

NORME INTERNATIONALE

CEI 60076-7

Première édition
2005-12

Transformateurs de puissance –

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

(<https://standards.iteh.ai>)
Document Preview

IEC 60076-7:2005

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/92442fe-e556-4197-b0fd-ca0cd3c56f58/iec-60076-7-2005>

*Cette version **française** découle de la publication d'origine **bilingue** dont les pages anglaises ont été supprimées. Les numéros de page manquants sont ceux des pages supprimées.*



Numéro de référence
CEI 60076-7:2005(F)

Numérotation des publications

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

Editions consolidées

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

Informations supplémentaires sur les publications de la CEI

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

- **Site web de la CEI** (www.iec.ch)

- **Catalogue des publications de la CEI**

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

- **IEC Just Published**

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

- **Service clients**

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

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

Transformateurs de puissance –

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

(<https://standards.iteh.ai>)
Document Preview

<https://standards.iteh.ai>
<https://standards.iteh.ai/standards/iec/92442fe-e556-4197-b0fd-ca0cd3c56f58/iec-60076-7-2005>

<https://standards.iteh.ai/standards/iec/92442fe-e556-4197-b0fd-ca0cd3c56f58/iec-60076-7-2005>

© IEC 2005 Droits de reproduction réservés

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.

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



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

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

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

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.

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.

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.

TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE –

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

1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 60076 est applicable aux transformateurs immergés dans l'huile. Elle décrit l'effet du fonctionnement pour diverses températures ambiantes et conditions de charge durant la vie du transformateur.

NOTE Pour les transformateurs de four, il convient de consulter le fabricant compte tenu du profil particulier de charge.

2 Références normatives

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

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

CEI 60076-4:2002, *Transformateurs de puissance – Partie 4: Guide pour les essais au choc de foudre et au choc de manœuvre – Transformateurs de puissance et bobines d'inductance*

CEI 60076-5:2000, *Transformateurs de puissance – Partie 5: Tenue au court-circuit*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions suivants s'appliquent.

3.1

transformateur de distribution

transformateur de puissance avec une puissance assignée maximale de 2 500 kVA en triphasée ou de 833 kVA en monophasée

3.2

transformateur de moyenne puissance

transformateur de puissance avec une puissance assignée maximale de 100 MVA en triphasée ou 33,3 MVA en monophasée

3.3

transformateur de grande puissance

transformateur de puissance dépassant les limites spécifiées en 3.2

3.4

régime de charge cyclique

régime de charge avec des variations cycliques (la durée du cycle étant habituellement de 24 h) qui est considéré en termes de quantité cumulée de vieillissement qui se produit pendant le cycle. Le régime de charge cyclique peut être soit un régime normal, soit un régime de charge de secours de longue durée.

3.5

régime de charge cyclique normal

une température ambiante plus élevée ou un courant de charge supérieure à la valeur assignée est appliqué pendant une partie du cycle, mais, du point de vue du taux de vieillissement thermique relatif (selon le modèle mathématique), cette charge est équivalente à la charge assignée à température ambiante normale. Ceci est réalisé en tirant profit des températures ambiantes basses ou des faibles courants de charge pendant le reste du cycle de charge. Pour les besoins de la planification, ce principe peut être étendu aux longues périodes de temps pendant lesquelles les cycles avec des taux de vieillissement thermique relatifs supérieurs à l'unité sont compensés par des cycles avec des taux de vieillissement thermique inférieurs à l'unité.

3.6

régime de charge de secours de longue durée

régime de charge résultant de panne prolongée de certains éléments du système qui ne seront pas reconnectés avant que le transformateur atteigne, en régime permanent, une nouvelle température stabilisée plus élevée

3.7

régime de charge de secours de courte durée

régime de charge exceptionnellement élevé à caractère transitoire (moins de 30 min) dû à l'apparition d'un ou plusieurs événements de faible probabilité qui perturbent sérieusement le régime de charge normal du système

3.8

point chaud

en l'absence de définition particulière, par "point-chaud " on sous-entend le point le plus chaud des enroulements

3.9

vitesse relative de vieillissement thermique

pour une température de point-chaud donnée, la vitesse à laquelle le vieillissement de l'isolation du transformateur est réduite ou accélérée comparée à la vitesse de vieillissement correspondant à une température de point-chaud de référence

3.10

durée de vie de l'isolation du transformateur

durée totale entre l'état initial pour lequel l'isolation est considérée neuve et l'état final correspondant au moment où, en raison du vieillissement thermique, des contraintes diélectriques, des contraintes de court-circuit ou des mouvements mécaniques, qui pourraient se produire en service normal, conduisent à un risque élevé de défaillance électrique

3.11

consommation de durée de vie en pourcentage

vieillissement équivalent en heures sur une période de temps (habituellement de 24 h) multiplié par 100 et divisé par la durée de vie prévue pour l'isolation du transformateur. Le vieillissement équivalent en heures est obtenu en multipliant la vitesse relative de vieillissement par le nombre d'heures.

