

SPÉCIFICATION TECHNIQUE

**CEI
IEC**

TECHNICAL SPECIFICATION

TS 60076-14

Première édition
First edition
2004-11

Transformateurs de puissance –

Partie 14:

**Conception et application des transformateurs
de puissance immergés dans du liquide utilisant
des matériaux isolants haute température**

Power transformers –

Part 14:

**Design and application of liquid-immersed
power transformers using high-temperature
insulation materials**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC/TS 60076-14:2004

Numérotation des publications

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

Editions consolidées

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

Informations supplémentaires sur les publications de la CEI

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

- Site web de la CEI (www.iec.ch)
- Catalogue des publications de la CEI

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

- IEC Just Published

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

- Service clients

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

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

Publication numbering

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

Consolidated editions

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

Further information on IEC publications

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

- IEC Web Site (www.iec.ch)
- Catalogue of IEC publications

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

- IEC Just Published

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

- Customer Service Centre

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

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

SPÉCIFICATION TECHNIQUE

**CEI
IEC**

TECHNICAL SPECIFICATION

TS 60076-14

Première édition
First edition
2004-11

Transformateurs de puissance –

Partie 14:

**Conception et application des transformateurs
de puissance immergés dans du liquide utilisant
des matériaux isolants haute température**

Power transformers –

Part 14:

**Design and application of liquid-immersed
power transformers using high-temperature
insulation materials**

© IEC 2004 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

W

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 Termes et définitions	14
4 Matériaux	18
4.1 Généralités.....	18
4.2 Isolation solide.....	18
4.3 Emaux pour isolation de fils.....	22
4.4 Liquides isolants	24
5 Systèmes d'isolation.....	28
5.1 Généralités.....	28
5.2 Types de système d'isolation.....	30
6 Limites de température.....	38
7 Accessoires de transformateur et compatibilité.....	42
7.1 Généralités.....	42
7.2 Traversées	42
7.3 Changeur de prise.....	42
7.4 Matériau de garniture	42
7.5 Peinture du réservoir.....	42
7.6 Refroidisseurs.....	42
7.7 Pompes.....	44
7.8 Conservateur.....	44
7.9 Adhésifs.....	44
7.10 Transformateurs de courant.....	44
7.11 Thermomètres et indicateurs de température.....	44
7.12 Relais Buchholz	44
8 Considérations de conception particulières.....	44
8.1 Considérations de court-circuit.....	44
8.2 Prescriptions diélectriques	46
8.3 Exigences relatives à la température.....	46
8.4 Surcharge	50
8.5 Effets des courants harmoniques.....	50
8.6 Système de conservation d'huile	50
9 Informations requises	50
9.1 Informations à fournir par l'acheteur	50
9.2 Informations à fournir par le constructeur	52
10 Plaque signalétique et informations supplémentaires.....	52
10.1 Plaque signalétique.....	52
10.2 Manuel du transformateur.....	54

CONTENTS

FOREWORD.....	7
INTRODUCTION.....	11
1 Scope.....	13
2 Normative references	13
3 Terms and definitions	15
4 Materials	19
4.1 General	19
4.2 Solid insulation.....	19
4.3 Wire enamel insulation	23
4.4 Insulating liquids	25
5 Insulation systems.....	29
5.1 General	29
5.2 Insulation system types	31
6 Temperature limits.....	39
7 Transformer accessories and compatibility	43
7.1 General	43
7.2 Bushings	43
7.3 Tap-changer.....	43
7.4 Gasket material	43
7.5 Tank painting	43
7.6 Coolers	43
7.7 Pumps.....	45
7.8 Conservator	45
7.9 Adhesives	45
7.10 Current transformers	45
7.11 Temperature gauges and indicators.....	45
7.12 Buchholz relays.....	45
8 Special design considerations	45
8.1 Short-circuit considerations	45
8.2 Dielectric requirements.....	47
8.3 Temperature requirements	47
8.4 Overload	51
8.5 Effects of harmonic currents.....	51
8.6 Oil preservation system.....	51
9 Required Information	51
9.1 Information to be provided by the purchaser.....	51
9.2 Information to be provided by the manufacturer.....	53
10 Rating plate and additional information.....	53
10.1 Rating plate.....	53
10.2 Transformer manual	55

11 Essais	54
11.1 Généralités.....	54
11.2 Prescriptions générales pour les essais individuels, les essais de type et les essais spéciaux.....	54
11.3 Essai d'échauffement	54
11.4 Essais de type diélectrique.....	58
12 Surveillance, diagnostics et maintenance	58
12.1 Introduction	58
12.2 Transformateurs remplis d'huile minérale isolante	58
12.3 Transformateurs remplis de liquides isolants à haute température.....	60
Annexe A (informative) Calcul de la température de génération de bulles	62
Annexe B (informative) Evolution des températures de transformateur pour les Tableaux 4 et 5.....	72
Bibliographie.....	74
Figure 1 – Illustration de l'isolation solide dans un système d'isolation homogène	30
Figure 2 – Illustration de l'isolation solide dans un système à isolation hybride.....	32
Figure 3 – Illustration de l'isolation solide dans un système à isolation semi-hybride	34
Figure 4 – Illustration de l'isolation solide dans un système d'isolation mélangé	36
Figure 5 – Gradient thermique du conducteur au liquide.....	48
Figure 6 – Schéma de température modifié pour les enroulements avec système d'isolation mixte.....	56
Figure A.1 – Diagramme de température d'évolution des bulles	64
Figure A.2 – Courbes d'équilibre d'humidité pour cellulose et huile minérale.....	66
Figure A.3 – Courbes d'équilibre d'humidité logarithmiques pour cellulose et huile minérale	68
Figure A.4 – Teneur en eau du papier par rapport à la température d'évolution des bulles pour les paramètres de l'exemple	70
Tableau 1 – Propriétés typiques de matériaux isolants solides.....	20
Tableau 2 – Emaux typiques pour isolation de fils.....	22
Tableau 3 – Propriétés typiques des liquides isolants	26
Tableau 4 – Limites de température pour transformateurs avec liquide isolant minéral	40
Tableau 5 – Limites de température pour transformateurs avec liquides haute température	40

11	Testing	55
11.1	General	55
11.2	General requirements for routine, type and special tests	55
11.3	Temperature-rise test	55
11.4	Dielectric type tests	59
12	Supervision, diagnostics, and maintenance	59
12.1	Introduction	59
12.2	Transformers filled with mineral insulating oil	59
12.3	Transformers filled with high-temperature insulating liquids	61
	Annex A (informative) Calculation of bubble generation temperature	63
	Annex B (informative) Transformer temperature development for Tables 4 and 5	73
	Bibliography	75
	Figure 1 – Illustration of solid insulation in a homogeneous insulation system	31
	Figure 2 – Illustration of solid insulation in a hybrid insulation system	33
	Figure 3 – Illustration of solid insulation in a semi-hybrid insulation system	35
	Figure 4 – Illustration of solid insulation in a mixed insulation system	37
	Figure 5 – Temperature gradient conductor to liquid	49
	Figure 6 – Modified temperature diagram for windings with mixed insulation system	57
	Figure A.1 – Bubble evolution temperature chart	65
	Figure A.2 – Moisture equilibrium curves for cellulose and mineral oil	67
	Figure A.3 – Logarithmic moisture equilibrium curves for cellulose and mineral oil	69
	Figure A.4 – Water content of paper versus bubble evolution temperature for parameters taken from the example	71
	Table 1 – Typical properties of solid insulation materials	21
	Table 2 – Typical enamels for wire insulation	23
	Table 3 – Typical properties of insulating liquids	27
	Table 4 – Temperature limits for transformers with mineral insulating liquid	41
	Table 5 – Temperature limits for transformers with high-temperature liquids	41

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE –

**Partie 14: Conception et application
des transformateurs de puissance immergés dans du liquide
utilisant des matériaux isolants haute température**

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 tâche principale des comités d'études de la CEI est d'établir des Normes Internationales. Dans des circonstances exceptionnelles, un comité d'études peut proposer la publication d'une spécification technique lorsque

- le soutien nécessaire ne peut pas être obtenu pour la publication d'une norme internationale, en dépit d'efforts répétés, ou
- Le sujet en est encore en évolution d'un point de vue technique ou, pour toute autre raison, il existe une possibilité dans l'avenir mais pas dans l'immédiat pour un accord sur une norme internationale.

Les spécifications techniques sont révisées dans les trois années qui suivent leur publication pour décider si elles peuvent être transformées en normes internationales.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

POWER TRANSFORMERS –

**Part 14: Design and application
of liquid-immersed power transformers
using high-temperature insulation materials**

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.

The main task of IEC technical committees is to prepare International Standards. In exceptional circumstances, a technical committee may propose the publication of a technical specification when

- the required support cannot be obtained for the publication of an International Standard, despite repeated efforts, or
- The subject is still under technical development or where, for any other reason, there is the future but no immediate possibility of an agreement on an International Standard.

Technical specifications are subject to review within three years of publication to decide whether they can be transformed into International Standards.

La CEI 60076-14, qui est une spécification technique, a été établie par le comité 14 de la CEI: Transformateurs de puissance.

Le texte de cette spécification technique est issu des documents suivants:

Projet d'enquête	Rapport de vote
14/468/DTS	14/482/RVC

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

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

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

- Partie 1: Généralités
- Partie 2: Echauffement
- Partie 3: Niveaux d'isolement, essais diélectriques et distances d'isolement dans l'air
- Partie 4: Guide pour les essais au choc de foudre et au choc de manœuvre – Transformateurs de puissance et bobines d'inductance
- Partie 5: Tenue au court-circuit
- Partie 8: Guide d'application
- Partie 10: Détermination des niveaux de bruit
- Partie 11: Transformateurs de type sec
- Partie 14: Conception et application des transformateurs de puissance immergés dans du liquide utilisant des matériaux isolants haute température

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

- transformée en Norme internationale;
- reconduite;
- supprimée;
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

IEC 60076-14, which is a technical specification, has been prepared by IEC technical committee 14: Power transformers.

The text of this technical specification is based on the following documents:

Enquiry draft	Report on voting
14/468/DTS	14/482/RVC

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

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

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

- Part 1: General
- Part 2: Temperature rise
- Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air
- Part 4: Guide to the lightning impulse and switching impulse testing – Power transformers and reactors
- Part 5: Ability to withstand short circuit
- Part 8: Application guide
- Part 10: Determination of sound levels
- Part 11: Dry-type transformers
- Part 14: Design and application of liquid-immersed power transformers using high-temperature insulation materials

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

- transformed into an International Standard;
- reconfirmed;
- withdrawn;
- replaced by a revised edition, or
- amended.

INTRODUCTION

Les conducteurs d'enroulement des transformateurs immergés dans du liquide ont été dans le passé isolés par du papier cellulosique ou par de l'émail. Des produits en cellulose ont également constitué des matériaux isolants. Dans la plupart des cas, le liquide isolant était de l'huile minérale isolante. Ces matériaux sont toujours prédominants.

L'échauffement moyen des enroulements a été limité pendant plusieurs dizaines d'années à 65/70 K et l'échauffement de l'huile maximal à 60 K, comme spécifié dans la CEI 60076-2.

La plupart de l'expérience accumulée en matière de transformateurs en service est basée sur ces matériaux et ces limites de température. Dans certains cas, les limitations d'espace ou de masse exigent du concepteur de réduire les dimensions du transformateur avec, en conséquence, des échauffements plus élevés. L'application de matériaux (tant solides que liquides) avec de meilleures propriétés de vieillissement à des températures supérieures à celles des températures traditionnelles est nécessaire pour assurer une espérance de vie acceptable. Des matériaux haute température ont de temps à autre été utilisés dans certaines parties des enroulements là où l'on avait prévu une température élevée.

Des mesures de température récentes au moyen de fibres optiques ont indiqué que la température du point chaud peut parfois être supérieure à celle qui est prédite, et dans certains cas considérablement plus élevée. Cela a engendré des préoccupations en ce qui concerne le taux de vieillissement plus élevé que prévu. Les mesures ont indiqué l'emplacement des points chauds, ainsi que celui de l'application de matériaux haute température.

Une isolation haute température, d'émail et de rubanage pour les conducteurs, à l'entretoise et aux matériaux de support mécanique est déjà utilisé dans les grands transformateurs de puissance, les petits transformateurs de puissance, les transformateurs mobiles, les transformateurs de locomotives et les transformateurs redresseurs. Des fluides appropriés pour des températures supérieures à celles de l'huile minérale isolante traditionnelle sont également disponibles. Pendant de nombreuses années, les constructeurs ont répondu aux besoins d'applications spéciales en construisant des transformateurs avec des matériaux haute température afin d'obtenir un poids réduit, une densité de puissance supérieure ou une durée de vie accrue.

L'objet de la présente spécification technique est de fournir des informations sur les types de matériaux disponibles et d'attirer l'attention sur les matières spécifiquement attribuées aux températures supérieures.

INTRODUCTION

Winding conductors in liquid-immersed transformers have historically been insulated by cellulosic paper or enamel. Other solid insulation materials have also been cellulose products. The insulation liquid has, for the most part been mineral insulating oil. These materials are still predominant.

The average temperature rise in windings for several tens of years has been limited to 65/70 K and the top oil temperature rise to 60 K, as specified in IEC 60076-2.

Most of the accumulated experience of transformers in service is based on these materials and these temperature limits. In some cases, space or weight limitations require the designer to reduce the transformer dimensions with higher temperature rises as a consequence. The application of materials (both solid and liquid) with better ageing properties at more elevated temperatures than the traditional ones is necessary in order to provide an acceptable life expectancy. High-temperature materials have also occasionally been used in certain parts of the windings where high temperature has been expected.

Recent temperature measurements by means of fibre-optics have indicated that the hot-spot temperature may sometimes be higher than predicted, and in certain cases considerably higher. This has created concern regarding higher rate of ageing than expected. The measurements have provided knowledge regarding where the hot-spots are situated and where high-temperature materials might be applied.

High-temperature insulation, from enamel and tape wrap for conductors, to spacer and mechanical support materials are already used in large power, smaller distribution, mobile, locomotive and rectifier transformers. Fluids suitable for temperatures higher than that of conventional mineral insulating oil are also available. For many years, manufacturers have met the needs of special applications by designing transformers using high-temperature materials to achieve lighter weight, higher power density or increased life.

The purpose of this technical specification is to provide information on types of available materials and to draw attention to topics specifically attributed to the higher temperatures.

TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE –

Partie 14: Conception et application des transformateurs de puissance immergés dans du liquide utilisant des matériaux isolants haute température

1 Domaine d'application

La présente spécification technique fournit des informations pour la spécification, l'étude, les essais et le chargement à utiliser tant par le constructeur que par l'utilisateur de transformateurs de puissance immergés dans du liquide utilisant une isolation haute température ou des combinaisons d'isolation haute température et traditionnelle.

Elle s'applique aux:

- transformateurs de puissance conçus conformément à la CEI 60076-1;
- transformateurs de conversion conçus conformément à la CEI 61378;
- transformateurs de four à arc,

et elle traite de l'utilisation de différentes combinaisons d'isolants liquides et solides.

Les normes des transformateurs de traction relèvent du comité d'études 9 de la CEI, mais cette spécification technique peut toutefois s'appliquer à titre de guide pour l'utilisation de matériaux isolants haute température dans les transformateurs de traction.

2 Références normatives

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

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

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

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

CEI 60296, *Spécification des huiles minérales isolantes neuves pour transformateurs et appareillage de connexion*

CEI 60317 (toutes les parties), *Spécifications pour types particuliers de fils de bobinage*

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

CEI 60554-3, *Spécification pour papiers cellulosiques à usages électriques – Partie 3: Spécifications pour matériaux particuliers*

CEI 60641-3, *Spécification pour le carton comprimé et le papier comprimé à usages électriques – Partie 3: Spécifications pour matériaux particuliers*

POWER TRANSFORMERS –

Part 14: Design and application of liquid-immersed power transformers using high-temperature insulation materials

1 Scope

This technical specification provides design, testing and loading information for use by both the manufacturer and user of liquid-immersed power transformers using either high-temperature insulation or combinations of high-temperature and conventional insulation.

