

**NORME  
INTERNATIONALE  
INTERNATIONAL  
STANDARD**

**CEI  
IEC**

**60076-7**

Première édition  
First edition  
2005-12

---

---

**Transformateurs de puissance –**

**Partie 7:  
Guide de charge pour transformateurs  
immergés dans l'huile**

**Power transformers –**

**Part 7:  
Loading guide for oil-immersed  
power transformers**



Numéro de référence  
Reference number  
CEI/IEC 60076-7:2005

## Numérotation des publications

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

## Editions consolidées

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

## Informations supplémentaires sur les publications de la CEI

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

- **Site web de la CEI** ([www.iec.ch](http://www.iec.ch))
- **Catalogue des publications de la CEI**

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

- **IEC Just Published**

Ce résumé des dernières publications parues ([www.iec.ch/online\\_news/justpub](http://www.iec.ch/online_news/justpub)) est aussi disponible par courrier électronique. Veuillez prendre contact avec le Service client (voir ci-dessous) pour plus d'informations.

- **Service clients**

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

Email: [custserv@iec.ch](mailto:custserv@iec.ch)  
Tél: +41 22 919 02 11  
Fax: +41 22 919 03 00

## Publication numbering

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

## Consolidated editions

The IEC is now publishing consolidated versions of its publications. For example, edition numbers 1.0, 1.1 and 1.2 refer, respectively, to the base publication, the base publication incorporating amendment 1 and the base publication incorporating amendments 1 and 2.

## Further information on IEC publications

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

- **IEC Web Site** ([www.iec.ch](http://www.iec.ch))
- **Catalogue of IEC publications**

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

- **IEC Just Published**

This summary of recently issued publications ([www.iec.ch/online\\_news/justpub](http://www.iec.ch/online_news/justpub)) is also available by email. Please contact the Customer Service Centre (see below) for further information.

- **Customer Service Centre**

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

Email: [custserv@iec.ch](mailto:custserv@iec.ch)  
Tel: +41 22 919 02 11  
Fax: +41 22 919 03 00

**NORME  
INTERNATIONALE  
INTERNATIONAL  
STANDARD**

**CEI  
IEC**

**60076-7**

Première édition  
First edition  
2005-12

---

---

**Transformateurs de puissance –**

**Partie 7:  
Guide de charge pour transformateurs  
immergés dans l'huile**

**Power transformers –**

**Part 7:  
Loading guide for oil-immersed  
power transformers**

© IEC 2005 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

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

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

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



Commission Electrotechnique Internationale  
International Electrotechnical Commission  
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX  
PRICE CODE **XA**

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

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	6
INTRODUCTION.....	10
1 Domaine d'application .....	12
2 Références normatives.....	12
3 Définitions .....	12
4 Symboles et abréviations.....	16
5 Effet d'un régime de charge au-delà des caractéristiques de la plaque signalétique .....	20
5.1 Introduction .....	20
5.2 Conséquences générales .....	22
5.3 Effets et risques d'un régime de charge de secours de courte durée .....	22
5.4 Effets du chargement d'urgence de longue durée .....	24
5.5 Taille du transformateur .....	26
5.6 Papier d'isolation à performances thermiques améliorées ou non .....	26
6 Vitesse de vieillissement relatif et durée de vie de l'isolation du transformateur .....	30
6.1 Généralités.....	30
6.2 Vitesse de vieillissement relatif .....	30
6.3 Calcul de perte de la vie.....	32
6.4 Durée de vie de l'isolation .....	32
7 Limites .....	32
7.1 Limitations de courant et de température.....	32
7.2 Limitations spécifiques pour les transformateurs de distribution .....	34
7.3 Limitations spécifiques pour les transformateurs de moyenne puissance.....	36
7.4 Limitations spécifiques pour les transformateurs de grande puissance .....	38
8 Détermination des températures.....	40
8.1 Echauffement du point-chaud en régime permanent .....	40
8.2 Températures de l'huile à la partie supérieure et température du point-chaud pour des conditions variables de température ambiante et de régime de charge....	52
8.3 Température ambiante .....	62
9 Influence des changeurs de prises .....	64
9.1 Généralités.....	64
9.2 Pertes en charge.....	66
9.3 Rapport des pertes.....	66
9.4 Facteur de charge .....	66
Annexe A (informative) Calcul de la constante de temps de l'huile et de l'enroulement .....	68
Annexe B (informative) Exemple pratique de la méthode d'équations exponentielle .....	72
Annexe C (informative) Illustration de la méthode de solution des équations différentielles .....	82
Annexe D (informative) Organigramme, fondé sur l'exemple de l'annexe B .....	100
Annexe E (informative) Exemple de calcul et de présentation des données de surcharge ..	104
Bibliographie.....	112