3.12

papier à performance thermique améliorée

papier brut de cellulose qui a été chimiquement modifié pour réduire la vitesse de décomposition du papier. Les effets de vieillissement sont réduits soit par l'élimination partielle des agents formant l'eau (comme dans le cyanoéthylolation) soit en inhibant la formation de l'eau par l'utilisation d'agents stabilisant (comme dans l'addition d'amine, le dicyandiamide). Un papier est considéré comme thermiquement amélioré s'il répond aux critères de vie définis dans l'ANSI/IEEE C57.100; conservation de 50 % de la résistance à la traction après 65 000 heures dans un tube scellé à 110 °C ou à toute autre combinaison de temps/température donnée par l'équation:

$$\text{Time (h)} = e^{\left(\frac{15\,000}{(\theta_h + 273)} - 28,082\right)} \approx 65\,000 \times e^{\left(\frac{15\,000}{(\theta_h + 273)} - \frac{15\,000}{(110 + 273)}\right)} \quad (1)$$

Puisque les produits chimiques d'amélioration des performances thermiques utilisés aujourd'hui contiennent de l'azote, qui n'est pas présent dans les pâtes de Kraft, le degré de modification chimique est déterminé par mesure de la quantité d'azote présente dans le papier traité. Les valeurs typiques de teneur en azote des papiers thermiquement améliorés sont comprises entre 1 % et 4 % lorsqu'elles sont mesurées selon la ASTM D-982.

NOTE Cette définition des Papiers Thermiquement Améliorés a été approuvée le 7 octobre 2003 par le groupe de travail du Comité transformateurs de l'IEEE.

3.13
circulation d'huile non dirigée
OF

indique que l'huile injectée et pompée par les échangeurs de chaleur ou les radiateurs circule librement à l'intérieur de la cuve, et n'est pas forcée à circuler à travers les enroulements (le débit d'huile à l'intérieur des enroulements peut être soit axial dans des canaux de refroidissement verticaux soit radial dans des canaux de refroidissement horizontaux avec ou sans circulation en zigzag)

3.14
circulation d'huile non dirigée
ON

indique que l'huile des échangeurs de chaleur ou des radiateurs circule librement à l'intérieur de la cuve et n'est pas forcée à circuler à travers les enroulements (le débit d'huile à l'intérieur des enroulements peut être soit axial dans des canaux de refroidissement verticaux soit radial dans des canaux de refroidissement horizontaux avec ou sans circulation en zigzag)

3.15
circulation d'huile dirigée
OD

Indique que la partie principale de l'huile pompée par les échangeurs de chaleur ou les radiateurs est forcée et dirigée à travers les enroulements (le débit d'huile à l'intérieur des enroulements peut être soit axial dans des canaux de refroidissement verticaux soit en zigzag dans des canaux de refroidissement horizontaux)

3.16
température ambiante de conception

température pour laquelle sont définies les valeurs autorisées pour l'échauffement moyen des enroulements, l'échauffement de l'huile au sommet et l'échauffement du point chaud par rapport à la température ambiante.

4 Symboles et abréviations

Symbole	Signification	Unités
<i>C</i>	Capacité thermique	Ws/K
<i>c</i>	Chaleur spécifique	Ws/(kg·K)
DP	Degré de polymérisation	
<i>D</i>	Opérateur de différence, dans les équations de différence	
<i>g_r</i>	Gradient de température entre l'enroulement moyen et l'huile moyenne (dans la cuve) au courant assigné	K
<i>m_A</i>	Masse de l'ensemble du noyau magnétique et des bobinages	kg
<i>m_T</i>	Masse de la cuve et des accessoires	kg
<i>m_O</i>	Masse d'huile	kg