It is applicable to

- power transformers designed in accordance with IEC 60076-1;
- convertor transformers designed to IEC 61378;
- arc furnace transformers,

and covers the use of various liquid and solid insulation combinations.

Whilst standards for traction transformers fall under the authority of IEC Technical Committee 9, this specification however may be applicable as a guideline for the use of high-temperature insulation materials in traction transformers.

2 Normative references

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

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

IEC 60076-2, *Power transformers – Part 2: Temperature rise*

IEC 60076-5, *Power transformers – Part 5: Ability to withstand short-circuit*

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

IEC 60317 (all parts), *Specifications for particular types of winding wires*

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

IEC 60554-3, *Specification for cellulosic papers for electrical purposes – Part 3: Specifications for individual materials*

IEC 60641-3, *Specification for pressboard and presspaper for electrical purposes – Part 3: Specifications for individual materials*

CEI 60674-3, *Spécification pour les films en matière plastique à usages électriques – Partie 3: Spécifications pour matériaux particuliers*

CEI 60819-3, *Spécification pour papiers non cellulosiques à usages électriques – Partie 3: Spécifications pour matériaux particuliers*

CEI 60836, *Spécifications pour liquides silicones pour usages électriques*

CEI 60851-4, *Fils de bobinage – Méthodes d'essai – Partie 4: Propriétés chimiques*

CEI 60867, *Isolants liquides – Spécifications pour liquides neufs à base d'hydrocarbures aromatiques de synthèse*

CEI 60893-3 (toutes les parties), *Spécifications pour les stratifiés industriels rigides en planches à base de résines therm durcissables à usages électriques – Spécifications pour matériaux particuliers*

CEI 60944, *Guide de maintenance des liquides silicones pour transformateurs*

CEI 61099, *Spécifications pour esters organiques de synthèse neufs à usages électriques*

CEI 61100, *Classification des isolants liquides selon le point de feu et le pouvoir calorifique inférieur*

CEI 61203, *Esters organiques de synthèse à usages électriques – Guide de maintenance des esters pour transformateurs dans les matériels*

CEI 61212-3, *Tubes et barres industriels, rigides, ronds, stratifiés, à base de résines therm durcissables à usages électriques – Partie 3: Spécifications pour matériaux particuliers*

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

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

CEI 61629-1, *Carton comprimé aramide à usages électriques – Partie 1: Définitions, désignations et prescriptions générales*

ISO 2592, *Produits pétroliers – Détermination des points d'éclair et de feu – Méthode Cleveland en vase ouvert*

ISO 2719, *Produits pétroliers – Détermination du point d'éclair – Méthode Pensky-Martens en vase clos*

IEEE 62, *IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Electric Power Apparatus – Part 1: Oil Filled Power Transformers, Regulators and Reactors*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions donnés dans la CEI 60076-1 et la CEI 60076-2, ainsi que les définitions suivantes s'appliquent.

IEC 60674-3, *Plastic films for electrical purposes – Part 3: Specifications for individual materials*

IEC 60819-3, *Non-cellulosic papers for electrical purposes – Part 3: Specifications for individual materials*

IEC 60836, *Specifications for silicone liquids for electrical purposes*

IEC 60851-4, *Winding wires – Test methods – Part 4: Chemical properties*

IEC 60867, *Specifications for unused liquids based on synthetic aromatic hydrocarbons*

IEC 60893-3 (all parts), *Insulating materials – Industrial rigid laminated sheets based on thermosetting resins for electrical purposes*

IEC 60944, *Guide for the maintenance of silicone transformer liquids*

IEC 61099, *Specifications for unused synthetic organic esters for electrical purposes*

IEC 61100, *Classification of insulating liquids according to fire point and net calorific value*

IEC 61203, *Synthetic organic esters for electrical purposes – Guide for maintenance of transformer esters in equipment*

IEC 61212-3, *Industrial rigid round laminated tubes and rods based on thermosetting resins for electrical purposes – Part 3: Specifications for individual materials*

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

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

IEC 61629-1, *Aramid pressboard for electrical purposes – Part 1: Definitions, designations and general requirements*

ISO 2592, *Determination of flash and fire points – Cleveland open cup method*

ISO 2719, *Determination of flash-point – Pensky-Martins closed cup*

IEEE 62, *IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Electric Power Apparatus – Part 1: Oil Filled Power Transformers, Regulators and Reactors*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the definitions prescribed in IEC 60076-1 and IEC 60076-2 apply with the following additions.

3.1

système d'isolation

système composé de matériaux isolants solides et de liquide isolant

3.2

système à isolation hybride

matériau isolant solide haute température à proximité de tous les conducteurs d'enroulement (y compris toute isolation de conducteur, les entretoises, bandes et cylindres en contact direct avec l'enroulement) et matériaux en cellulose dans des zones à basse température où les limites de la classe thermique 105 sont respectées

3.3

système à isolation semi-hybride

matériaux haute température utilisés uniquement pour l'isolant du conducteur

3.4

isolation mixte

matériau isolant solide de haute température à proximité de tous les conducteurs d'enroulement situés dans des régions plus chaudes (y compris toute isolation de conducteur et, si nécessaire, les entretoises, les bandes et les cylindres en contact direct avec ces conducteurs) et les matériaux en cellulose dans le reste de l'enroulement et autres zones à basse température où les limites 105 de la classe thermique sont respectées

3.5

isolation homogène

isolation d'enroulement, isolation principale et isolation de noyau de la même classe thermique qui peut être une classe traditionnelle ou une classe haute température

3.6

isolation solide haute température

isolation solide prévue pour fonctionner en permanence à des températures supérieures à celles de la classe thermique 105

3.7

isolation liquide haute température

isolation liquide de refroidissement et diélectrique assurant un fonctionnement continu à des températures supérieures à celles de la capacité de l'huile minérale isolante de transformateur

3.8

isolation traditionnelle

huile minérale isolante de transformateur et isolation cellulosique améliorée sans traitement thermique

3.9

classe thermique

désignation d'un système d'isolation électrique (EIS) égal à la valeur numérique de la température de service maximale en degrés Celsius (°C) pour laquelle l'EIS est adapté

3.10

température de référence

échauffement de la température d'enroulement moyenne assignée plus 20 °C (10 °C pour un échauffement d'enroulement moyen de 65 K)

3.1**insulation system**

system composed of solid insulating materials and an insulating liquid

3.2**hybrid insulation system**

high-temperature solid insulation material adjacent to all winding conductors (including all conductor insulation, spacers, strips and cylinders in direct contact with the winding) and cellulose materials in lower temperature areas where thermal class 105 limits are met

3.3**semi-hybrid insulation system**

high-temperature materials used only for conductor insulation

3.4**mixed insulation system**

high-temperature solid insulation material adjacent to the winding conductors located in the hotter regions (including all conductor insulation and, if necessary, spacers, strips and cylinders in direct contact with these conductors) and cellulose materials in the rest of the winding and other lower temperature areas where thermal class 105 limits are met

3.5**homogeneous insulation system**

winding insulation, main insulation and core insulation of the same thermal class having either conventional or high-temperature class

3.6**high-temperature solid insulation**

solid insulation designed to continuously operate at temperatures in excess of thermal class 105

3.7**high-temperature liquid insulation**

liquid dielectric and cooling insulation capable of continuous operation at temperatures above the capability of transformer mineral insulating oil

3.8**conventional insulation**

transformer mineral insulating oil and non-thermally upgraded cellulose insulation

3.9**thermal class**

designation of an electrical insulation system (EIS) that is equal to the numerical value of the maximum use temperature in degrees Celsius (°C) for which the EIS is appropriate

3.10**reference temperature**

rated average winding temperature rise plus 20 °C (10 °C for 65 K average winding temperature rise)

4 Matériaux

4.1 Généralités

Cet article indique un nombre de matériaux isolants électriques haute température uniquement à titre de référence. L'inclusion de ces matériaux n'implique pas l'adéquation d'une combinaison spécifique en vue d'utilisation dans des applications de transformateurs haute température immergés dans du liquide.

Les matériaux solides actuellement disponibles sont répertoriés au Tableau 1 avec des paramètres et des caractéristiques typiques nécessaires pour assurer une évaluation appropriée. Il est important de noter qu'il convient d'obtenir les paramètres théoriques spécifiques pour le matériau sélectionné auprès du constructeur du produit en question. Les matériaux isolants peuvent être convenablement séparés en matériaux solides, liquides et émaux pour fils selon les besoins.

Il convient d'évaluer la compatibilité de chaque matériau par rapport aux autres matériaux du système et non uniquement sa capacité thermique. Il convient également de noter que la capacité thermique de matériaux individuels peut s'avérer satisfaisante, mais que l'interaction des éléments individuels du système risque de rendre le système inacceptable.

4.2 Isolation solide

L'isolation solide est disponible sous forme de papier, de film, de feuille et de carton et en différentes formes selon les applications mécaniques utilisées dans la structure diélectrique. Le Tableau 1 énumère les matériaux facilement disponibles, ainsi que les paramètres typiques. Le tableau comprend également les produits basés sur la cellulose à titre de référence, dans la mesure où l'isolation solide haute température est définie par rapport à la capacité thermique de la cellulose. Noter que ces informations de performance typique sont basées sur les composants testés individuellement en tant qu'échantillons isolés dans l'air. La performance diélectrique et thermique en tant que système, lors de l'immersion dans le liquide isolant sélectionné peut être nettement différente des valeurs des composants et de celles en rapport avec l'impregnation dans un liquide spécifique.

Il ne faut pas non plus supposer que la classe thermique du système passera automatiquement par défaut à la classe de température la plus basse des composants individuels du système. Au contraire, la capacité thermique privilégiera souvent le composant de température la plus élevée. Toutefois, il est recommandé que la classe thermique de composant individuel fournisse un guide approprié pour la mise en place correcte des différents matériaux dans la conception de l'isolation.

4 Materials

4.1 General

This clause lists many high-temperature electrical insulation materials for reference purposes only. The appearance of these materials does not imply that any specific combination is suitable for use in high-temperature liquid-immersed transformer applications.

Common solid materials currently available are listed in Table 1 along with typical parameters and characteristics, which are necessary for proper evaluation. It is important to note that design parameters specific to the material selected should be obtained from the manufacturer of the product. The insulation materials may be conveniently separated into solids, wire enamels and liquids.

Each material should be evaluated for compatibility with other materials in the system and not only for thermal capability. It should also be noted that whilst the thermal capability of the individual materials may be satisfactory, the interaction of these individual elements in the system might render the system unacceptable.

4.2 Solid insulation

Solid insulation is available in the form of paper, film, sheet and board as well as various shapes for mechanical applications used within the dielectric structure. Table 1 lists many readily available materials, along with typical parameters. The table also includes cellulose-based products for reference purposes, since high-temperature solid insulation is defined relative to the thermal capability of cellulose. Note that this typical performance information is based on components tested individually as isolated samples in air. Dielectric and thermal performance as a system, when immersed in the selected insulating liquid may be substantially different from the component values and the values associated with impregnation in a specific liquid.

It should also not be assumed that the system thermal class would necessarily default to the lowest temperature class of the system's individual components. On the contrary, the thermal capability will often favour the highest temperature component. However, the individual component thermal class should provide guidance in the proper placement of the various materials within the insulation design.

Tableau 1 – Propriétés typiques de matériaux isolants solides

Matériau	Classe thermique	Référence de la norme CEI	Permittivité relative à 25 °C	Facteur de dissipation (%)		Absorption d'humidité (%)	Densité (g/cm ³)	Forme
				à 25 °C	à 100 °C			
Cellulose	105	60554-3	3,3 – 4,1	0,4	1,0	7,0	0,97 – 1,2	Papier
Cellulose	105	60641-3	2,9 – 4,6	0,4	1,0	7,0	0,8 – 1,35	Carton
Polyester de verre ¹⁾	130 – 200	60893-3	4,8	1,3 – 7,0	N/A	0,2 – 1,1	1,8 – 2,0	Feuille
Polyester de verre ¹⁾	130 – 220	61212-3	N/A	N/A	N/A	0,16 – 0,28	1,8 – 2,0	Formes
Polyimide	220	60674-3	3,4	0,2	0,2	1,0 – 1,8	1,33 – 1,42	Film
Aramide	220	60819-3	1,6 – 3,2	0,5	0,5	5,0	0,72 – 1,10	Papier
Aramide	220	61629-1	2,6 – 3,5	0,5	0,5	5,0	0,70 – 1,15	Carton

NOTE 1 Toutes les données proviennent de mesures prises dans l'air.

NOTE 2 Les données de permittivité relative et du facteur de dissipation sont référencées à 50/60 Hz.

NOTE 3 Les données d'humidité sont basées sur un air d'humidité relative de 50 %.

¹⁾ Typiquement uniquement utilisé dans des applications basse tension par suite de l'air éventuellement emprisonné pendant le processus de fabrication.

Table 1 – Typical properties of solid insulation materials

Material	Thermal class	IEC standard reference	Relative permittivity at 25 °C	Dissipation factor (%)		Moisture absorption (%)	Density (g/cm ³)	Form
				At 25 °C	At 100 °C			
Cellulose	105	60554-3	3,3 – 4,1	0,4	1,0	7,0	0,97 – 1,2	Paper
Cellulose	105	60641-3	2,9 – 4,6	0,4	1,0	7,0	0,8 – 1,35	Board
Polyester glass ¹⁾	130 – 200	60893-3	4,8	1,3 – 7,0	N/A	0,2 – 1,1	1,8 – 2,0	Sheet
Polyester glass ¹⁾	130 – 220	61212-3	N/A	N/A	N/A	0,16 – 0,28	1,8 – 2,0	Shapes
Polyimide	220	60674-3	3,4	0,2	0,2	1,0 – 1,8	1,33 – 1,42	Film
Aramid	220	60819-3	1,6 – 3,2	0,5	0,5	5,0	0,72 – 1,10	Paper
Aramid	220	61629-1	2,6 – 3,5	0,5	0,5	5,0	0,70 – 1,15	Board

NOTE 1 All data has been taken from measurements in air.

NOTE 2 Relative permittivity and dissipation factor data are referenced to 50/60 Hz.

NOTE 3 Moisture data is based on air having a relative humidity of 50 %.

1) Typically only used in lower voltage applications due to possible air entrapment during the manufacturing process.

4.3 Emaux pour isolation de fils

La liste du Tableau 2 indique une large gamme d'émaux isolants disponibles utilisés pour revêtir les fils de bobinage tant ronds que rectangulaires en cuivre et en aluminium. Des informations complémentaires peuvent être trouvées dans les parties applicables spécifiques de la série CEI 60317. Il y a lieu de noter que l'inclusion d'un revêtement dans cette liste n'implique pas la compatibilité avec aucun des nombreux liquides diélectriques disponibles. Les procédures pour vérifier la compatibilité avec différents liquides sont définies dans la CEI 60851-4.

Tableau 2 – Emaux typiques pour isolation de fils

Acronyme commun	Nom commun	Nom chimique	Classe thermique	Partie applicable de la CEI 60317
PVF	Formol de polyvinyle	Acétal de polyvinyle	105 120	1, 17 12, 18
UEW	Polyuréthane	Polyuréthane	130 155 180	2, 4 20, 35 51
UEWN	Nylon sur polyuréthane	Polyuréthane avec revêtement de polyamide	130 155	19 21
PEW	Polyester	Polyester	130 155	34 3, 16, 54
PEWN HPEWN	Nylon sur polyester	Polyester avec revêtement de polyamide	180	22
EIW	Polyestérimide	Polyestérimide	180	8, 15, 23, 28, 36, 37
HPEAIW	Polyamideimide de polyester	Polyamideimide de polyester	200	13, 25, 29, 38
EAIW	Amide-imide sur polyestérimide	Polyestérimide avec revêtement de polyamideimide	200	13, 25, 29, 38
	Polyamide sur polyestérimide	Polyestérimide avec revêtement de polyamide	180	22
AIW	Polyamideimide	Polyamideimide aromatique	200	26
PIW	Polyimide	Polyimide aromatique	220	7, 30
Les isolations de fils suivantes ne sont pas définies par les normes CEI				
Epoxy	Epoxy	Epoxy	155	N/A
PPSU PAES	Polyphénylsulfone	Polyaryléthersulfone	155	N/A
PAS	Polyarylsulfone	Polyarylsulfone	180	N/A
PEEK	Polyaryléther-éthercétone	Polyarylétherethercétone	220	N/A
NOTE Classe thermique à l'air conformément à la CEI 60317.				