CONTENTS

FOREWORD.....7

INTRODUCTION..... 11

1 Scope..... 13

2 Normative references ..... 13

3 Definitions ..... 13

4 Symbols and abbreviations..... 17

5 Effect of loading beyond nameplate rating .....21

    5.1 Introduction .....21

    5.2 General consequences ..... 23

    5.3 Effects and hazards of short-time emergency loading ..... 23

    5.4 Effects of long-time emergency loading .....25

    5.5 Transformer size ..... 27

    5.6 Non-thermally and thermally upgraded insulation paper ..... 27

6 Relative ageing rate and transformer insulation life ..... 31

    6.1 General ..... 31

    6.2 Relative ageing rate ..... 31

    6.3 Loss-of-life calculation..... 33

    6.4 Insulation life ..... 33

7 Limitations..... 33

    7.1 Current and temperature limitations..... 33

    7.2 Specific limitations for distribution transformers..... 35

    7.3 Specific limitations for medium-power transformers ..... 37

    7.4 Specific limitations for large power transformers..... 39

8 Determination of temperatures ..... 41

    8.1 Hot-spot temperature rise in steady state ..... 41

    8.2 Top-oil and hot-spot temperatures at varying ambient temperature and load conditions..... 53

    8.3 Ambient temperature ..... 63

9 Influence of tap changers ..... 65

    9.1 General ..... 65

    9.2 Short-circuit losses..... 67

    9.3 Ratio of losses ..... 67

    9.4 Load factor ..... 67

Annex A (informative) Calculation of winding and oil time constant ..... 69

Annex B (informative) Practical example of the exponential equations method..... 73

Annex C (informative) Illustration of the differential equations solution method ..... 83

Annex D (informative) Flowchart, based on the example in annex B ..... 101

Annex E (informative) Example of calculating and presenting overload data ..... 105

