglé avec un enclencheur synchrone.

Pour vérifier les valeurs des courants d'essai $\hat{i}$ et I , on doit toujours enregistrer ceux-ci à l'aide d'un oscillographe.

⁴⁾ Une autre procédure d'essai consiste à appliquer simultanément deux tensions en opposition de phases 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 mais synchronisées. Cette méthode est avantageuse dans la prévention de toute saturation du noyau et réduira la puissance requise de l'alimentation.

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

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

The asymmetrical current having first peak amplitude $\hat{i}$ (see 4.2.3) will change (if the duration of the short-circuit test current is sufficiently long) into the symmetrical current 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 transformer⁴⁾.

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 further 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 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 $\hat{i}$ and I of the test currents, oscillographic records shall always be taken.

4) 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.

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.

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 $\hat{i}$ peut être déterminé à partir des oscillogrammes des courants de ligne. 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 son maximum. Dans ce cas, on trouve le facteur k à partir des oscillogrammes des courants de ligne.

Une autre méthode pour déterminer les courants de phase d'un enroulement connecté en triangle consiste à coupler, de façon adéquate, les enroulements secondaires des transformateurs de courant mesurant les courants de ligne. On peut faire en sorte que l'oscillographe enregistre les courants de phase.

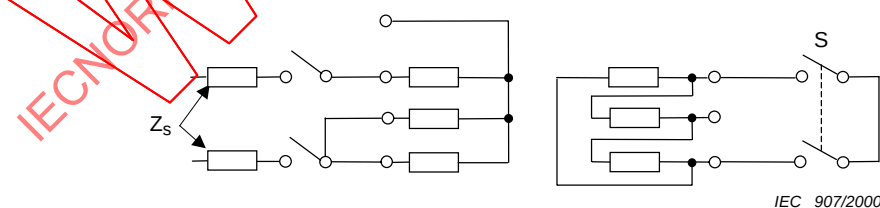
NOTE 2 Pour les transformateurs à couplage étoile-zigzag de la catégorie I et à réglage à flux constants, ayant une valeur $x_l/r_l \leq 3$ (voir 4.2.3), les trois phases sont enclenchées simultanément sans utiliser d'enclencheur synchrone. Pour les autres transformateurs à couplage étoile-zigzag, les 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 d'essayer des transformateurs 60 Hz avec une alimentation à 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 demande 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, pour autant que les prescriptions de 4.2.4 puissent 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 sommets du triangle et la tension d'essai doit être la même que celle qu'il y aurait entre phases dans un essai triphasé. Pour les enroulements connectés en étoile, la source monophasée est branchée entre une borne de ligne et l'ensemble des deux autres réunies entre elles. La tension monophasée d'essai doit être égale à $\sqrt{3}/2$ fois la tension qu'il y aurait entre phases dans un essai triphasé.

Des exemples de deux schémas d'essai possibles en monophasé simulant un essai triphasé sont donnés aux figures 1 et 2.



Composants

Z_s impédance du système d'essai

S enclencheur synchrone pour un court-circuit post-établi ou une connexion permanente pour un court-circuit préétabli.

Figure 1 – Transformateur connecté étoile-triangle

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

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 $\hat{i}$ 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.

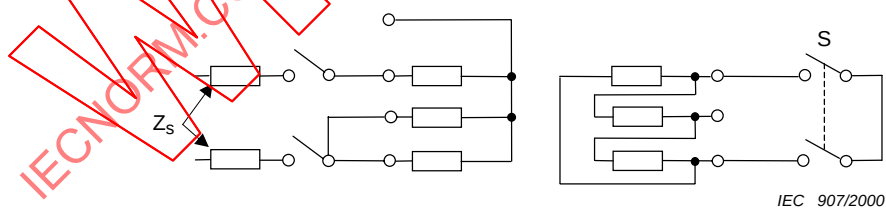
NOTE 2 For transformers with star-zigzag connection belonging to category I and with constant flux voltage variation having value for $x_0/r_t \leq 3$ (see 4.2.3), the three phases are switched on simultaneously without the use of a synchronous switch. For other transformers with star-zigzag connection, 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 has to 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.

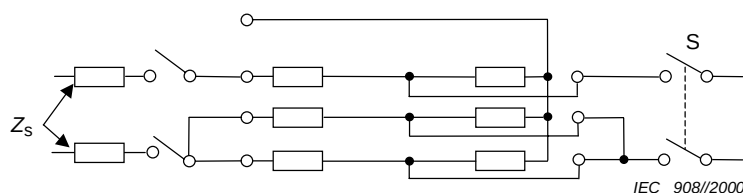


Components

Z_s test system impedance

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

Figure 1 – Star/delta connected transformer



Composants

Z_s impédance du système d'essai

S enclencheur synchrone pour un court-circuit post-établi ou une connexion permanente pour un court-circuit préétabli

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 et à isolation non uniforme, il est nécessaire de s'assurer que l'isolement du neutre est suffisant pour un essai en monophasé.