4.3 Wire enamel insulation

The list in Table 2 shows a broad range of available insulating enamels used to coat both round and rectangular copper and aluminium winding wires. Additional information may be found in the specific applicable parts of the IEC 60317 series. Note that the appearance of a coating in this list does not imply compatibility with any of the many available dielectric liquids. Procedures for verifying compatibility with different liquids are defined in IEC 60851-4.

Table 2 – Typical enamels for wire insulation

Common acronym	Common name	Chemical name	Thermal class	IEC 60317 applicable part
PVF	Polyvinyl formal	Polyvinyl acetal	105 120	1, 17 12, 18
UEW	Polyurethane	Polyurethane	130 155 180	2, 4 20, 35 51
UEWN	Nylon over polyurethane	Polyurethane with polyamide overcoat	130 155	19 21
PEW	Polyester	Polyester	130 155	34 3, 16, 54
PEWN HPEWN	Nylon over polyester	Polyester with polyamide overcoat	180	22
EIW	Polyesterimide	Polyesterimide	180	8, 15, 23, 28, 36, 37
HPEAIW	Polyester polyamide-imide	Polyester polyamide-imide	200	13, 25, 29, 38
EAIW	Amide-imide over polyesterimide	Polyesterimide with polyamide-imide overcoat	200	13, 25, 29, 38
	Polyamide over polyesterimide	Polyesterimide with polyamide overcoat	180	22
AIW	Polyamide-imide	Aromatic polyamide-imide	200	26
PIW	Polyimide	Aromatic polyimide	220	7, 30
The following wire insulations are not defined by IEC standards				
Epoxy	Epoxy	Epoxy	155	N/A
PPSU PAES	Polyphenylsulfone	Polyarylethersulfone	155	N/A
PAS	Polyarylsulfone	Polyarylsulfone	180	N/A
PEEK	Polyarylether-etherketone	Polyaryletheretherketone	220	N/A
NOTE Thermal class in air according to IEC 60317.				

4.4 Liquides isolants

Le Tableau 3 indique les caractéristiques de performance typiques des liquides diélectriques facilement disponibles qui sont utilisés dans les transformateurs immergés dans du liquide. L'huile minérale isolante, conforme à la CEI 60296 est le liquide le plus commun utilisé dans les transformateurs et il est généralement la référence de performance à laquelle tous les autres liquides sont comparés. Ce liquide est également la référence pour comparer la performance à haute température.

La CEI 61100 fournit des règles pour le classement des liquides selon le point de feu et le pouvoir calorifique. Un point de feu supérieur à 300 °C, comme déterminé selon l'ISO 2592 classe le liquide dans la Classe K. Cependant, ni le point éclair ni le point de feu ne définit des possibilités à haute température. Le développement de boue, l'affinité à l'humidité ainsi que le taux d'oxydation affectent les possibilités thermiques d'un liquide. Il convient de contacter le fabricant du liquide pour déterminer si un produit spécifique convient pour une utilisation à des températures plus élevées que l'huile isolante minérale conventionnelle, dans la mesure où il peut dépendre de certains additifs qui peuvent ne pas être présents dans tous les produits dans la même catégorie générique.

Les températures de fonctionnement maximales énumérées dans le Tableau 3 sont fournies uniquement comme un point de départ pour d'autres études, dans la mesure où il n'existe aucune procédure généralement reconnue pour établir un indice thermique pour les liquides isolants. Ces températures sont estimées ou généralement acceptées par l'industrie, mais il convient de ne pas les prendre comme des recommandations de cette spécification technique.

4.4 Insulating liquids

Table 3 shows typical performance characteristics of readily available dielectric liquids that are used in liquid-immersed transformers. Mineral insulating oil, complying with IEC 60296 is the most common liquid used in transformers and is generally the performance reference to which all other liquids are compared. This liquid is also the reference for comparing high-temperature performance.

IEC 61100 provides rules for classifying liquids according to fire point and calorific value. A fire point greater than 300 °C, as determined according to ISO 2592 classifies the liquid as Class K. However, neither the flash point nor the fire point defines high-temperature capability. Sludge development, affinity to moisture and rate of oxidation all affect the thermal capability of a liquid. The liquid manufacturer should be contacted to determine if a specific product is suitable for use at higher temperatures than conventional mineral insulating oil, since it may depend on certain additives that may not be present in all products in the same generic category.

The maximum operating temperatures listed in Table 3 are provided only as a starting point for further investigation, since there is no generally accepted procedure for establishing a thermal index for insulating liquids. These temperatures are estimated or generally accepted by the industry, but should not be taken as recommendations of this specification.

Tableau 3 – Propriétés typiques des liquides isolants

Nom générique	Référence de la norme CEI	Température de service maximale estimée (°C)	Point d'éclair ³⁾ (°C)	Point de feu ³⁾ (°C)	Teneur en eau (mg/kg)	Densité à 25 °C (g/cm ³)	Permittivité relative ⁴⁾ à 25 °C	Facteur de dissipation ⁴⁾ à 25 °C (%)	Viscosité cinématique (mm ² /s)		Conductivité thermique à 25 °C (W/mK)	Chaleur massique à 25 °C (J/kg °C)
									à 60 °C	à 100 °C		
Huile minérale isolante	60296	105	145	160	25	0,88	2,2	0,05	15	2,3	0,12	2 100
Hydrocarbure synthétique	60867	~130 ¹⁾	230	250	15	0,83	2,1	0,01	10,1	4,1	0,14	2 100
Ester synthétique	61099	~130 ^{1) 2)}	275	310	50	0,97	3,2	0,02	33	5,8	0,16	2 100
Silicone diméthyl	60836	~155 ^{1) 2)}	310	360	50	0,96	2,7	0,01	30	14,3	0,15	1 500
Bien que les liquides suivants soient utilisés dans certaines applications de transformateur, ils ne sont pas encore définis par les normes CEI												
Hydrocarbure synthétique PAO	N/A	~130 ¹⁾	264	304	15	0,83	2,1	0,01	26,5	8,6	0,13	2 300
Hydrocarbure à poids moléculaire élevé	N/A	~130 ¹⁾	280	312	10	0,87	2,2	0,01	40,3	11,8	0,14	2 100
Ester agricole	N/A	~130 ¹⁾	330	360	50	0,91	3-2	0,05	N/A	9	0,17	2 000

NOTE Les valeurs de ce tableau sont uniquement fournies en tant que guide général pour la comparaison des différents liquides. Pour les propriétés physiques et les limites d'acceptation des liquides, se reporter à la norme CEI indiquée pour chaque liquide. Il convient de vérifier les propriétés physiques et les limites d'acceptation des liquides ne disposant pas de document CEI auprès du fabricant du liquide.

1) Les valeurs estimées ou « généralement acceptées » sont uniquement données à titre d'information, car il n'existe pas de méthode d'essai reconnue pour déterminer la classe thermique des liquides isolants.

2) En raison des propriétés de stabilité de l'oxygène et de la nature hygroscopique de ces liquides, les limites estimées de la température s'appliquent seulement aux applications essentiellement en l'absence d'oxygène où le système de conservation d'huile empêche efficacement la pénétration d'air remplie d'humidité dans le réservoir.

3) Essai Cleveland en vase ouvert selon l'ISO 2592. Dans les documents du Comité d'Etudes 10 de la CEI, le point d'éclair est déterminé conformément à l'essai Pensky-Martins en vase clos selon l'ISO 2719, qui donne généralement des valeurs inférieures à celles qui sont indiquées.

4) Les données concernant la permittivité relative et le facteur de dissipation sont référencées à 50/60 Hz.

Table 3 – Typical properties of insulating liquids

Generic name	IEC standard reference	Estimated maximum operating temperature (°C)	Flash point ³⁾ (°C)	Fire point ³⁾ (°C)	Water content (mg/kg)	Density at 25°C (g/cm ³)	Relative permittivity ⁴⁾ at 25 °C	Dissipation factor ⁴⁾ at 25 °C (%)	Kinematic viscosity (mm ² /s)		Thermal conductivity at 25 °C (W/mK)	Specific heat at 25 °C (J/kg °C)
									At 60 °C	At 100 °C		
Mineral insulating oil	60296	105	145	160	25	0,88	2,2	0,05	15	2,3	0,12	2 100
Synthetic hydrocarbon	60867	~130 ¹⁾	230	250	15	0,83	2,1	0,01	10,1	4,1	0,14	2 100
Synthetic ester	61099	~130 ^{1) 2)}	275	310	50	0,97	3,2	0,02	33	5,8	0,16	2 100
Dimethyl silicone	60836	~155 ^{1) 2)}	310	360	50	0,96	2,7	0,01	30	14,3	0,15	1 500
Although the following liquids are used in some transformer applications, they are not yet defined by IEC standards												
Synthetic PAO hydrocarbon	N/A	~130 ¹⁾	264	304	15	0,83	2,1	0,01	26,5	8,6	0,13	2 300
High molecular weight hydrocarbon	N/A	~130 ¹⁾	280	312	10	0,87	2,2	0,01	40,3	11,8	0,14	2 100
Agricultural ester	N/A	~130 ¹⁾	330	360	50	0,91	3,2	0,05	N/A	9	0,17	2 000

NOTE The values in this table are provided only as a general guide for comparison of the different liquids. For specific physical properties and acceptance limits, refer to the IEC standard noted for each liquid. Physical properties and acceptance limits for liquids with no IEC document should be verified with the liquid manufacturer.

- 1) Estimated or 'generally accepted' values are shown for information purposes, since there is no recognized test method for determining a thermal class for insulating liquids.
- 2) Due to the oxygen stability properties and hygroscopic nature of these liquids, the estimated temperature limits only apply to essentially oxygen-free applications where the oil preservation system effectively prevents the ingress of moisture filled air into the tank.
- 3) Cleveland open cup test per ISO 2592. In IEC Technical Committee 10 documents, flash point is determined according to the Pensky-Martins closed cup test per ISO 2719, which generally gives lower values than those shown.
- 4) Relative permittivity and dissipation factor data are referenced to 50/60 Hz.

5 Systèmes d'isolation

5.1 Généralités

Un système d'isolation utilisé dans les dispositifs électrotechniques contient un ou plusieurs matériaux solides pour isoler les parties conductrices et un liquide pour à la fois l'isolation des parties conductrices et pour le transfert de chaleur et le refroidissement. Ces matériaux isolants doivent résister aux contraintes électriques, mécaniques, chimiques et thermiques pour la durée de vie prévue du dispositif. On trouvera une procédure d'évaluation d'un système d'isolation solide et liquide combiné dans la future CEI 62332.

Dans le cas des contraintes thermiques, la capacité du matériau isolant est basée sur la température qui constitue le facteur dominant. La répartition de température n'est toutefois pas homogène, même dans un transformateur de puissance traditionnelle. Par exemple, la température du liquide peut varier entre 70 °C en bas du transformateur et 100 °C en haut, lorsque la charge du transformateur est maximale. En conséquence, les conducteurs et les matériaux isolants associés atteindront des températures de point chaud typiques de 10 °C à 20 °C au-dessus du liquide environnant. Les matériaux isolants restants prendront la température approximative du liquide en fonction de la hauteur.

Le vieillissement et la durée de vie du système d'isolation dépendent en grande partie de la température et, par suite, différentes combinaisons de matériaux isolants peuvent être utilisées pour optimiser la construction thermique et économique du transformateur. L'application de matériaux isolants de différentes classes thermiques conduit à des systèmes d'isolation non traditionnelles. Il est donc utile d'adapter la capacité matérielle à la température d'application appropriée pour obtenir une valeur optimale en matière d'utilisation de ces matériaux isolants haute température.

De nombreux systèmes pourraient être identifiés sur la base de différentes combinaisons multiples de différentes isolations solides avec chaque liquide. Il est toutefois possible de définir, en termes généraux, quatre catégories distinctes en vue de communication. Ces catégories ne comprennent pas les combinaisons utilisant des matériaux haute température, bien que toutes les températures traditionnelles soient maintenues. La CEI 60076-2 et la future CEI 60076-7 traitent de ce type de transformateur de manière appropriée.

5 Insulation systems

5.1 General

An insulation system used in electrotechnical devices contains one or more solid materials for insulating the conductive parts and a liquid, for both insulating conductive parts and for heat transfer and cooling. These insulation materials must withstand electrical, mechanical, chemical and thermal stresses for the expected life of the device. A procedure for evaluating a combined solid and liquid insulation system may be found in future IEC 62332.

For thermal stresses, the capability of the insulation material is based on temperature as the dominating factor. However, the temperature distribution, even in a conventional power transformer is not homogenous. The liquid temperature can vary for example, between 70 °C at the bottom of the transformer and 100 °C at the top, when the transformer is at full load. Correspondingly, the conductors and associated insulating materials will typically reach hot-spot temperatures 10 °C to 20 °C higher than the surrounding liquid. The remaining insulation materials will adopt the approximate temperature of the liquid, depending on the height.

Since ageing and lifetime of the insulation system so strongly depend on the temperature, different combinations of insulating materials may be used in order to optimise the thermal and economical design of the transformer. The application of insulating materials with different thermal classes leads to unconventional insulation systems. To obtain optimum value in the use of these high-temperature insulating materials, it makes sense to match the material capability to the appropriate application temperature.

Many systems could be identified based on the many multiple combinations of various solid insulations together with each liquid. However, for communication purposes, four distinct categories may be defined in general terms. These categories do not include combinations that use high-temperature materials even though all conventional temperatures are maintained. IEC 60076-2 and future IEC 60076-7 adequately cover this type of transformer.

5.2 Types de système d'isolation

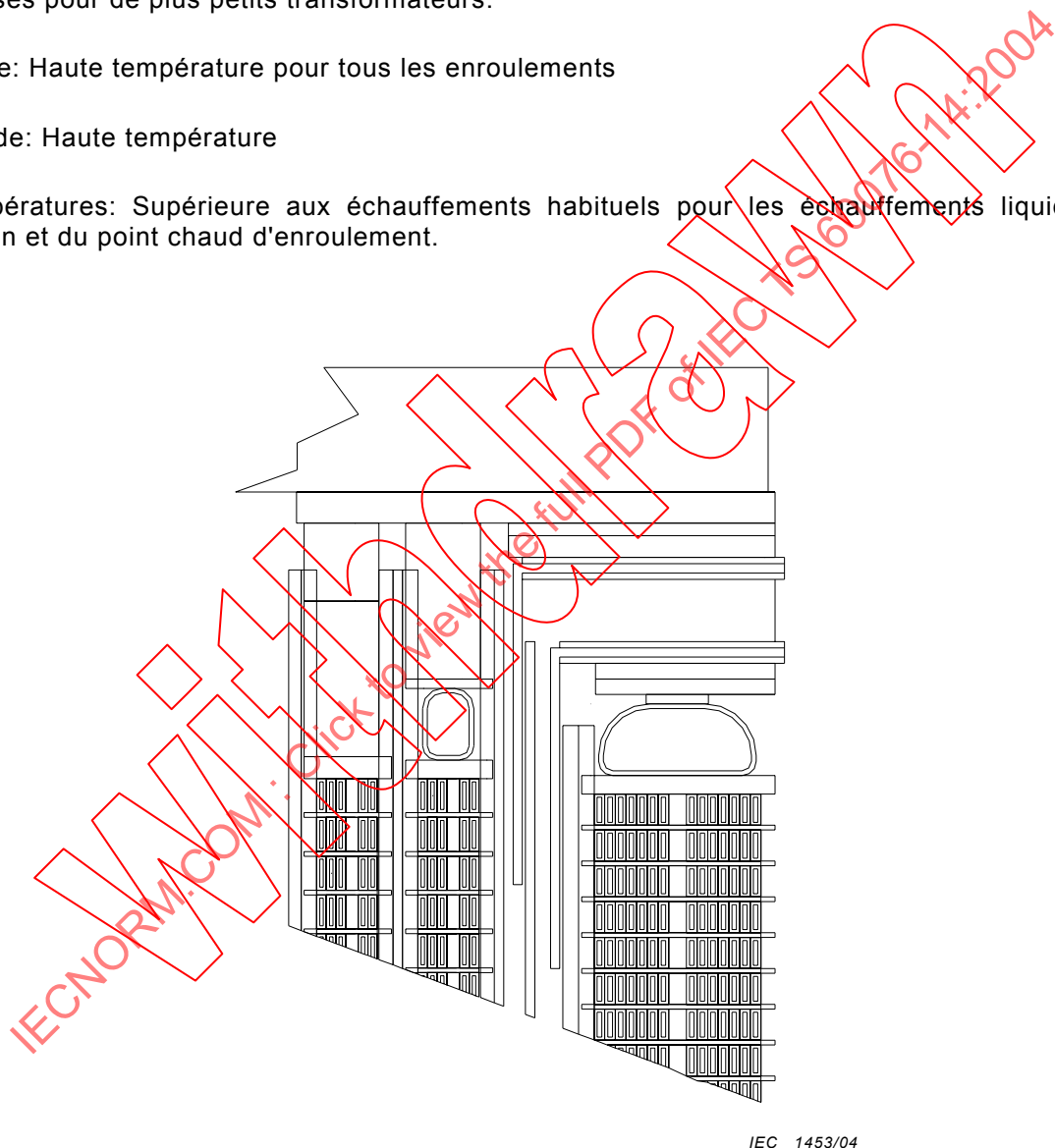
5.2.1 Système d'isolation à haute température homogène

Les systèmes d'isolation homogène se composent de matériaux isolants solides et d'un liquide isolant de capacité thermique semblable, soit tout conventionnel soit tout à haute température. Bien que le système d'isolation de référence traditionnel défini par la CEI 60076-2 et la future CEI 60076-7 est un système d'isolation homogène, le système d'isolation cité dans le présent document comme étant homogène contient uniquement de l'isolant haute température. La Figure 1 illustre ce système avec la construction d'un grand transformateur de puissance, bien que les constructions de couche et de feuille enroulée seraient également incluses pour de plus petits transformateurs.