Symbole	Signification	Unités
m_W	Masse des enroulements	kg
H	Facteur du point-chaud	
k_{11}	Constante du modèle thermique	
k_{21}	Constante du modèle thermique	
k_{22}	Constante du modèle thermique	
K	Facteur de charge (courant de charge/ courant assigné)	
L	Vieillessement total sur la période de temps considérée	h
n	Nombre de chaque intervalle de temps	
N	Nombre total d'intervalles durant la période de temps considérée	
OD	Soit refroidissement de type ODAN, ODAF ou ODWF	
OF	Soit refroidissement OFAN, OFAF soit refroidissement OFWF	
ON	Soit refroidissement de type ONAN ou ONAF	
P	Pertes fournies	W
P_e	Pertes dues aux courants de Foucault dans les enroulements exprimées en valeur relative	p.u.
P_W	Pertes dans l'enroulement	W
R	Rapport entre les pertes dues à la charge à courant assigné et les pertes à vide	
R_r	Rapport entre les pertes dues à la charge et les pertes à vide sur la prise principale	
R_{r+1}	Rapport entre les pertes dues à la charge et les pertes à vide sur la prise $r + 1$	
R_{\min}	Rapport entre les pertes dues à la charge et les pertes à vide sur la prise minimale	
R_{\max}	Rapport entre les pertes dues à la charge et les pertes à vide sur la prise maximale	
s	Opérateur de Laplace	
t	Variable de temps	min
tap_r	Numéro de la prise principale	
tap_{r+1}	Numéro de la prise $r + 1$	
tap_{\min}	Numéro de la prise minimale	
tap_{\max}	Numéro de la prise maximale	
V	Vitesse de vieillissement relatif	
V_n	Vitesse relative de vieillissement pendant l'intervalle n	
x	Puissance exponentielle des pertes totales pour le calcul de l'échauffement de l'huile supérieure (dans la cuve) (exposant huile)	
y	Puissance exponentielle du courant par rapport à l'échauffement des enroulements (exposant d'enroulement)	
θ_a	Température ambiante	°C
θ_E	Température ambiante pondérée annuelle	°C

Symbole	Signification	Unités
θ_h	Température du point-chaud	°C
θ_{ma}	Température moyenne mensuelle	°C
θ_{ma-max}	Température moyenne mensuelle du mois le plus chaud, selon la CEI 60076-2: 1993	°C
θ_o	Température de l'huile supérieure (dans la cuve) à la charge considérée	°C
θ_{ya}	Température moyenne annuelle, selon la CEI 60076-2:1993	°C
τ_o	Constante de temps d'huile moyenne	min
τ_w	Constante de temps d'enroulement	min
$\Delta\theta_{br}$	Échauffement de l'huile en bas (de cuve) à charge assignée (pertes à vide + pertes dues à la charge)	K
$\Delta\theta_h$	Gradient du point-chaud par rapport à l'huile supérieure (dans la cuve) pour la charge considérée	K
$\Delta\theta_{hi}$	Gradient du point-chaud par rapport l'huile supérieure (dans la cuve) au début	K
$\Delta\theta_{hr}$	Gradient du point-chaud par rapport l'huile supérieure (dans la cuve) pour le courant assigné	K
$\Delta\theta_o$	Échauffement de l'huile au sommet (dans la cuve) pour la charge considérée	K
$\Delta\theta_{oi}$	Échauffement de l'huile au sommet (dans la cuve) au début	K
$\Delta\theta_{om}$	Échauffement de l'huile moyenne (dans la cuve) pour la charge considérée	K
$\Delta\theta_{omr}$	Échauffement de l'huile moyenne (dans la cuve) pour charge assignée (pertes à vide + pertes dues à la charge)	K
$\Delta\theta_{or}$	Échauffement de l'huile au sommet (dans la cuve) en régime permanent pour les pertes assignées (pertes à vide + pertes en charge)	K
$\Delta\theta'_{or}$	Échauffement corrigé de l'huile au sommet (dans la cuve) dû à une enceinte	K
$\Delta(\Delta\theta_{or})$	Échauffement supplémentaire de l'huile au sommet (dans la cuve) dû à une enceinte	K

5 Effet d'un régime de charge au-delà des caractéristiques de la plaque signalétique

5.1 Introduction

L'espérance de vie normale est une base de référence conventionnelle pour un service continu à la température ambiante de conception et aux conditions de fonctionnement assignées. L'application d'une charge supérieure à celle de la plaque signalétique et/ou d'une température ambiante plus élevée que la température ambiante de conception implique un degré de risque et un vieillissement accéléré. C'est l'objet de la présente partie de la CEI 60076 d'identifier de tels risques et d'indiquer comment, dans certaines limites, les transformateurs peuvent être chargés au-delà des caractéristiques de la plaque signalétique. Ces risques peuvent être réduits par l'acheteur en spécifiant clairement les conditions de charge maximales et par le fournisseur en prenant celles-ci en compte dans la conception du fournisseur.