NOTE 3 Si, pour des enroulements connectés en étoile, on ne dispose pas d'une puissance suffisante pour faire l'essai en monophasé tel qu'il est décrit ci-dessus, et si le neutre est sorti, le constructeur et l'acheteur peuvent convenir de faire un essai monophasé avec alimentation entre une borne de ligne et le neutre, à condition que le neutre soit capable de transiter le courant correspondant. Avec ce schéma d'essai, il peut être utile de connecter entre elles les bornes des phases non soumises à l'essai de manière à mieux contrôler leur tension, pourvu que cela soit faisable et que le montage soit correct.

4.2.5.5 En l'absence de spécification particulière, le nombre d'essais pour les transformateurs monophasés ou triphasés est déterminé comme suit, sans tenir compte des essais préliminaires de réglage exécutés à moins de 70 % du courant spécifié et faits pour s'assurer du déroulement correct de l'essai en ce qui concerne l'instant d'enclenchement, l'ajustage du courant, l'amortissement et la durée.

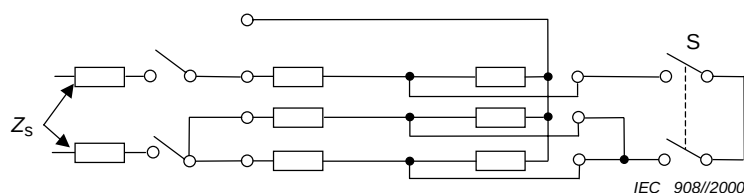
Pour les transformateurs monophasés de la catégorie I et de la catégorie II, le nombre d'essais doit être de trois. Sauf spécification contraire, pour les transformateurs monophasés avec prises, chacun des trois essais est fait sur une position différente du changeur de prises, soit un essai sur la position 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 la catégorie I et de la catégorie II, le nombre total d'essais doit être de neuf, à raison de trois sur chaque colonne. Sauf spécification contraire, les neuf essais sur chacune des colonnes pour les transformateurs à prises sont faits sur des positions différentes du changeur de prises, soit trois essais sur la position correspondant au rapport de transformation le plus élevé sur l'une des colonnes extrêmes, trois essais sur la prise principale sur la colonne du milieu et trois essais sur la position correspondant au rapport de transformation le plus bas sur l'autre des colonnes extrêmes.

Pour les transformateurs de la catégorie III, il est nécessaire, chaque fois, que le constructeur et l'acheteur conviennent du nombre d'essais, de leur durée et des positions du changeur de prises. Toutefois, afin de simuler aussi bien que possible les effets d'une répétition éventuelle de courts-circuits en service, de permettre un meilleur contrôle du comportement de l'appareil en essai et de permettre une interprétation correcte des éventuelles variations de l'impédance de court-circuit mesurée, il est recommandé que le nombre d'essais soit comme suit:

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

En ce qui concerne la position du changeur de prises et la séquence des essais, la même procédure que celle des transformateurs de catégories I et II est recommandée.



Components

Z_s test system impedance

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

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

La durée de chaque essai doit être de

- 0,5 s pour les transformateurs de la catégorie I,
 - 0,25 s pour les transformateurs des catégories II et III,
- avec une tolérance de $\pm 10\%$.

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

De multiples situations 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.

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'essais soit choisie en prenant comme critère l'augmentation attendue 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 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 essayé 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. Cet événement n'est pas significatif de la capacité du transformateur à supporter le court-circuit, à moins que du gaz combustible ne soit trouvé dans le détecteur.

NOTE 3 Des amorçages électriques temporaires peuvent apparaître entre la cuve et la masse pendant l'étape de mise sous tension.

4.2.7.3 Après chaque essai, les oscillogrammes pris durant les essais doivent être vérifiés, le relais de détection d'émission de gaz et de mouvement d'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 de la réactance de phase-neutre dans le cas d'un enroulement en étoile ou déduite d'une configuration en triangle par une méthode qui sera appropriée.

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 are in line with those prescribed for two-winding transformers and that the test sequence is 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 over 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 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 On peut utiliser des moyens d'évaluation supplémentaires pour juger du résultat de l'essai tels que mesure de résistance d'enroulement, techniques de tension de choc basse tension (pour comparaison d'oscillogrammes obtenus à l'état initial et après l'essai), analyse du spectre de réponse en fréquence, analyse de la fonction de transfert et mesures à vide (méthode des chocs basse tension), essai à vide (pour détecter un court-circuit entre spires).