Solide: Haute température pour tous les enroulements

Liquide: Haute température

Températures: Supérieure aux échauffements habituels pour les échauffements liquide et moyen et du point chaud d'enroulement.



IEC 1453/04

Toutes les parties d'isolation de même classe thermique haute température

Figure 1 – Illustration de l'isolation solide dans un système d'isolation homogène

5.2 Insulation system types

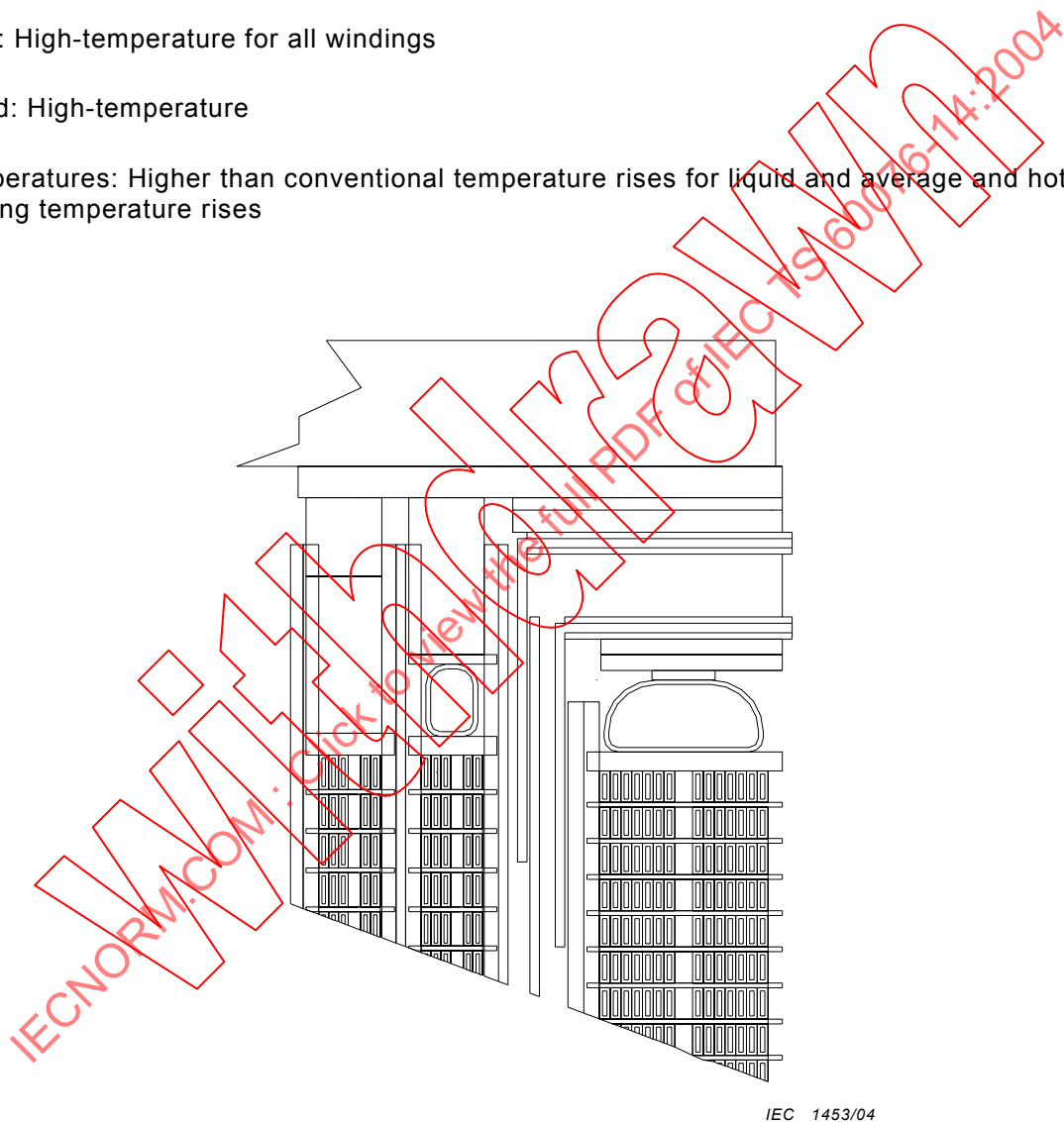
5.2.1 Homogeneous high-temperature insulation system

Homogeneous insulation systems consist of solid insulation materials and an insulation liquid of similar thermal capability, either all conventional or all high-temperature. Although the conventional reference insulation system, defined by IEC 60076-2 and future IEC 60076-7 is a homogeneous insulation system, the insulation system referred to in this document as homogeneous contains only high-temperature insulation. Figure 1 illustrates this system with a large power transformer construction, although layer and foil wound constructions would also be included for smaller type transformers.

Solid: High-temperature for all windings

Liquid: High-temperature

Temperatures: Higher than conventional temperature rises for liquid and average and hot-spot winding temperature rises



IEC 1453/04

All insulation parts of same high-temperature thermal class

Figure 1 – Illustration of solid insulation in a homogeneous insulation system

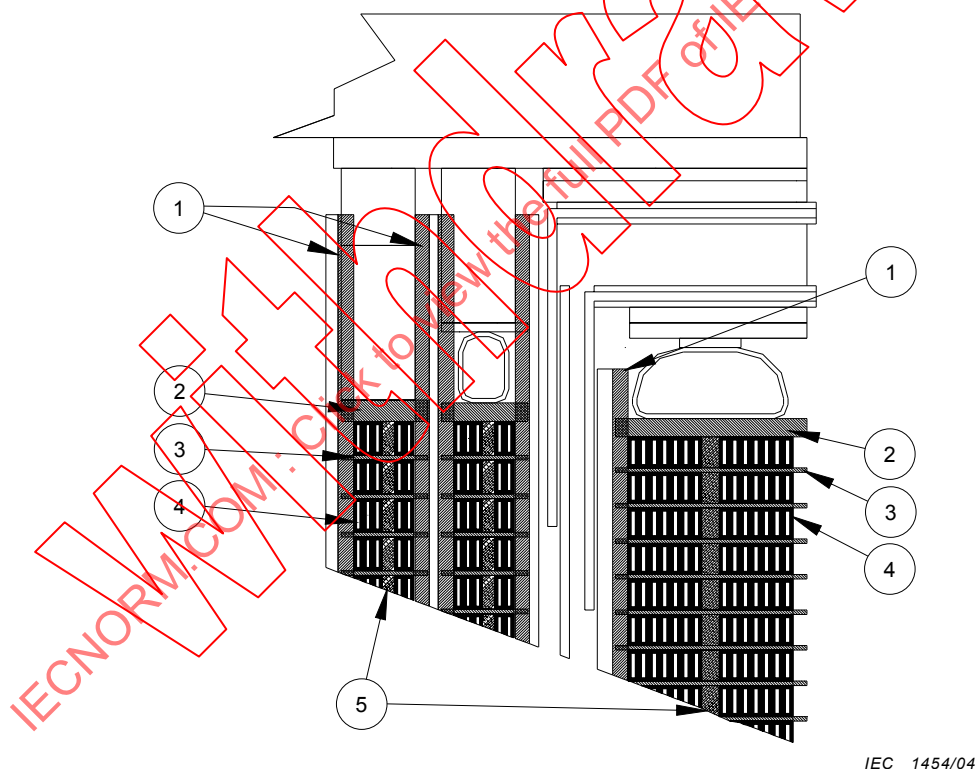
5.2.2 Système à isolation hybride

Le système à isolation hybride utilise du liquide traditionnel et des matériaux haute température à travers le transformateur dans les enroulements, mais pas nécessairement dans chaque enroulement. Par exemple, un enroulement de couche tertiaire peut être composé de matériaux traditionnels, dans la mesure où il peut fonctionner à une température inférieure à celle des autres enroulements. Dans le cas général, l'isolant du conducteur et les entretoises radiales et axiales qui séparent les enroulements de bobine sont des matériaux haute température. L'isolation cellulosique traditionnelle est utilisée dans toutes les autres zones, comme par exemple les cylindres et les bagues d'épaulement qui fonctionnent à des températures conventionnelles.

Solide: Haute température pour toute isolation en contact avec des conducteurs chauds

Liquide: Conventionnel

Températures: Echauffement habituel pour le liquide et supérieur aux échauffements conventionnels moyens et du point chaud pour certains ou pour tous les enroulements



Légende

- 1 entretoises axiales haute température contre l'enroulement
- 2 entretoises radiales haute température au-dessus et en dessous de l'enroulement
- 3 entretoises radiales haute température à l'intérieur de l'enroulement
- 4 isolant du conducteur haute température
- 5 entretoises axiales haute température à l'intérieur de l'enroulement constituant les conduites de refroidissement axiales

Figure 2 – Illustration de l'isolation solide dans un système à isolation hybride

5.2.2 Hybrid insulation system

The hybrid insulation system uses conventional liquid and high-temperature materials throughout the transformer in the windings, but not necessarily every winding. A layer tertiary winding, for example, may be composed of conventional materials since it may operate at a lower temperature than the other windings. Typically the conductor insulation and the radial and axial spacers separating the coil windings are high-temperature materials. Conventional cellulose insulation is used in all other areas, such as cylinders and angle rings that operate at conventional temperatures.

Solid: High-temperature for all insulation in contact with hot conductors

Liquid: Conventional

Temperatures: Conventional temperature rise for liquid and higher than conventional average and hot-spot temperature rises for some or all windings

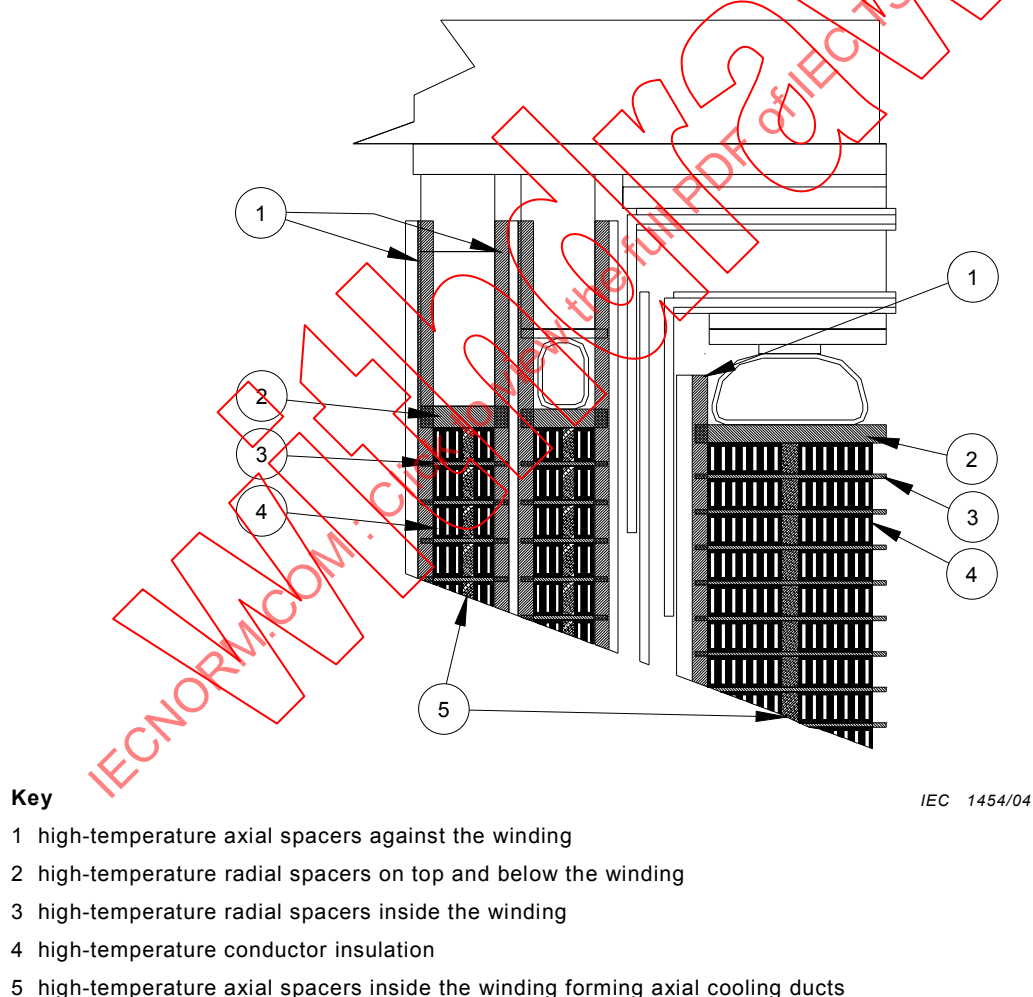


Figure 2 – Illustration of solid insulation in a hybrid insulation system

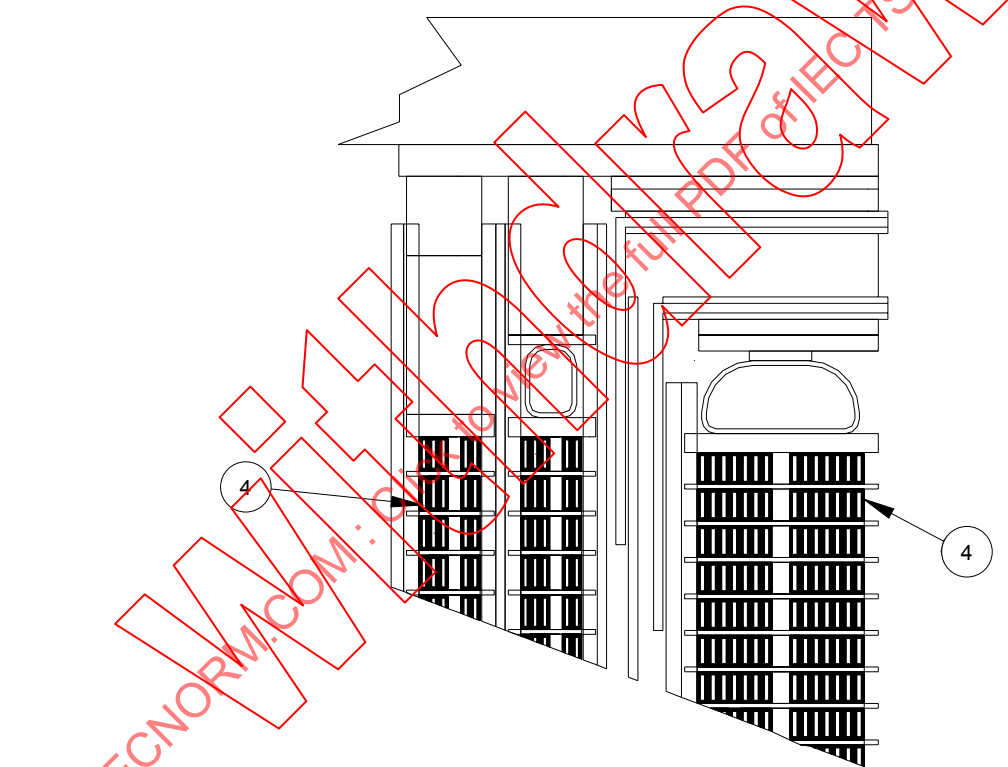
5.2.3 Système à isolation semi-hybride

Le système à isolation semi-hybride utilise un liquide traditionnel et des matériaux haute température uniquement pour l'isolant du conducteur dans les enroulements qui fonctionnent à des températures supérieures aux températures traditionnelles. Tous les autres matériaux sont des matériaux à isolation conventionnelle.