5.2 Conséquences générales

Un régime de charge d'un transformateur au-delà des valeurs de sa plaque signalétique a les conséquences suivantes.

- a) Les températures des enroulements, des calages, des connexions, des isolants et de l'huile vont augmenter, et peuvent atteindre des niveaux inacceptables.
- b) l'induction magnétique du flux de fuite en dehors du circuit magnétique augmente et provoque un accroissement de l'échauffement par courants de Foucault dans les parties métalliques embrassées par le flux de fuite.
- c) Comme la température varie, les taux d'humidité et teneurs en gaz dans l'isolation et dans l'huile sont modifiés.
- d) Les traversées, les changeurs de prises, les connexions d'extrémité de câble et les transformateurs de courant sont également soumis à des contraintes plus élevées qui réduisent leurs marges de conception et d'application.

La combinaison du flux principal et du flux de fuite accru restreint les possibilités de fonctionnement du circuit magnétique en surexcitation [1], [2], [3]¹.

NOTE Pour les transformateurs de type colonne siège d'un transit d'énergie provenant de l'enroulement extérieur (habituellement HT) vers l'enroulement intérieur (habituellement BT), l'induction magnétique maximale, résultant de la combinaison du flux principal et du flux de fuite dans le circuit magnétique, apparaît dans les culasses.

Comme le montrent les essais, ce flux est inférieur ou égal au flux produit par la même tension appliquée à vide aux bornes de l'enroulement extérieur du transformateur. Le flux magnétique dans les colonnes bobinées du circuit magnétique du transformateur chargé est fixé par la tension aux bornes de l'enroulement intérieur et est presque égal au flux produit par la même tension à vide.

Pour les transformateurs de type colonnes avec un transit d'énergie provenant de l'enroulement intérieur, l'induction magnétique maximale apparaît dans les colonnes bobinées du circuit magnétique. Sa valeur est légèrement supérieure à celle apparaissant pour la même tension appliquée à vide. L'induction dans les culasses est alors déterminée par la tension sur l'enroulement extérieur.

Il convient donc d'observer les tensions des deux côtés du transformateur en charge pendant les régimes de charge au-delà des caractéristiques de la plaque signalétique. Tant que les tensions qui alimentent un transformateur siège d'un transit de courant demeurent en dessous des limites indiquées dans l'article 4 de la CEI 60076-1, aucune restriction d'excitation n'est nécessaire durant la charge au-delà des caractéristiques de la plaque signalétique. Lorsque des excitations plus élevées se produisent pour maintenir la tension, en régime de secours, dans une zone où le réseau peut toujours être maintenu en service, alors il convient que les valeurs d'induction dans le circuit magnétique ne dépassent jamais les valeurs pour lesquelles le flux n'est plus canalisé dans celui-ci (pour les tôles à grains orientés laminées à froid ces effets de saturation commencent rapidement au-dessus de 1,9 T). Instantanément, les flux parasites peuvent alors causer de manière imprévisible des températures élevées sur la surface du circuit magnétique et dans les parties métalliques voisines telles que le système de serrage des enroulements ou même dans les enroulements, dus à la présence de composantes hautes fréquences dans le flux parasite. Ils peuvent mettre en péril le transformateur. En général, dans tous les cas, les temps de surcharge courts imposés par les enroulements sont suffisamment courts pour ne pas surchauffer le circuit magnétique en surexcitation. La grande constante de temps thermique du noyau évite ce phénomène.

Par conséquent il y aura un risque de défaillance prématurée lié à l'augmentation des courants et des températures. Ce risque peut être d'un caractère à court terme immédiat ou résulter de l'effet cumulatif du vieillissement thermique de l'isolation du transformateur sur de nombreuses d'années.

5.3 Effets et risques d'un régime de charge de secours de courte durée

Un régime de charge accru de courte durée conduira à une condition de service présentant un plus grand risque de défaillance. La surcharge de secours de courte durée peut occasionner un niveau de point-chaud dans les conducteurs, susceptible de conduire à une réduction provisoire de la rigidité diélectrique. Cependant, l'acceptation de cette condition pour une courte période peut être préférable à une perte d'alimentation. Ce type de charge se produit rarement et il convient de le réduire rapidement ou de déconnecter le transformateur rapidement afin d'éviter sa défaillance. La durée admissible de cette charge est plus courte que la constante de temps thermique du transformateur dans son ensemble et dépend de la température de fonctionnement avant l'augmentation de la charge; typiquement, elle serait inférieure à une demi-heure.

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie.