

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

**Power transformers –
Part 15: Gas-filled power transformers**

**Transformateurs de puissance –
Partie 15: Transformateurs de puissance à isolation gazeuse**



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2015 IEC, Geneva, Switzerland

All rights reserved. Unless otherwise specified, 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 either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester. If you have any questions about IEC copyright or have an enquiry about obtaining additional rights to this publication, please contact the address below or your local IEC member National Committee for further information.

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, 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'IEC ou du Comité national de l'IEC du pays du demandeur. Si vous avez des questions sur le copyright de l'IEC ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de l'IEC de votre pays de résidence.

IEC Central Office
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel.: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00
info@iec.ch
www.iec.ch

About the IEC

The International Electrotechnical Commission (IEC) is the leading global organization that prepares and publishes International Standards for all electrical, electronic and related technologies.

About IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC. Please make sure that you have the latest edition, a corrigenda or an amendment might have been published.

IEC Catalogue - webstore.iec.ch/catalogue

The stand-alone application for consulting the entire bibliographical information on IEC International Standards, Technical Specifications, Technical Reports and other documents. Available for PC, Mac OS, Android Tablets and iPad.

IEC publications search - www.iec.ch/searchpub

The advanced search enables to find IEC publications by a variety of criteria (reference number, text, technical committee,...). It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Stay up to date on all new IEC publications. Just Published details all new publications released. Available online and also once a month by email.

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing more than 30 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in 15 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

IEC Glossary - std.iec.ch/glossary

More than 60 000 electrotechnical terminology entries in English and French extracted from the Terms and Definitions clause of IEC publications issued since 2002. Some entries have been collected from earlier publications of IEC TC 37, 77, 86 and CISPR.

IEC Customer Service Centre - webstore.iec.ch/csc

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre: csc@iec.ch.

A propos de l'IEC

La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est la première organisation mondiale qui élabore et publie des Normes internationales pour tout ce qui a trait à l'électricité, à l'électronique et aux technologies apparentées.

A propos des publications IEC

Le contenu technique des publications IEC est constamment revu. Veuillez vous assurer que vous possédez l'édition la plus récente, un corrigendum ou amendement peut avoir été publié.

Catalogue IEC - webstore.iec.ch/catalogue

Application autonome pour consulter tous les renseignements bibliographiques sur les Normes internationales, Spécifications techniques, Rapports techniques et autres documents de l'IEC. Disponible pour PC, Mac OS, tablettes Android et iPad.

Recherche de publications IEC - www.iec.ch/searchpub

La recherche avancée permet de trouver des publications IEC en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...). Elle donne aussi des informations sur les projets et les publications remplacées ou retirées.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Restez informé sur les nouvelles publications IEC. Just Published détaille les nouvelles publications parues. Disponible en ligne et aussi une fois par mois par email.

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne de termes électroniques et électriques. Il contient plus de 30 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 15 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

Glossaire IEC - std.iec.ch/glossary

Plus de 60 000 entrées terminologiques électrotechniques, en anglais et en français, extraites des articles Termes et Définitions des publications IEC parues depuis 2002. Plus certaines entrées antérieures extraites des publications des CE 37, 77, 86 et CISPR de l'IEC.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions contactez-nous: csc@iec.ch.



IEC 60076-15

Edition 2.0 2015-04

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

**Power transformers –
Part 15: Gas-filled power transformers**

**Transformateurs de puissance –
Partie 15: Transformateurs de puissance à isolation gazeuse**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 29.180

ISBN 978-2-8322-2626-1

Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor. Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.
--

CONTENTS

FOREWORD.....	4
1 Scope.....	6
2 Normative references.....	6
3 Terms and definitions	7
3.5 Terms, definitions, symbols and units relating to gas and vacuum tightness	8
4 Service conditions	8
5 Rating and general requirements	8
5.1 Rated power	8
5.1.1 General	8
5.1.2 Preferred values of rated power.....	9
5.1.3 Minimum power under alternative cooling modes	9
5.1.4 Loading beyond rated power	9
5.2 Cooling mode.....	9
5.2.1 General	9
5.2.2 Identification symbols.....	10
5.2.3 Transformers with alternative cooling methods.....	10
5.3 Temperature-rise limits.....	10
5.3.1 Classification and insulation system temperature	10
5.3.2 Normal temperature-rise limits.....	11
5.3.3 Reduced temperature-rises for transformers designed for high cooling air temperatures or special air cooling conditions.....	11
5.3.4 High altitude temperature-rise correction	11
5.3.5 Reduced temperature-rise for transformers designed for high cooling water temperatures	12
5.3.6 Temperature rise during specified load cycle	12
5.4 Insulation level.....	12
5.5 Load rejection on transformers directly connected to a generator	12
5.6 Rated voltage and rated frequency	12
5.7 Provision for unusual service conditions	12
5.8 Highest voltage for equipment U_m and dielectric tests levels.....	12
5.9 Additional information required for enquiry	12
5.10 Components and materials	12
5.11 Requirements for gases and gas tightness.....	13
5.11.1 Requirements for gases	13
5.11.2 Gas tightness.....	13
6 Requirements for transformers having a tapped winding	13
7 Connection phase displacement symbols	13
8 Rating plates	13
8.1 General.....	13
8.2 Information to be given in all cases.....	13
8.3 Additional information to be given when applicable	14
9 Safety, environmental and other requirements	15
9.1 Safety and environmental requirements	15
9.1.1 Gas leaks	15
9.1.2 Safety considerations.....	15
9.2 Dimensioning of neutral connection	16