Solide: Haute température pour isolant du conducteur uniquement dans certains enroulements ou dans tous

Liquide: Conventionnel

Températures: Echauffement habituel pour le liquide et supérieur aux échauffements conventionnels moyens et du point chaud pour certains ou pour tous les enroulements



Légende

4 isolant du conducteur haute température

IEC 1455/04

Figure 3 – Illustration de l'isolation solide dans un système à isolation semi-hybride

5.2.3 Semi-hybrid insulation system

The semi-hybrid insulation system uses conventional liquid and high-temperature materials only for conductor insulation in windings operating above conventional temperatures. All other materials are of conventional insulation.

Solid: High-temperature for conductor insulation only in some or all windings

Liquid: Conventional

Temperatures: Conventional temperature rise for liquid and higher than conventional average and hot-spot temperature rises for some or all windings

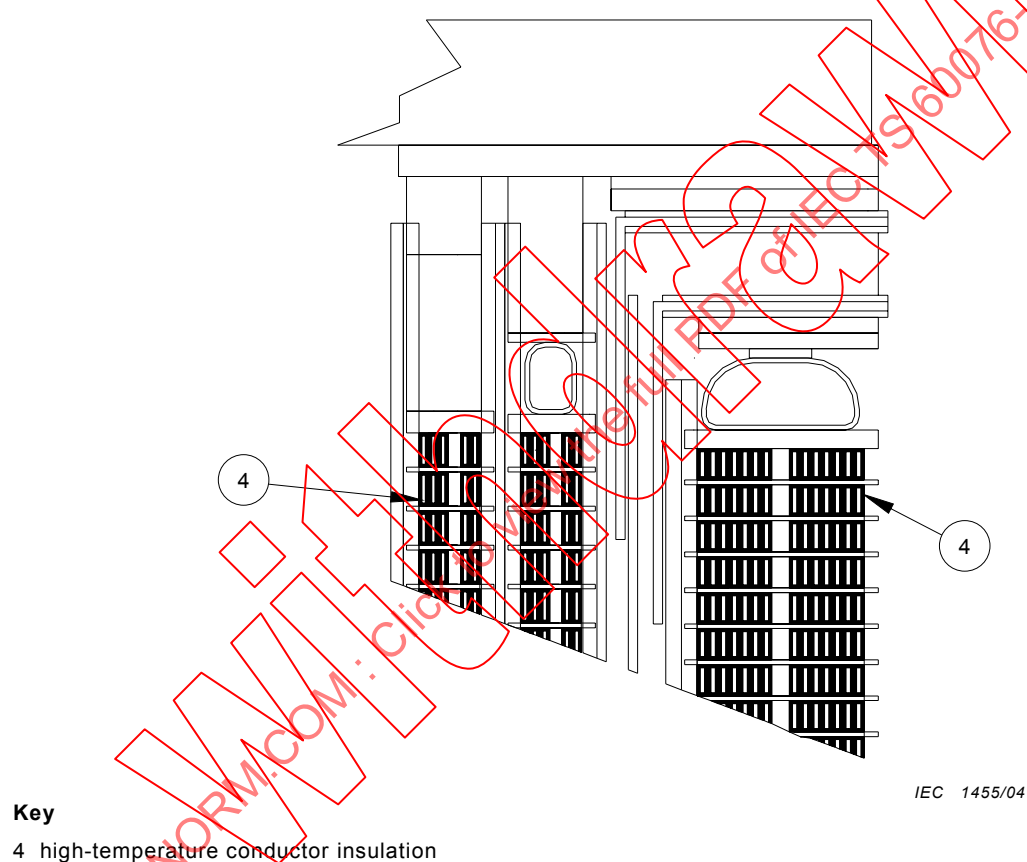


Figure 3 – Illustration of solid insulation in a semi-hybrid insulation system

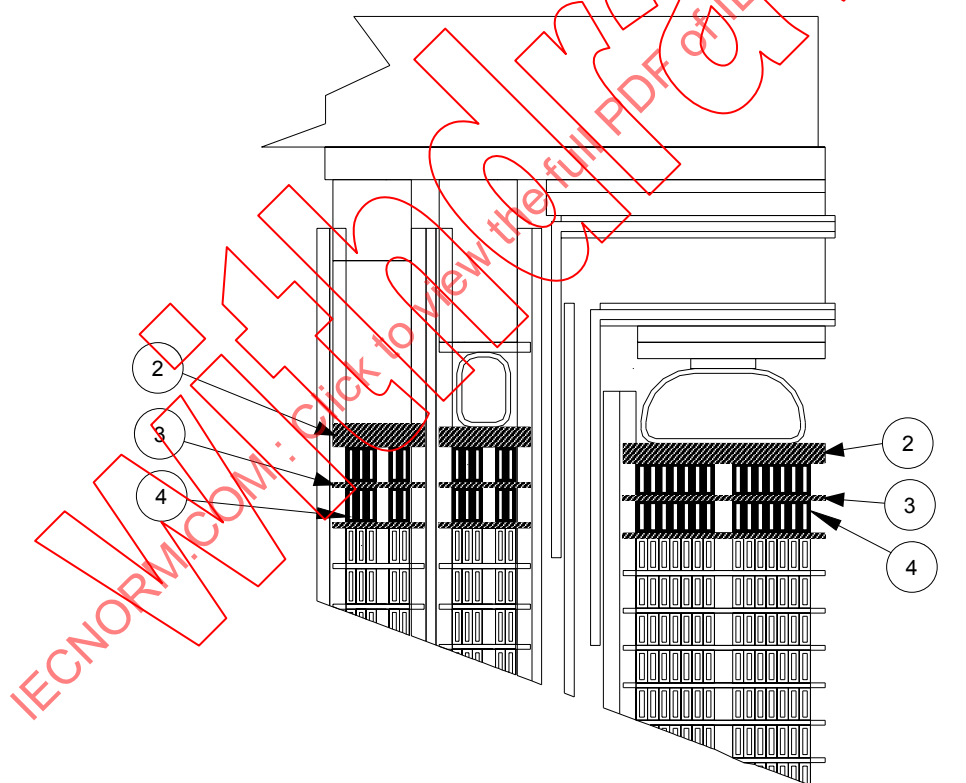
5.2.4 Système d'isolation mélangée

Le système d'isolation mélangée utilise une isolation haute température pour certains composants ou pour certaines parties des enroulements, comme par exemple les conducteurs dans des régions où les températures sont au-dessus des limites conventionnelles. Un exemple serait les zones à pertes et dissipation de chaleur supplémentaires, comme par exemple les extrémités d'un enroulement, par suite des courants harmoniques. Un autre exemple pourrait être le quart supérieur d'un enroulement ou de plusieurs enroulements. La plupart des matériaux à isolation solide, ainsi que le liquide isolant utilisé dans le transformateur sont des matériaux conventionnels.

Solide: Haute température de protection contre le chauffage localisé dans des zones spécifiques de certains enroulements

Liquide: Conventionnel

Températures: Échauffement habituel pour le liquide et l'enroulement moyen, mais supérieur aux échauffements conventionnels du point chaud pour certains ou pour tous les enroulements



IEC 1456/04

Légende

- 2 entretoises radiales haute température au-dessus et en dessous de l'enroulement
- 3 entretoises radiales haute température à l'intérieur de l'enroulement
- 4 isolant du conducteur haute température dans les zones les plus chaudes

Figure 4 – Illustration de l'isolation solide dans un système d'isolation mélangé

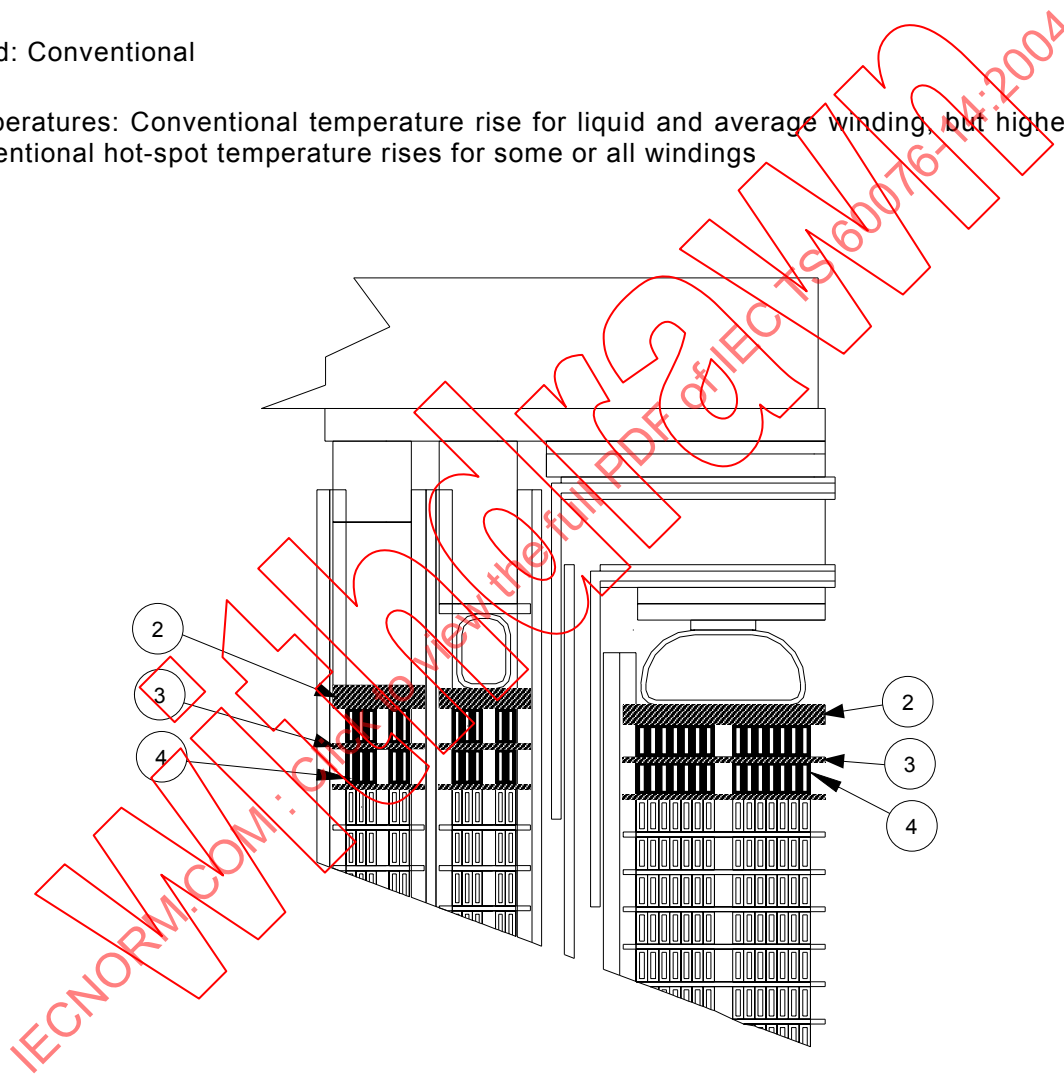
5.2.4 Mixed insulation system

The mixed insulation system uses high-temperature insulation for certain components or parts of windings, such as the conductors in regions at temperatures above conventional limits. An example would be the zones with extra losses and heat dissipation, such as the winding ends, due to harmonic currents. Another example could be the upper quarter of a winding or windings. The majority of the solid insulation materials as well as the insulating liquid used in the transformer are conventional.

Solid: High-temperature to protect against localized heating in specific regions of some windings

Liquid: Conventional

Temperatures: Conventional temperature rise for liquid and average winding, but higher than conventional hot-spot temperature rises for some or all windings



Key

- 2 high-temperature radial spacers on top and below the winding
- 3 high-temperature radial spacers inside the winding
- 4 high-temperature conductor insulation in the hottest areas

IEC 1456/04

Figure 4 – Illustration of solid insulation in a mixed insulation system

6 Limites de température

Dans la plupart des transformateurs conventionnels qui utilisent de la cellulose et de l'huile minérale, l'isolation solide détermine la température maximale de fonctionnement. Lors de l'utilisation de matériaux isolants solides haute température avec un liquide traditionnel, le liquide deviendra généralement le facteur de limitation et déterminera les limites maximales de température. Eviter l'échauffement du liquide isolant devient la considération primordiale puisque le vieillissement qui peut avoir lieu au-dessus d'une certaine température du liquide modifie de nombreuses propriétés des liquides isolants. Une propriété essentielle telle que la rigidité diélectrique du liquide peut diminuer de manière significative dans un temps relativement court, si la température n'est pas maintenue en dessous d'une certaine limite.

Des limites de température maximale pour différentes combinaisons des matériaux isolants solides et de liquide sont présentées dans les Tableaux 4 et 5. Des informations complémentaires peuvent être trouvées en annexe B. Ces températures sont destinées à être des limites supérieures et dépendent fortement de la conception et de l'application spécifiques. Un modèle thermique précis vérifié par des données d'essai adéquates est exigé pour déterminer les limites maximales réelles de toute conception spécifique de transformateur. Certains des facteurs limites à considérer en déterminant ces températures maximales sont:

- les unités de respiration libre qui introduisent l'humidité et l'oxygène libre dans la cuve du transformateur, qui sont les principales contributions au vieillissement d'isolation. Ce vieillissement est accéléré à mesure que la température augmente;
- le vieillissement des matériaux qui peuvent introduire l'humidité et l'oxygène libre à l'intérieur de la cuve du transformateur;
- la vitesse du liquide dans les conduits de refroidissement, dans la mesure où la longue exposition du liquide à haute température accélérera la dégradation;
- le vieillissement accéléré du liquide et des matériaux isolants dus à l'action catalytique provoquée par la présence des surfaces de cuivre et d'argent nues avec la génération des sous-produits, des dérivés de cuivre dissous dans les liquides isolants et les particules;
- des bulles de gaz provoquées par le liquide surchauffé piégé entre les conducteurs d'enroulement et le conducteur couvrant. Voir l'Annexe A pour des informations générales complémentaires sur le barbotage et une équation pour calculer la température approximative où le barbotage peut se produire;
- l'utilisation d'isolation solide à hautes températures avec une classe thermique inférieure à celle indiquée dans les tableaux.

6 Temperature limits

In most conventional transformers using cellulose and mineral oil, the solid insulation determines the maximum operating temperature. When high-temperature solid insulation materials are used with conventional liquid, the insulating liquid will generally become the limiting factor and will determine the maximum temperature limits. Avoiding overheating of the insulating liquid becomes the design focus, since the ageing that may take place above a certain liquid temperature changes many properties of the insulating liquids. An essential property such as the dielectric strength of the liquid may decline significantly within a relatively short time, if the temperature is not kept below a certain limit.