Bibliography..... 113

Figure 1 – Vieillessement accéléré en tube scellé dans de l'huile minérale à 150°C.....	28
Figure 2 – Diagramme thermique .....	42
Figure 3 – Echauffement local au-dessus de la température de l'air dans un enroulement de 120 kV avec un facteur de charge de 1,6.....	44
Figure 4 – Echauffement local au-dessus de la température de l'air dans un enroulement de 410 kV avec un facteur de charge de 1,6.....	46
Figure 5 – Deux sondes à fibres optiques installées dans une cale avant que la cale ait été installée dans l'enroulement de 120 kV .....	46
Figure 6 – Enroulement refroidi par une circulation en zigzag où la distance entre toutes les sections est la même et l'écran de circulation du fluide est installé dans l'espace entre sections .....	50
Figure 7 – Vue de dessus de la section d'un enroulement rectangulaire avec "disposition de canaux de refroidissement réduits" sous les culasses. ....	50
Figure 8 – Réponses en température aux variations en échelons du courant de charge .....	54
Figure 9 –La fonction $f_2(t)$ associée aux valeurs données au tableau 5 .....	58
Figure 10 – Représentation du schéma bloc fonctionnel des équations différentielles .....	60
Figure 11 – Principe des pertes en fonction de la position de prise .....	66
Figure B.1 – Courbes comparatives des réponses en température du point chaud aux variations en échelons du courant de charge .....	78
Figure B.2 – Courbes comparatives des réponses en température de l'huile supérieure aux variations en échelons du courant de charge.....	78
Figure C.1 – Exemple de données d'entrée tracées .....	92
Figure C.2 – Données de sortie tracées pour l'exemple .....	98
Figure E.1 – Gros transformateurs de puissance OF: charges admissibles pour une perte de la vie normale .....	110
Tableau 1 – Durée de vie du papier sous diverses conditions .....	28
Tableau 2 – Vitesse de vieillissement relatif due à la température du point-chaud .....	30
Tableau 3 – Durée de vie normale d'un système d'isolation à performance thermique améliorée exempte d'oxygène et bien sec à la température de référence de 110 °C .....	32
Tableau 4 – Limites de courant et de température applicables aux charges au-delà des caractéristiques de la plaque signalétique .....	34
Tableau 5 – Caractéristiques thermiques recommandées pour les équations exponentielles.....	58
Tableau 6 – Correction concernant l'augmentation de la température ambiante due à l'enceinte .....	64
Tableau B.1 – Périodes de charge du transformateur de 250 MVA.....	72
Tableau B.2 – Températures à la fin de chaque étape de charge .....	80
Tableau C.1 – Exemple de données d'entrée .....	90
Tableau C.2 – Exemple de données de sortie .....	96
Tableau E.1 – Caractéristiques d'exemple liées à la possibilité de charge des transformateurs .....	104
Tableau E.2 – Exemple de tableau présentant les charges admissibles et la perte de la vie quotidienne correspondante (en jours "normaux), et l'échauffement maximal du point-chaud au cours du cycle de charge .....	108

Figure 1 – Sealed tube accelerated ageing in mineral oil at 150 °C.....	29
Figure 2 – Thermal diagram.....	43
Figure 3 – Local temperature rises above air temperature in a 120 kV winding at a load factor of 1,6.....	45
Figure 4 – Local temperature rises above air temperature in a 410 kV winding at a load factor of 1,6.....	47
Figure 5 – Two fibre optic sensors installed in a spacer before the spacer was installed in the 120 kV winding.....	47
Figure 6 – Zigzag-cooled winding where the distance between all sections is the same and the flow-directing washer is installed in the space between sections.....	51
Figure 7 – Top view section of a rectangular winding with "collapsed cooling duct arrangement" under the yokes.....	51
Figure 8 – Temperature responses to step changes in the load current.....	55
Figure 9 – The function $f_2(t)$ generated by the values given in Table 5.....	59
Figure 10 – Block diagram representation of the differential equations.....	61
Figure 11 – Principle of losses as a function of the tap position.....	67
Figure B.1 – Hot-spot temperature response to step changes in the load current.....	79
Figure B.2 – Top-oil temperature response to step changes in the load current.....	79
Figure C.1 – Plotted input data for the example.....	93
Figure C.2 – Plotted output data for the example.....	99
Figure E.1 – OF large power transformers: permissible duties for normal loss of life.....	111
Table 1 – Life of paper under various conditions.....	29
Table 2 – Relative ageing rates due to hot-spot temperature.....	31
Table 3 – Normal insulation life of a well-dried, oxygen-free thermally upgraded insulation system at the reference temperature of 110 °C.....	33
Table 4 – Current and temperature limits applicable to loading beyond nameplate rating.....	35
Table 5 – Recommended thermal characteristics for exponential equations.....	59
Table 6 – Correction for increase in ambient temperature due to enclosure.....	65
Table B.1 – Load steps of the 250 MVA transformer.....	73
Table B.2 – Temperatures at the end of each load step.....	81
Table C.1 – Input data for example.....	91
Table C.2 – Output data for the example.....	97
Table E.1 – Example characteristics related to the loadability of transformers.....	105
Table E.2 – An example table with the permissible duties and corresponding daily loss of life (in "normal" days), and maximum hot-spot temperature rise during the load cycle.....	109

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE –**

**Partie 7: Guide de charge pour transformateurs  
immergés dans l'huile**

**AVANT-PROPOS**

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

La Norme internationale CEI 60076-7 a été établie par le comité d'études 14 de la CEI: Transformateurs de puissance.