NOTE 2 Toute différence entre les résultats d'une mesure faite 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 de la réactance de court-circuit mesurée après chaque essai, variations qui peuvent être continues 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 Après achèvement des essais, les parties extérieures du transformateur et le relais (s'il y en a un) de détection d'émission de gaz et de mouvement d'huile doivent être examinées. 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 des anomalies possibles durant les essais, plus particulièrement tous signes de modifications de la réactance de court-circuit.

NOTE 1 A la fin des essais, si les enroulements sont munis de prises de réglage, il faut mesurer la réactance sur toutes les prises de réglage pour lesquelles un essai de court-circuit a été effectué.

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 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).

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 noyau 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 changement de la place des conducteurs, déplacements, etc. qui, en dépit de la réussite aux essais individuels de série, peuvent altérer la sécurité de fonctionnement du transformateur.

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

Pour considérer que le transformateur a subi avec succès l'essai de court-circuit, les conditions ci-après doivent être remplies:

- 1) les résultats des essais de court-circuit et les mesures et vérifications effectuées pendant les essais ne révèlent aucune condition de défaut;
- 2) les essais diélectriques et autres essais de série, lorsqu'ils s'appliquent, ont été répétés avec succès et l'essai de tension de choc de foudre, s'il est spécifié, a été réussi;
- 3) l'inspection suite au décufrage ne révèle aucun défaut tel que déplacement, décalage de tôles, déformation des enroulements, des connexions ou des structures d'appui susceptibles de mettre en danger la sécurité de fonctionnement du transformateur;
- 4) il n'y a pas de trace de décharge électrique interne;

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 must 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 be also 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, 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 du 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 circulaires ⁵⁾ et bobines non circulaires en sandwich. 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 1 Pour les transformateurs ayant des bobines concentriques non circulaires d'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 $(22,5 - 5 Z_c) \%$, Z_c étant l'impédance de court-circuit exprimée en pourcentage.

NOTE 2 Les transformateurs faisant partie de la partie supérieure de la catégorie II et ayant une tension la plus élevée U_m ne dépassant pas 52 kV demandent une attention particulière et peuvent requérir 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 la variation.

b) Transformateurs de la catégorie III

La partie active doit être décuvée pour inspection du noyau et des enroulements et son aspect comparé à celui avant les essais, afin de révéler d'éventuels défauts apparents tels que changements de place des conducteurs, déplacements, etc. qui, malgré des essais de série réussis, pourraient compromettre le bon fonctionnement du transformateur.

Tous les essais de série, y compris les essais diélectriques à 100 % de la valeur prescrite, doivent être répétés. Si un essai de choc de foudre est spécifié, il doit être effectué à ce moment.

Afin de considérer que le transformateur a subi les essais de court-circuit, les conditions suivantes doivent être remplies.

- 1) les résultats des essais de court-circuit et les mesures et vérifications effectuées pendant les essais ne révèlent aucune condition de défaut;
- 2) les essais de série ont été répétés avec succès et l'essai d'onde de choc, s'il est spécifié, exécuté avec succès;
- 3) l'inspection après décufrage ne révèle aucun défaut tel que déplacement, décalage de tôles, déformation des enroulements, des connexions ou des structures susceptibles de compromettre le bon fonctionnement du transformateur;
- 4) pas de trace de décharge électrique interne;
- 5) les valeurs de réactance de court-circuit, en ohms, évaluées à la fin des essais pour chaque phase ne diffèrent pas des valeurs originelles de plus de 1 %.

⁵⁾ 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 coils ⁵⁾ 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 1 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 $(22,5 - 5 Z_t) \%$, Z_t being the short-circuit impedance in per cent.

NOTE 2 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, 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 %.

⁵⁾ 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.

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 la variation. Cependant, avant le démontage, il est suggéré que des moyens de diagnostic supplémentaires soient utilisés (voir note 1 de 4.2.7.3).

NOTE En relation avec l'impact économique du coût d'un transformateur de catégorie III et l'implication du coût de quelques contrôles visuels étendus aux parties internes de celui-ci, il est recommandé qu'une série de photographies soit prise de la position des sorties d'enroulements, prises, alignement des cales et la configuration de l'isolation d'extrémité, etc. afin de permettre une comparaison précise des composants 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 en service du transformateur n'en soit pas affectée.

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60076-5:2000

Withd2Wm

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 are applied (see note 1 of 4.2.7.3).

NOTE 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 the 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.

Withd 2020
IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60076-5:2000