Maximum temperature limits for various combinations of solid and liquid insulating materials are presented in Tables 4 and 5. Additional information may be found in Annex B. These temperatures are intended to be upper limits and are highly dependant on the specific design and application. An accurate thermal model verified by adequate test data is required to determine the actual maximum limits of any specific transformer design. Some of the limiting factors to be considered in determining these maximum temperatures are:

- free breathing units that introduce moisture and free oxygen into the transformer tank, which are major contributors to insulation ageing. This ageing is accelerated as the temperature increases;
- ageing of materials which may introduce moisture and free oxygen inside the transformer tank;
- velocity of the liquid in the cooling ducts, since long exposure of the liquid to high-temperature will accelerate degradation;
- accelerated ageing of the liquid and insulating materials due to catalytic action caused by the presence of bare copper and silver surfaces with generation of by-products, copper derivatives dissolved in insulating liquids and particles;
- gas bubbles caused by overheated trapped liquid between the winding conductors and the conductor covering. See Annex A for more general information on bubbling and an equation for calculating the approximate temperature that bubbling may occur;
- use of high-temperature solid insulation with a thermal class lower than stated in the tables.

Tableau 4 – Limites de température pour transformateurs avec liquide isolant minéral

	Système d'isolation conventionnelle ¹⁾	Système d'isolation mélangée	Système à isolation semi-hybride	Système à isolation hybride ³⁾
Classe thermique d'isolant solide haute température minimale	N/A	130	120	155
Échauffement de l'huile supérieure au dessus de la température ambiante (K)	60	60	60	60
Température de l'huile supérieure à la température ambiante maximale (°C)	100	100	100	100
Échauffement d'enroulement moyen au dessus de la température ambiante (K)	65	65	75	95
Température du point chaud conventionnelle à température ambiante maximale (°C)	118	118	118	118
Température du point chaud d'isolation haute température à la température ambiante maximale (°C)	N/A	150	130	170
Température de référence (°C)	75 ²⁾	75 ²⁾	95	115
Température ambiante maximale (°C)	40	40	40	40
¹⁾ Système de référence pour permettre la comparaison. ²⁾ La CEI 60076-2 utilise 75 °C comme température de référence pour la spécification des pertes et l'impédance de court-circuit pour un échauffement d'enroulement moyen de 65 K. ³⁾ Applications essentiellement exemptes d'oxygène où le système de conservation d'huile empêche efficacement la pénétration dans le réservoir d'oxygène et d'air rempli d'humidité.				

Tableau 5 – Limites de température pour transformateurs avec liquides haute température

	Système d'isolation homogène haute température avec liquide d'ester ou équivalent ¹⁾	Système d'isolation homogène haute température avec liquide de silicone ou équivalent ¹⁾
Classe thermique d'isolant solide de haute température minimale	180	200
Échauffement de l'huile supérieure au dessus de la température ambiante (K)	90	115
Température de l'huile supérieure à la température ambiante maximale (°C)	130	155
Échauffement d'enroulement moyen au dessus de la température ambiante (K)	115	130
Température de point chaud du matériau haute température (°C)	190	220
Température de référence (°C)	135	150
Température ambiante maximale (°C)	40	40
¹⁾ Applications essentiellement exemptes d'oxygène où le système de conservation d'huile empêche efficacement la pénétration dans le réservoir d'oxygène et d'air rempli d'humidité.		

Table 4 – Temperature limits for transformers with mineral insulating liquid

	Conventional insulation system ¹⁾	Mixed insulation system	Semi-hybrid insulation system	Hybrid insulation system ³⁾
Minimum high-temperature solid insulation thermal class	N/A	130	120	155
Top oil temperature rise over ambient temperature (K)	60	60	60	60
Top oil temperature at maximum ambient (°C)	100	100	100	100
Average winding temperature rise over ambient temperature (K)	65	65	75	95
Conventional hot-spot temperature at maximum ambient (°C)	118	118	118	118
High-temperature insulation hot-spot temperature at maximum ambient (°C)	N/A	150	130	170
Reference temperature (°C)	75 ²⁾	75 ²⁾	95	115
Maximum ambient temperature (°C)	40	40	40	40

1) Reference system for comparison purposes.

2) IEC 60076-2 uses 75 °C as the reference temperature for specification of the losses and short-circuit impedance at 65 K average winding temperature rise.

3) Essentially oxygen-free applications where the oil preservation system effectively prevents the ingress of oxygen and moisture filled air into the tank.

Table 5 – Temperature limits for transformers with high-temperature liquids

	High-temperature homogeneous insulation system with ester liquid or equivalent ¹⁾	High-temperature homogeneous insulation system with silicone liquid or equivalent ¹⁾
Minimum high-temperature solid insulation thermal class	180	200
Top liquid temperature rise over ambient temperature (K)	90	115
Top liquid temperature at maximum ambient (°C)	130	155
Average winding temperature rise over ambient temperature (K)	115	130
High-temperature material hot-spot temperature (°C)	190	220
Reference temperature (°C)	135	150
Maximum ambient temperature (°C)	40	40

1) Essentially oxygen-free applications where the oil preservation system effectively prevents the ingress of oxygen and moisture filled air into the tank.

7 Accessoires de transformateur et compatibilité

7.1 Généralités

En fonctionnant à température élevée il est important de vérifier la compatibilité thermique, chimique et mécanique des composants individuels avec leurs pièces d'adaptation. Les matériaux compatibles ne présenteront aucune dégradation anormale de performance ou des paramètres clés en utilisation normale.

La présente spécification couvre principalement la compatibilité thermique. Il est essentiel cependant, que les propriétés diélectriques et chimiques des différents composants ainsi que leurs joints, selon le cas, soient également pris en considération.

7.2 Traversées

Des températures de fonctionnement plus élevées dans l'enroulement n'affecteront pas considérablement la traversée si la température du liquide supérieure n'augmente pas au-dessus des limites conventionnelles. Lorsque la température de liquide maximale est supérieure à celle de la conception conventionnelle, la performance de la traversée peut être affectée. Dans ce cas, des traversées spéciales à haute température ou surdimensionnées peuvent être exigées. A titre alternatif, il peut être possible de replacer les traversées à une position inférieure pour tirer profit des températures du liquide inférieures.

7.3 Changeur de prise

Le changeur de prise n'est pas toujours situé dans la zone la plus chaude du liquide supérieur. Cependant, dans le cas où le changeur de prise est situé dans des températures de liquide supérieures à 100 °C généralement utilisées dans des unités conventionnelles, il convient de tenir tout particulièrement compte des considérations thermiques, mécaniques et diélectriques spéciales pour le choix de ces composants.

Des températures de fonctionnement plus élevées dans l'enroulement pourraient également affecter le changeur de prise, si la chaleur est transmise de l'enroulement aux contacts du changeur de prise. En conséquence, un changeur de prise à courant assigné plus élevé n'est pas nécessairement la solution dans la mesure où la source de chaleur provient de l'enroulement et non d'un courant plus élevé. Il faut considérer la compatibilité des matériaux de contact lors de l'application de fonctionnement à haute température.

7.4 Matériau de garniture

Lorsqu'un liquide isolant haute température est utilisé, un matériau de garniture de température supérieure compatible chimiquement avec le liquide isolant s'avérera nécessaire.

7.5 Peinture du réservoir

En manœuvrant le liquide isolant aux températures élevées, il est important de respecter des spécifications de peintures interne et externe compatibles thermiquement.

7.6 Refroidisseurs

Lorsqu'un liquide isolant à haute température est utilisé, il convient que tous les matériaux dans le refroidisseur soient adaptés pour les températures plus élevées. Les propriétés thermiques telles que la viscosité et le transfert thermique nécessitent une considération attentive car elles peuvent être nettement différentes de celles de l'huile minérale isolante. Il est également possible que les propriétés thermiques varient dans la plage d'élévation de température. Comme avec le réservoir, il convient que le système de peinture soit adapté à la température la plus élevée.

7 Transformer accessories and compatibility

7.1 General

When operating at high temperature it is important that the individual components are checked to ensure that they have thermal, chemical and mechanical compatibility with their mating parts. Compatible materials will exhibit no abnormal degradation of performance or key parameters in normal use.

This specification primarily covers the thermal compatibility. It is essential however, that dielectric and chemical properties of the various components together with their gaskets, as appropriate are also taken into account.

7.2 Bushings

Higher operating temperatures in the winding will not greatly affect the bushing if the top liquid temperature is not increased above conventional limits. Where the top liquid temperature is higher than that of conventional design, the bushing performance may be affected. In this case, special high-temperature or over-sized bushings may be required. As an alternate, it may be possible to relocate the bushings to a lower position to take advantage of lower liquid temperatures.

7.3 Tap-changer

The tap-changer is not always located in the hottest top liquid zone. However, in case the tap-changer is located in liquid temperatures above the commonly used 100°C in conventional units, one should have special thermal, mechanical and dielectric considerations for the selection of these components.

Higher operating temperatures in the winding could also affect the tap-changer, if the heat is transferred from the winding onto the tap-changer contacts. Accordingly, a higher current rated tap-changer is not necessarily the solution since the source of the heat is from the winding and not from higher current. In the application of high-temperature operation the compatibility of contact materials needs to be considered.

7.4 Gasket material

Where a high-temperature insulating liquid is used a higher temperature grade of gasket material will be required that is chemically compatible with the insulating liquid.

7.5 Tank painting

When operating the insulation liquid at higher temperatures, it is important to use thermally compatible internal and external paint specifications.

7.6 Coolers

Where a high-temperature insulating liquid is used, all the materials in the cooler should be suitable for the higher temperatures. Thermal properties such as viscosity and heat transfer need careful consideration as they could differ significantly from mineral insulating oil. It is also possible that the thermal properties will vary over the increased temperature range. As with the tank, the paint system should be suitable for the higher temperature.

7.7 Pompes

Il convient que les spécifications de la pompe prennent en compte la viscosité du liquide isolant dans la plage de température de fonctionnement.

7.8 Conservateur

Il convient que la capacité du conservateur de liquide prenne en compte l'élévation de la plage de température au-dessus de laquelle le transformateur fonctionnera. L'expansion/contraction du liquide haute température peut être nettement différente de celle de l'huile minérale isolante. Pour les transformateurs hermétiques il convient que le réservoir ou le conservateur soit plus grand pour permettre l'augmentation de volume. Pour les systèmes aérateurs, qui utilisent une membrane, une catégorie de température plus élevée de matériau de membrane peut être exigée.

7.9 Adhésifs

Il convient que tous les adhésifs utilisés pendant le processus de fabrication soient adaptés aux températures les plus élevées et qu'ils soient chimiquement compatibles avec le liquide isolant.

7.10 Transformateurs de courant

Il convient que le système d'isolation utilisé sur tout transformateur de courant soit thermiquement et chimiquement compatible avec le liquide isolant à haute température d'utilisation.

7.11 Thermomètres et indicateurs de température

Il convient que les thermomètres et les indicateurs de température soient spécifiés pour fonctionner aux températures les plus élevées et dans des plages de température supérieures. En particulier, il convient de régler avec soin les valeurs de réglages d'alarme et de circuit de déclenchement.

7.12 Relais Buchholz

Les gaz qui peuvent être produits dans des transformateurs utilisant les systèmes d'isolation à haute température peuvent différer de ceux dans un système conventionnel. C'est pourquoi il convient que le relais de Buchholz soit compatible avec le liquide isolant, sa température de fonctionnement et les gaz qui peuvent être développés.

8 Considérations de conception particulières

8.1 Considérations de court-circuit

La conception des échauffements d'enroulement supérieur à la moyenne par rapport aux conceptions conventionnelles peut être réalisée par un refroidissement plus faible ou par des densités de courant plus élevées. Dans ce dernier cas, la conception à hautes températures peut par conséquent exiger une construction mécanique renforcée pour résister aux effets d'un court circuit externe.

Il convient également de concevoir la construction mécanique de l'enroulement et la structure de support pour prendre en compte une augmentation possible de l'expansion ou une contraction des enroulements du transformateur dus à une plus importante plage de température.

Il est en outre recommandé de prévoir un traitement des enroulements de manière à assurer le maintien de l'étanchéité de la construction en service.

7.7 Pumps

The pump specification should take into account the viscosity of the insulating liquid over the operational temperature range.

7.8 Conservator

The capacity of the liquid conservator should take into account the increased temperature range over which the transformer will operate. The expansion/contraction of the high-temperature liquid may differ significantly from that of mineral insulating oil. For sealed transformers the tank or conservator should be larger to allow for the volume increase. For breather systems, which utilise a membrane, a higher temperature grade of membrane material may be required.

7.9 Adhesives

All adhesives used during the manufacturing process should be suitable for the higher temperatures and be chemically compatible with the insulating liquid.

7.10 Current transformers

The insulation system used on any current transformer should be thermally and chemically compatible with the high-temperature insulating liquid in use.

7.11 Temperature gauges and indicators

The temperature gauges and indicators should be specified to operate to the higher temperatures and over greater temperature ranges. In particular, values of the alarm and trip settings should be set with care.

7.12 Buchholz relays

The gases that may be generated in transformers using high-temperature insulation systems may differ from those in a conventional system. The Buchholz relay therefore, should be compatible with the insulating liquid, its operating temperature and the gases that may be developed.

8 Special design considerations

8.1 Short-circuit considerations

Designing for higher average winding temperature rises than conventional designs may be accomplished by reduced cooling or by higher current densities. In the latter case, the high-temperature design may consequently require reinforced mechanical construction to withstand the effects of an external short circuit.

The mechanical construction of the winding and support structure should also be designed to take into consideration the possible increased expansion or contraction of the transformer windings due to the larger temperature range.

In addition, the processing of the windings should be such that the tightness of the construction will be maintained in service.

Il convient de concevoir le transformateur de manière qu'il résiste aux courts-circuits comme défini dans la CEI 60076-5. Il convient de calculer la valeur maximale autorisée de la température moyenne de chaque enroulement selon cette spécification. Pour les transformateurs de la catégorie I avec des liquides à haute température couverts par le Tableau 5 de la présente norme, la température maximale permise pour les enroulements de cuivre pendant le court circuit est 350 °C.

Lorsque la construction comprend des conducteurs d'enroulement par collure époxyde, il convient de tenir compte de la température maximale obtenue en conditions de court-circuit, car l'époxyde est mécaniquement plus faible à des températures supérieures.

8.2 Prescriptions diélectriques

Les propriétés diélectriques d'un système d'isolation haute température seront différentes de celles d'un système conventionnel et, par suite, il est recommandé d'analyser entièrement l'effet de ces changements lors de la phase de construction. Il convient que la conception s'assure qu'il n'y a aucune dégradation anormale des propriétés diélectriques dans une plage de températures de service plus étendue du transformateur.

8.3 Exigences relatives à la température

La valeur de la température du point chaud de l'enroulement et son emplacement sont critiques pour le fonctionnement satisfaisant du transformateur. Comme avec n'importe quel transformateur il s'agit de conception spécifique et par conséquent un modèle thermique adéquat de l'enroulement est exigé, qu'il convient de vérifier par un essai de modèle. Dans les systèmes d'isolation mixtes il y aura plusieurs points chauds (un pour chaque type d'isolation) et il convient de les considérer avec le plus grand soin. Voir Figure 5b et Figure 6.

Il est important de noter que dans beaucoup de cas, le liquide dans la conduite de refroidissement de l'enroulement peut avoir une température supérieure à celle du liquide dans la partie supérieure du réservoir et il convient de prendre ceci en compte, dans la mesure où le point chaud est déterminé par le liquide qui se trouve à proximité de l'enroulement. Le gradient de température du conducteur au liquide d'un enroulement isolé est généralement la somme du gradient thermique à travers l'isolation solide et du gradient thermique à travers la couche de limite. Dans les systèmes d'isolation à haute température le gradient thermique à travers la couche de limite est habituellement plus grand que dans les systèmes d'isolation conventionnels. Cela signifie que dans la plupart des cas, la température de surface de l'enroulement est limitée par la capacité thermique du liquide isolant.

La température maximale de la surface de l'enroulement dans le point D est donnée par la somme de la température de liquide dans le conduit de refroidissement et de l'échauffement à travers la couche de limite. Elle dépend du coefficient de transfert thermique à la surface d'enroulement et de la densité de flux de chaleur à travers la surface d'enroulement. Le liquide isolant doit résister à la température de surface maximale sans accélérer le vieillissement, une génération de gaz inacceptable ou un bullage.