Cette norme annule et remplace la CEI 60354 publiée en 1991. Cette première édition constitue une révision technique du contenu de la CEI 60354. Les détails des changements techniques sont donnés dans l'introduction.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
14/512/FDIS	14/520/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.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**POWER TRANSFORMERS –**

**Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers**

FOREWORD

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

International Standard IEC 60076-7 has been prepared by IEC technical committee 14: Power transformers.

This standard cancels and replaces IEC 60354 published in 1991. This first edition constitutes a technical revision of the material given in IEC 60354. Details of the changes are given in the introduction.

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

FDIS	Report on voting
14/512/FDIS	14/520/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.

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

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

- Partie 1: Généralités
- Partie 2: Echauffement
- Partie 3: Niveaux d'isolement, essais diélectriques et distances d'isolement dans l'air
- Partie 4: Guide pour les essais au choc de foudre et au choc de manœuvre – Transformateurs de puissance et bobines d'inductance
- Partie 5: Tenue au court-circuit
- Partie 7: Guide de charge pour transformateurs immergés dans l'huile
- Partie 8: Guide d'application
- Partie 10: Détermination des niveaux de bruit
- Partie 11: Transformateurs de type sec

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

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

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

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

- Part 1: General
- Part 2: Temperature rise
- Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air
- Part 4: Guide to the lightning impulse and switching impulse testing – Power transformers and reactors
- Part 5: Ability to withstand short circuit
- Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers
- Part 8: Application guide
- Part 10: Determination of sound levels
- Part 11: Dry-type transformers

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

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

## INTRODUCTION

La présente partie de la CEI 60076 fournit des conseils pour les spécifications et les régimes de charge des transformateurs de puissance du point de vue des températures de fonctionnement et du vieillissement thermique. Elle fournit des recommandations pour le fonctionnement à des régimes de charge supérieurs à la valeur assignée et un guide pour le planificateur afin de choisir les grandeurs assignées et les conditions de charge appropriées pour de nouvelles installations.

La CEI 60076-2 constitue la base pour des ententes contractuelles et elle contient les exigences et les essais concernant les valeurs d'échauffement des transformateurs immergés dans l'huile dans le cas de régime permanent aux grandeurs assignées. Il convient de noter que la CEI 60076-2 fait référence à l'échauffement moyen des enroulements tandis que la présente partie de la CEI 60076 se réfère principalement à la température de point chaud et les valeurs indiquées sont données seulement à titre indicatif.

La présente partie de la CEI 60076 donne des modèles mathématiques pour juger la conséquence de différents régimes de charge, transitoires ou cycliques, pour différentes températures du fluide de refroidissement. Les modèles donnent le calcul des températures de fonctionnement dans le transformateur, en particulier la température de la partie la plus chaude de l'enroulement. Cette température du point chaud est utilisée à son tour pour évaluer une valeur relative de la vitesse de vieillissement thermique et le pourcentage de la vie consommée dans une période de temps particulière. La modélisation fait référence aux petits transformateurs, ici appelés transformateurs de distribution, et aux transformateurs de puissance.