The transformer should be designed to withstand short circuits as defined in IEC 60076-5. The maximum permissible value of the average temperature of each winding should be calculated in accordance with that specification. For category I transformers with high-temperature liquids covered by Table 5 of this standard, the maximum permissible temperature for copper windings during short circuit is 350 °C.

Where the design incorporates epoxy-bonded winding conductors, the maximum temperatures obtained under short-circuit conditions should be taken into account since the epoxy is mechanically weaker at higher temperatures.

8.2 Dielectric requirements

The dielectric properties of a high-temperature insulation system will differ from the conventional system hence the effects of these changes need to be fully analysed at the design stage. The design should ensure that there is no abnormal degradation of the dielectric properties over the wider operating temperature range of the transformer.

8.3 Temperature requirements

The value of the hot-spot temperature of the winding and its location is critical for the satisfactory operation of the transformer. As with any transformer these are design specific and hence an adequate thermal model of the winding is required, which should be verified by a model test. In mixed insulation systems there will be several hot-spots (one for each type of insulation) and all need careful consideration. See Figure 5b and Figure 6.

It is important to note that in many cases the liquid in the winding cooling duct can have a higher temperature than that of the liquid in the top of the tank and this should be taken into consideration, since the hot-spot is determined by the liquid adjacent to the winding. The conductor to liquid temperature gradient of an insulated winding is generally the sum of the temperature gradient across the solid insulation and the temperature gradient across the boundary layer. In high-temperature insulation systems, the temperature gradient across the boundary layer is usually greater than in conventional insulation systems. This means that in most cases, the surface temperature of the winding is limited by the thermal capability of the insulation liquid.

The maximum winding surface temperature in point D is given by the sum of the liquid temperature in the cooling duct and the temperature rise across the boundary layer. It depends on the heat transfer coefficient at the winding surface and the heat flux density through the winding surface. The insulation liquid needs to withstand the maximum surface temperature without accelerated ageing, unacceptable gas generation or bubbling.

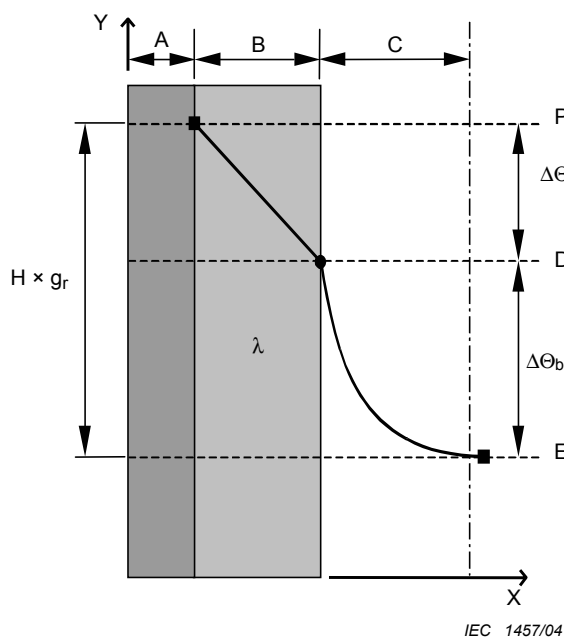


Figure 5a – Matériau à isolation unique

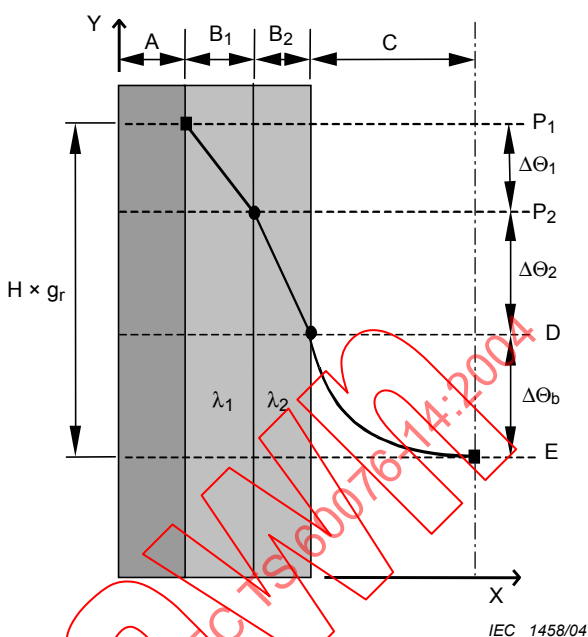


Figure 5b – Matériaux à isolation double

Légende

Axe X distance à partir du conducteur

Axe Y température

A conducteur

B épaisseur du matériau d'isolation solide

B₁ épaisseur du matériau isolant haute température

B₂ épaisseur du matériau d'isolation conventionnelle

C épaisseur de la couche de limite du liquide

D température de la surface d'enroulement

E température du liquide dans le conduit de refroidissement

g_r gradient thermique moyen de l'enroulement au liquide à courant assigné

H facteur du point chaud

P température du point chaud en contact avec le matériau d'isolation solide

P₁ température du point chaud en contact avec le matériau d'isolation haute température

P₂ température du point chaud en contact avec le matériau d'isolation conventionnelle

ΔΘ gradient thermique à l'intérieur de l'isolation solide

ΔΘ₁ gradient thermique à l'intérieur de l'isolant haute température

ΔΘ₂ gradient thermique à l'intérieur de l'isolant conventionnel

ΔΘ_b gradient thermique à l'intérieur de la couche de limite du liquide

λ conductivité thermique du matériau d'isolation solide

λ₁ conductivité thermique du matériau isolant haute température

λ₂ conductivité thermique du matériau isolant conventionnel

Figure 5 – Gradient thermique du conducteur au liquide

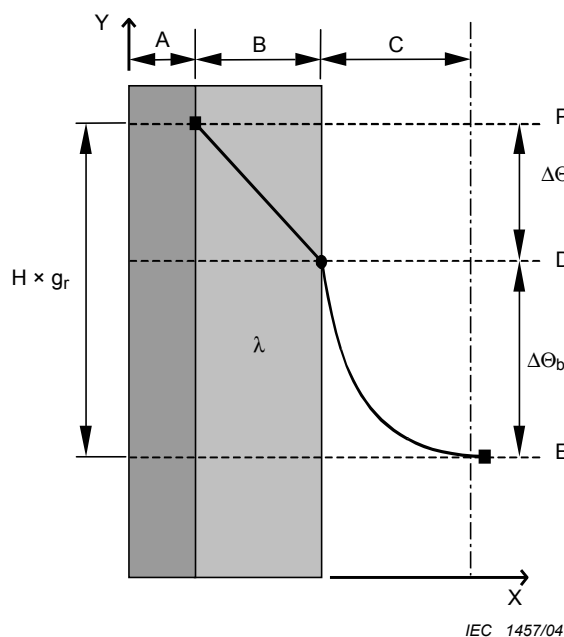


Figure 5a – Single insulation material

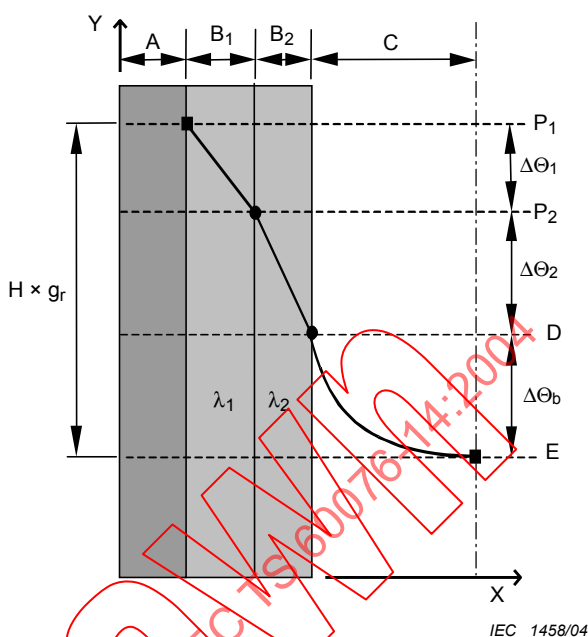


Figure 5b – Two insulation materials

Key

X axis distance from conductor

Y axis temperature

A conductor

B thickness of the solid insulation material

B₁ thickness of the high-temperature insulation materialB₂ thickness of the conventional insulation material

C thickness of the boundary layer of the liquid

D winding surface temperature

E liquid temperature in the cooling duct

g_r average winding to liquid temperature gradient at rated current

H hot-spot factor

P hot-spot temperature in contact with the solid insulation material

P₁ hot-spot temperature in contact with the high-temperature insulation materialP₂ hot-spot temperature in contact with the conventional insulation material

ΔΘ temperature gradient inside the solid insulation

ΔΘ₁ temperature gradient inside the high-temperature insulationΔΘ₂ temperature gradient inside the conventional insulationΔΘ_b temperature gradient inside the boundary layer of the liquid

λ thermal conductivity of the solid insulation material

λ₁ thermal conductivity of the high-temperature insulation materialλ₂ thermal conductivity of the conventional insulation material**Figure 5 – Temperature gradient conductor to liquid**

8.4 Surcharge

Selon les valeurs de conception et les possibilités thermiques du système d'isolation, le transformateur peut avoir des capacités de surcharge différentes par rapport à celui d'une conception conventionnelle.

Les équations et les principes généraux du guide de charge pour transformateurs immergés dans l'huile comme décrit dans la future CEI 60076-7 s'appliquent, sauf pour les niveaux de surcharge, dans la mesure où les températures et les constantes de temps peuvent ne pas être applicables. Il convient donc de convenir de toutes les prescriptions de surcharge avant la phase de construction.

8.5 Effets des courants harmoniques

Les courants harmoniques augmenteront les pertes de Foucault et de parasites relatives au transformateur en comparaison avec un courant sinusoïdal avec la même valeur efficace. Ces pertes plus élevées augmenteront l'échauffement moyen des enroulements et les températures du point chaud.

Les pertes plus élevées dues aux courants harmoniques peuvent augmenter la différence entre l'échauffement moyen de l'enroulement et sa température de point chaud. Cette différence peut être relativement significative pour des transformateurs de conversion ayant deux enroulements à vanne (ou plus) couplés de manière lâche. Voir la CEI 61378 pour des informations complémentaires.

8.6 Système de conservation d'huile

Il convient de spécifier le type de système de conservation d'huile à l'enquête et à la commande comme décrit en 8.2 de la CEI 60076-1. Tous les transformateurs remplis de liquide tireront bénéfice de l'exclusion de l'oxygène. Cependant, c'est particulièrement important pour les transformateurs fonctionnant aux températures élevées. Il convient de limiter l'utilisation des systèmes de conservation qui n'empêchent pas intrinsèquement l'huile de rentrer en contact avec l'atmosphère aux applications où un traitement d'huile plus fréquent est possible et acceptable, telles que les transformateurs mobiles. Ensuite, il convient d'utiliser quelques moyens actifs pour sécher l'air, tels qu'un aérateur de retrait d'humidité.

9 Informations requises

9.1 Informations à fournir par l'acheteur

9.1.1 Températures ambiantes et cycle de charge

Il convient que les informations concernant la température ambiante et le cycle de charge soient conformes aux prescriptions de la CEI 60076-1.

9.1.2 Courants harmoniques

Les courants harmoniques affectent les pertes de transformateur et par conséquent les températures, comme mentionné en 8.5. Les sources de courants harmoniques les plus habituelles sont les convertisseurs, auxquels les transformateurs sont reliés. Les caractéristiques de ces harmoniques dépendent de ce qui suit:

- configuration du circuit de puissance de convertisseur;
- technique de régulation du convertisseur;
- interaction entre le convertisseur et le système sur lequel il est appliqué;
- caractéristiques des composants de puissance électroniques.

8.4 Overload

Depending on the design values and the thermal capability of the insulation system, the transformer may have a different overload capability from that of a conventional design.

The general principles and equations of the loading guide for oil-immersed transformers as described in future IEC 60076-7 apply, except for the overload levels, since temperatures and time constants may not be applicable. Any overload requirements should preferably be specified in the enquiry, or be agreed upon at the contract stage.

8.5 Effects of harmonic currents

Harmonic currents will increase the transformer eddy and stray losses when compared with a sinusoidal current with the same RMS value. These higher losses will increase the average temperature rise of the windings and hot-spot temperatures.

The higher losses due to harmonic currents may increase the difference between the winding's average temperature rise and its hot-spot temperature. This difference can be quite significant for convertor transformers having two or more valve windings loosely coupled. See IEC 61378 for additional information.

8.6 Oil preservation system

The type of oil preservation system should be specified in the enquiry and order as described in 8.2 of IEC 60076-1. All liquid-filled transformers will benefit from the exclusion of oxygen. However, this is especially important for transformers operating at high-temperatures. The use of preservation systems that do not inherently prevent the oil from coming in contact with the atmosphere should be restricted to applications where more frequent oil processing is possible and acceptable, such as mobile transformers. Even then, some active means should be employed to dry the air, such as a moisture-removing breather.

9 Required Information

9.1 Information to be provided by the purchaser

9.1.1 Ambient temperatures and loading cycle

The ambient temperature and loading cycle information should be in accordance with IEC 60076-1.

9.1.2 Harmonic currents

Harmonic currents affect transformer losses and therefore temperatures as mentioned in 8.5. The most common sources of harmonic currents are convertors, to which transformers are connected. The characteristic of those harmonics depend on the following:

- convertor power circuit configuration;
- convertor control technique;
- interaction between the convertor and the system to which it is applied;
- characteristics of the power electronic components.

Le constructeur du transformateur ne dispose pas des informations ni des connaissances nécessaires pour prévoir les courants harmoniques générés par le convertisseur. En conséquence, les parties 1 et 2 de la CEI 61378 exigent qu'un spectre harmonique soit inclus dans les spécifications. L'acheteur est tenu de spécifier les harmoniques auxquels le transformateur sera soumis, alors que le constructeur du transformateur sera tenu de construire le transformateur en tenant compte des harmoniques spécifiés.

9.1.3 Autres conditions de service exceptionnelles

Pour toutes les autres conditions de service exceptionnelles, voir l'annexe A de la CEI 60076-1.

9.2 Informations à fournir par le constructeur

9.2.1 Caractéristiques thermiques

Il convient de donner l'échauffement estimé ou assigné du liquide du haut et l'échauffement moyen de l'enroulement lors de la phase de devis et de contrat.

En plus de l'échauffement indiqué en 4.2 de la CEI 60076-2, il convient de fournir également l'échauffement du point chaud du conducteur d'enroulement dans la plage de températures ambiantes.

Il convient de donner le type de système d'isolation à utiliser lors de la phase de devis et de contrat.

Il convient de donner la spécification CEI pour le liquide isolant s'il y a lieu, ainsi que sa classification conformément à la CEI 61100.

9.2.2 Pertes et impédance de court-circuit

Il convient de donner les pertes de charge et l'impédance de court-circuit à la température de référence pour les spécifications.

9.2.3 Garanties

Les mêmes garanties que celles recommandées dans la CEI 60076-1 s'appliquent. Il convient de garantir les pertes de charge et l'impédance de court-circuit à la température de référence. Il convient d'utiliser les pertes de charge à la température de référence dans un essai d'échauffement.

Il convient que le liquide du haut et les échauffements moyens de l'enroulement garantis ne dépassent pas les valeurs données dans les Tableaux 4 et 5.

10 Plaque signalétique et informations supplémentaires

10.1 Plaque signalétique

En plus des prescriptions de la CEI 60076-1, il convient que la plaque signalétique comprenne les informations suivantes:

- le type du système d'isolation (homogène, hybride, etc.);
- impédance de court-circuit à température de référence;
- échauffement(s) du point chaud de l'enroulement garanti(s).

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

9.1.3 Other unusual service conditions

For all other unusual service conditions see IEC 60076-1, Annex A.

9.2 Information to be provided by the manufacturer

9.2.1 Thermal characteristics

The estimated or rated top liquid temperature rise and average winding temperature rise should be given at quotation and contract stage.

In addition to the temperature rise specified in 4.2 of IEC 60076-2, the hot-spot temperature rise of the winding conductor over the ambient temperature should also be provided.

The type of insulation system to be used should be given at quotation and contract stage.

The IEC specification for the insulating liquid should be given where applicable and also its classification according to IEC 61100.

9.2.2 Losses and short-circuit impedance

The load losses and short-circuit impedance at reference temperature should be given for specification purposes.

9.2.3 Guarantees

The same guarantees as recommended in IEC 60076-1 apply. The load losses and the short-circuit impedance should be guaranteed at the reference temperature. The load losses at the reference temperature should also be used in a temperature rise test.

The guaranteed top liquid and average winding temperature rises should not exceed the values given in Tables 4 and 5.

10 Rating plate and additional information

10.1 Rating plate

In addition to the requirements in IEC 60076-1, the rating plate should include the following information:

- type of insulation system (homogenous, hybrid, etc.);
- short-circuit impedance at reference temperature;
- guaranteed winding hot-spot temperature rise(s).

10.2 Manuel du transformateur

Le manuel doit mettre en valeur le fait que, en raison de la présence de matériaux isolants différents de la cellulose et de l'huile minérale isolante, différents comportements peuvent être prévus par rapport au développement de gaz et d'humidité et donc, au traitement du dégazage et du séchage.

11 Essais

11.1 Généralités

Les prescriptions relatives à l'essai pour les transformateurs de puissance et les bobines d'inductance sont décrites dans les normes CEI 60076 et CEI 61378 pour les transformateurs de conversion.

11.2 Prescriptions générales pour les essais individuels, les essais de type et les essais spéciaux

Il est demandé de corriger les résultats mesurés à la température de référence. Dans le cas des transformateurs de catégorie II et III comme définis dans la CEI 60076-5, il peut être souhaitable de rassembler les données de l'AGD (analyse des gaz dissous) en vue de référence future en tant qu'outil de diagnostic, dans la mesure où les caractéristiques sont susceptibles de différer des transformateurs conventionnels.

11.3 Essai d'échauffement

11.3.1 Généralités

La constante de temps des transformateurs compacts à refroidissement OD avec un enroulement élevé pour l'échauffement du liquide est plus petite que dans un transformateur isolé conventionnellement. Une précaution spéciale est nécessaire pour diminuer le temps entre l'arrêt et la mesure de la résistance d'enroulement.

Dans le cas idéal, il convient que le temps entre la mise hors tension et le premier enregistrement soit inférieur à 1 min. Si ce court temps d'arrêt ne peut pas être réalisé, il est permis d'arrêter les ventilateurs de refroidissement et les pompes au même moment que la mise à l'arrêt afin de réduire l'incertitude de mesure de la courbe de refroidissement.

10.2 Transformer manual

The manual shall highlight that, due to the presence of insulating materials different from cellulose and mineral insulating oil, different behaviour can be expected in respect to gas and moisture development and therefore, degassing and drying treatment.

11 Testing

11.1 General

The test requirements for power transformers and reactors are described in IEC 60076 and IEC 61378 for convertor transformers.

11.2 General requirements for routine, type and special tests

It is required to correct the measured results to the reference temperature. On category II and III transformers as defined in IEC 60076-5, it may be desirable to collect DGA (dissolved gas analysis) data for future reference as a diagnostic tool, since the characteristics are likely to differ from conventional transformers.

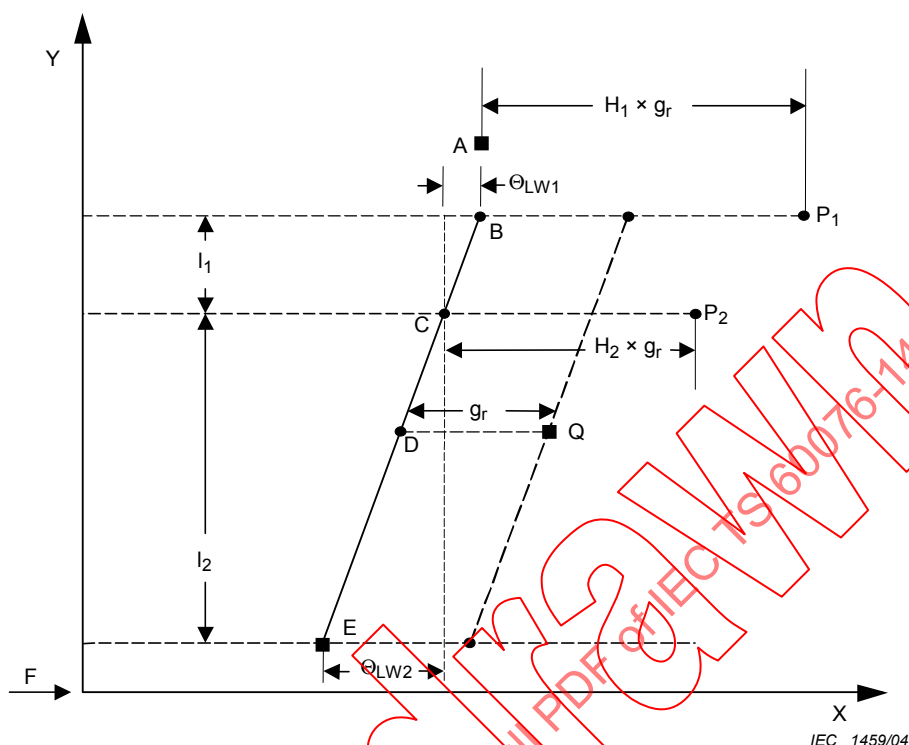
11.3 Temperature-rise test

11.3.1 General

The time constant of OD-cooled compact transformers with a high winding to liquid temperature rise is smaller than in a conventionally insulated transformers. Particular care is required to shorten the time between switch off and measurement of the winding resistance.

The time from switch off to first recording should ideally be less than 1 min. If this short switch off time cannot be achieved, it is permitted to switch off the cooling fans and pumps at the same time as the shut down in order to reduce the measuring uncertainty of the cooling curve.

11.3.2 Evaluation des essais d'échauffement pour les systèmes d'isolation mixtes



Légende

L'axe X indique la température

L'axe Y indique la position axiale le long de la hauteur du transformateur

A température moyenne de sortie du réservoir et de la poche de liquide du réservoir

B température du liquide du réservoir en haut de l'enroulement (censée être la même qu'à A)

C température de liquide dans l'enroulement à la limite de deux matériaux à isolation différente

D température moyenne du liquide dans le réservoir

g_r gradient thermique moyen d'enroulement au liquide à courant assigné

E température du liquide de fond entrant dans l'enroulement

F représente le fond du réservoir

H_1 facteur du point chaud associé à une partie de l'enroulement utilisant une isolation haute température

H_2 facteur du point chaud associé à une partie de l'enroulement utilisant une isolation conventionnelle

l_1 longueur de la partie supérieure de l'enroulement utilisant une isolation haute température

l_2 longueur de la partie inférieure de l'enroulement utilisant une isolation conventionnelle

P_1 température du point chaud en contact avec le matériau isolant haute température

P_2 température du point chaud en contact avec le matériau isolant conventionnel

Q température d'enroulement moyenne déterminée par mesure de résistance

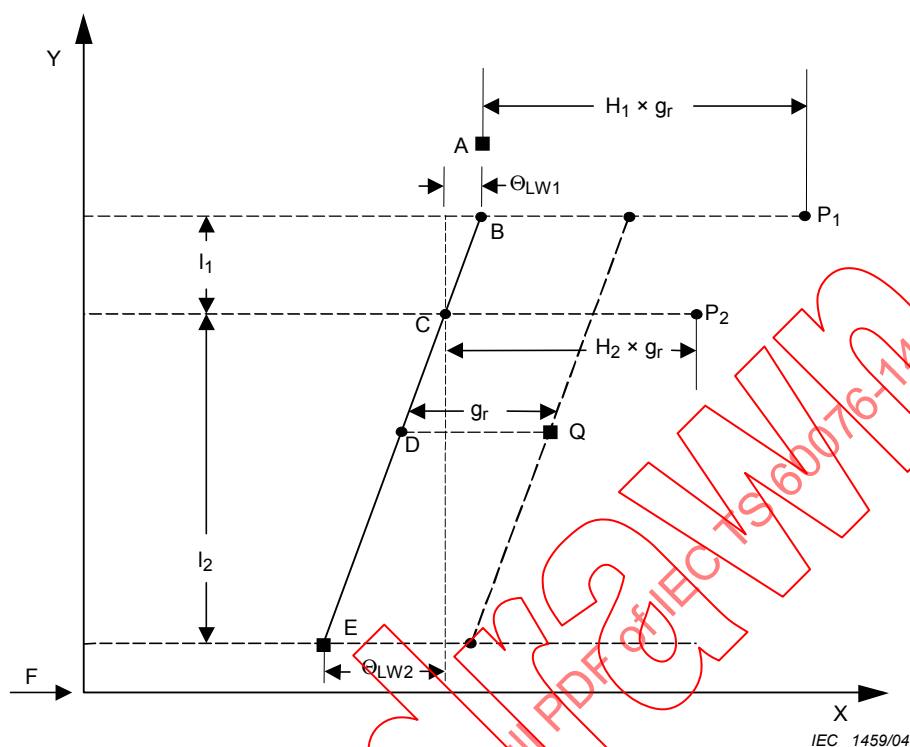
Θ_{LW1} échauffement axial du liquide dans la partie supérieure de l'enroulement

Θ_{LW2} échauffement axial du liquide dans la partie inférieure de l'enroulement

■ point mesuré; ● point calculé

Figure 6 – Schéma de température modifié pour les enroulements avec système d'isolation mixte

11.3.2 Evaluation of temperature rise tests for mixed insulation systems



Key

X axis indicates temperature

Y axis indicates the axial position along the transformer height

A average temperature of the tank outlet and the tank liquid pocket

B liquid temperature in the tank at the top of the winding (assumed to be the same as A)

C liquid temperature in the winding at the boundary of two different insulation materials

D average liquid temperature in tank

g_r average winding to liquid temperature gradient at rated current

E bottom liquid temperature entering the winding

F represents the bottom of the tank

H_1 hot-spot factor associated with part of the winding using high-temperature insulation

H_2 hot-spot factor associated with part of the winding using conventional insulation

l_1 length of the upper part of the winding using high-temperature insulation

l_2 length of the lower part of the winding using conventional insulation

P_1 hot-spot temperature in contact with the high-temperature insulation material

P_2 hot-spot temperature in contact with the conventional insulation material

Q average winding temperature determined by resistance measurement

Θ_{LW1} axial temperature rise of the liquid in the upper part of the winding

Θ_{LW2} axial temperature rise of the liquid in the lower part of the winding

■ measured point; ● calculated point

Figure 6 – Modified temperature diagram for windings with mixed insulation system

Il faut vérifier deux températures de point chaud différentes par calcul ou par essai: P_1 pour le système d'isolation entre B et C et P_2 pour le système d'isolation entre E et C. Il convient d'évaluer les températures dans chaque partie de l'enroulement comme décrit dans la future CEI 60076-7. Les facteurs du point chaud doivent être calculés par le fabricant.

La différence de température du liquide entre le haut et le bas du réservoir est:

$$\Theta_{LW} = \Theta_o - \Theta_b$$

où

Θ_o est la température du liquide dans la partie supérieure du réservoir;

Θ_b est la température du liquide dans la partie inférieure du réservoir.

Pour obtenir la température du liquide dans les conduits de refroidissement à la limite de deux parties d'enroulement différentes, (point C, sur la Figure 6), ce gradient thermique est divisé en deux parties:

$$\Theta_{LW1} = \frac{l_1}{l_1 + l_2} \times \Theta_{LW} \text{ pour la section 1}$$

$$\Theta_{LW2} = \Theta_{LW} - \Theta_{LW1} \text{ pour la section 2}$$

11.4 Essais de type diélectrique

Il convient que le liquide isolant soit approprié du point de vue diélectrique pour être utilisé à des températures élevées, s'il y a lieu.

12 Surveillance, diagnostics et maintenance

12.1 Introduction

La surveillance et le diagnostic des transformateurs font partie de l'approche stratégique pour l'analyse de risque et la gestion des biens qu'il convient d'avoir dans un programme d'entretien approprié et une durée de vie fiable. Dans des transformateurs à haute température il peut être plus important de surveiller la performance du système d'isolation car on ne dispose pas de données historiques significatives.

Une bonne approche diagnostique générale peut être trouvée dans l'IEEE 62.

12.2 Transformateurs remplis d'huile minérale isolante

En raison de la limitation de la température de l'huile minérale isolante dans des systèmes d'isolation contenant de la cellulose, la quantité du matériau isolant solide à haute température sera petite. Par conséquent il est probable que la composition des gaz, due tant au chauffage qu'à l'apparition des décharges partielles et d'arc électrique sera proche de celle des transformateurs traditionnels.

Dans des transformateurs avec des systèmes à isolation hybride, la source la plus probable de génération de gaz est l'huile minérale isolante. Lors d'échauffement, de défauts thermiques, de décharges partielles et d'arc électrique, une isolation haute température risque de se décomposer avec génération potentielle de gaz et d'autres produits secondaires (humidité, particules, furans, métaux, etc.).

Two different hot-spot temperatures need to be verified either by calculation or test. P_1 for the insulation system between B and C and P_2 for the insulation system between E and C. The temperatures in each part of the winding should be evaluated as described in future IEC 60076-7. The hot-spot factors need to be calculated by the manufacturer.

The temperature difference of the liquid in the tank between the top and the bottom is:

$$\Theta_{LW} = \Theta_o - \Theta_b$$

where

Θ_o is the top liquid temperature in the tank;

Θ_b is the bottom liquid temperature in the tank.

To obtain the liquid temperature in the cooling ducts at the boundary of two different winding parts, (point C, in Figure 6), this temperature gradient is split into two parts:

$$\Theta_{LW1} = \frac{l_1}{l_1 + l_2} \times \Theta_{LW} \text{ for section 1}$$

$$\Theta_{LW2} = \Theta_{LW} - \Theta_{LW1} \text{ for section 2}$$

11.4 Dielectric type tests

The insulating liquid should be dielectrically suitable for operation at elevated temperatures, when required.

12 Supervision, diagnostics, and maintenance

12.1 Introduction

Supervision and diagnostics of transformers are part of the strategic approach for risk analysis and asset management which should result in an appropriate maintenance programme and reliable service life. In high-temperature transformers it may be more important to monitor the performance of the insulation system since significant historical data is not yet available.

A good general diagnostic approach can be found in IEEE 62.

12.2 Transformers filled with mineral insulating oil

Because of the temperature limitation of the mineral insulating oil in insulation systems containing cellulose, the amount of solid high-temperature insulating material will be small. Hence, it is likely that the composition of gases, due to heating, inception of partial discharges and electrical arcing will be close to that of conventional transformers.

In transformers with hybrid insulation systems, the most probable source of gas generation is the mineral insulating oil. When overheating, thermal faults, partial discharges or electrical arcing arise, decomposition of high-temperature solid insulation is possible with the potential for generating gases and other by-products (moisture, particles, furans, metals, etc.).

Il peut s'avérer utile de prélever régulièrement des échantillons d'huile en vue d'analyse. La CEI 60422 donne des informations sur la surveillance et la maintenance d'huiles minérales isolantes.

12.3 Transformateurs remplis de liquides isolants à haute température

Lors d'échauffement, de défauts thermiques, de décharges partielles et d'arc électrique dans des transformateurs à systèmes d'isolation homogène haute température, une isolation liquide et/ou solide risque de se décomposer avec génération potentielle de gaz et d'autres produits secondaires (humidité, particules, furans, métaux, etc.).

Sur les transformateurs de catégorie II et III comme définis dans la CEI 60076-5, il peut être souhaitable de rassembler les données de l'AGD (analyse des gaz dissous) en vue de référence future en tant qu'outil de diagnostic, dans la mesure où les caractéristiques sont susceptibles de différer de celles des transformateurs conventionnels. La CEI 60944 et la CEI 61203 donnent respectivement des informations sur la surveillance et la maintenance des liquides au silicone et d'esters de transformateur dans le matériel.