Un changement important par rapport à la CEI 60354:1991 est l'utilisation croissante des capteurs de température à fibres optiques dans les transformateurs. Cet usage a radicalement accru les possibilités d'obtenir une modélisation thermique correcte des transformateurs de puissance, en particulier à chaque changement de palier du courant de charge. Ces possibilités ont également mis en évidence des différences entre "l'exposant d'huile  $x$ " et "l'exposant d'enroulement  $y$ " utilisés dans la présente partie de la CEI 60076 et dans la CEI 60076-2:1993, pour les transformateurs de puissance:

- $x = 0,9$  dans la CEI 60076-2, et  $x = 0,8$  dans la présente partie de la CEI 60076 avec un mode de refroidissement ON.
- $y = 1,6$  dans la CEI 60076-2, et  $y = 1,3$  dans la présente partie de la CEI 60076 avec les modes de refroidissement ON et OF.

Pour les transformateurs de distribution les mêmes valeurs de  $x$  et de  $y$  sont utilisées dans la présente partie de la CEI 60076 et dans la CEI 60076-2.

La présente partie de la CEI 60076 présente des recommandations supplémentaires concernant les limites de charge admissible selon les résultats des calculs ou des mesures de la température. Ces recommandations se réfèrent à différents types de régimes de charge – régime de charge continu, régime cyclique non perturbé ou régime temporaire de secours. Les recommandations se rapportent aux transformateurs de distribution, aux transformateurs de moyenne puissance et aux transformateurs de grande puissance.

Les articles de 1 à 7 contiennent les définitions, les informations communes générales et les limitations spécifiques pour le fonctionnement des différentes catégories de transformateurs.

L'article 8 contient la détermination des températures, et présente les modèles mathématiques utilisés pour estimer la température du point chaud en régimes permanents et transitoires.

L'article 9 contient une courte description de l'influence de la position de prise.

Des exemples d'application sont donnés en Annexes B, C et E.

## INTRODUCTION

This part of IEC 60076 provides guidance for the specification and loading of power transformers from the point of view of operating temperatures and thermal ageing. It provides recommendations for loading above the nameplate rating and guidance for the planner to choose appropriate rated quantities and loading conditions for new installations.

IEC 60076-2 is the basis for contractual agreements and it contains the requirements and tests relating to temperature-rise figures for oil-immersed transformers during continuous rated loading. It should be noted that IEC 60076-2 refers to the average winding temperature rise while this part of IEC 60076 refers mainly to the hot-spot temperature and the stated values are provided only for guidance.

This part of IEC 60076 gives mathematical models for judging the consequence of different loadings, with different temperatures of the cooling medium, and with transient or cyclical variation with time. The models provide for the calculation of operating temperatures in the transformer, particularly the temperature of the hottest part of the winding. This hot-spot temperature is, in turn, used for evaluation of a relative value for the rate of thermal ageing and the percentage of life consumed in a particular time period. The modelling refers to small transformers, here called distribution transformers and to power transformers.

A major change from IEC 60354:1991 is the increased use of fibre optic temperature sensors in transformers. This has radically increased the possibilities of obtaining a proper thermal modelling of power transformers, especially at step changes in the load current. These possibilities have also yielded some differences between the "oil exponent  $x$ " and the "winding exponent  $y$ " used in this part of IEC 60076 and in IEC 60076-2:1993, for power transformers:

- $x = 0,9$  in IEC 60076-2, and  $x = 0,8$  in this part of IEC 60076 at ON cooling.
- $y = 1,6$  in IEC 60076-2, and  $y = 1,3$  in this part of IEC 60076 at ON and OF-cooling.

For distribution transformers, the same  $x$  and  $y$  values are used in this part of IEC 60076 as in IEC 60076-2.

This part of IEC 60076 further presents recommendations for limitations of permissible loading according to the results of temperature calculations or measurements. These recommendations refer to different types of loading duty – continuous loading, normal cyclic undisturbed loading or temporary emergency loading. The recommendations refer to distribution transformers, to medium power transformers and to large power transformers.

Clauses 1 to 7 contain definitions, common background information and specific limitations for the operation of different categories of transformers.

Clause 8 contains the determination of temperatures, presents the mathematical models used to estimate the hot-spot temperature in steady state and transient conditions.

Clause 9 contains a short description of the influence of the tap position.

Application examples are given in Annexes B, C and E.