9.3	Handling procedure for SF ₆	16
9.4	d.c. currents in neutral circuits.....	16
9.5	Centre of gravity marking	16
10	Tolerances	16
11	Tests.....	16
11.1	General requirements for routine, type and special tests	16
11.1.1	General	16
11.1.2	Routine tests.....	17
11.1.3	Type tests.....	18
11.1.4	Special tests	18
11.2	Measurement of short-circuit impedance and load loss.....	19
11.3	Leak testing with pressure (tightness test)	19
11.4	Pressure tests for tanks.....	19
11.5	Temperature-rise test.....	20
11.5.1	General	20
11.5.2	Corrections	20
11.6	Measurement of sound level.....	20
11.6.1	General	20
11.6.2	Prescribed contour.....	21
12	Electromagnetic compatibility (EMC)	21
13	High frequency switching transients	21
14	Earthing terminal	21
15	Information required with enquiry and order.....	21
Annex A (informative)	Check list of information to be provided with enquiry and order.....	22
A.1	Rating and general data	22
A.1.1	Normal information.....	22
A.1.2	Special information	23
A.2	Parallel operation.....	25
Annex B (informative)	Transient loading – Mathematical model.....	26
B.1	General.....	26
B.2	Mathematical model for temperature distribution in a winding of a gas-filled power transformer – The hot-spot concept.....	26
Annex C (informative)	Gauges, indicators and relays for gas-filled power transformers.....	28
Bibliography		29
Figure B.1	– Temperature distribution model	26
Table 1	– Classification and insulation system temperature	11
Table 2	– Winding temperature-rise limits.....	11
Table 3	– Exponents for the corrections of temperature rise test results.....	20
Table C.1	– Comparison of gauges, indicators and relays between gas-filled power transformers and oil-immersed power transformers.....	28

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

POWER TRANSFORMERS –

Part 15: Gas-filled power transformers

FOREWORD

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

International Standard IEC 60076-15 has been prepared by IEC technical committee 14: Power transformers.

This second edition of IEC 60076-15 cancels and replaces the first edition published in 2008 and constitutes a technical revision.

The following main technical changes from the first edition are:

- Modified in accordance with the related revised standards of IEC 60076-1, IEC 60076-2, IEC 60076-3 and related items of SF₆ gas in the revised standard of “High-voltage switchgear and controlgear”
- Added the clause “minimum power under alternative cooling modes”
- Added the clause “safety, environmental and other requirements”
- Added the clause “d.c. currents in neutral circuits”
- Added the clause “electromagnetic compatibility (EMC)”
- Added the clause “high frequency switching transients”

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

FDIS	Report on voting
14/811/FDIS	14/818/RVD

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

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

A list of all parts in the IEC 60076 series, published under the general title *Power transformers*, can be found on the IEC website.

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

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

POWER TRANSFORMERS –

Part 15: Gas-filled power transformers

1 Scope

This part of IEC 60076 applies to three-phase and single-phase gas-filled power transformers (including auto-transformers) with the exception of certain categories of small and special transformers such as:

- single-phase transformers with rated power less than 1 kVA and three-phase transformers less than 5 kVA;
- transformers, which have no windings with rated voltage higher than 1 000 V;
- instrument transformers;
- traction transformers mounted on rolling stock;
- starting transformers;
- testing transformers;
- welding transformers.

When IEC standards do not exist for such categories of transformers (in particular transformer having no winding exceeding 1 000 V for industrial applications), this part of IEC 60076 may still be applicable either as a whole or in part. This standard does not address the requirements that would make a transformer suitable for mounting in a position accessible to the general public. For those categories of power transformers and reactors which have their own IEC standards, this part is applicable only to the extent in which it is specifically called up by cross-reference in the other standard. Such standards exist for:

- reactors in general (IEC 60076-6);
- self-protected transformers (IEC 60076-13);
- transformers for wind turbine applications (IEC 60076-16);
- traction transformers and traction reactors (IEC 60310);
- converter transformers for industrial applications (IEC 61378-1);
- converter transformers for HVDC applications (IEC 61378-2).

At several places in this part it is specified or recommended that an 'agreement' should be reached concerning alternative or additional technical solutions or procedures. Such agreement is made between the manufacturer and the purchaser. The matters should preferably be raised at an early stage and the agreements included in the contract specification.

NOTE This standard can be applicable to the gas parts of a transformer in which an insulating gas is used with an insulating liquid.

2 Normative references

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

IEC 60076-1:2011, *Power transformers – Part 1: General*

IEC 60076-2:2011, *Power transformers – Part 2: Temperature rise for liquid-immersed transformers*

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

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

IEC 60076-10, *Power transformers – Part 10: Determination of sound levels*

IEC 60137, *Insulated bushings for alternating voltages above 1 000 V*

IEC 60376, *Specification of technical grade sulfur hexafluoride (SF₆) for use in electrical equipment*

IEC 60480, *Guidelines for the checking and treatment of sulfur hexafluoride (SF₆) taken from electrical equipment and specification for its re-use*

IEC 62271-1, *High-voltage switchgear and controlgear – Part 1: Common specifications*

IEC 62271-4:2002, *High-voltage switchgear and controlgear – Part 4: Handling procedures for sulphur hexafluoride (SF₆) and its mixtures*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the following terms and definitions apply.

NOTE Other terms use the meanings ascribed to them in IEC 60076-1, 2, 3, 5 and 10, or in the IEC 60050 series.

3.1

gas-filled power transformer

transformer of which the magnetic circuit and windings are placed in an enclosure filled with an insulating gas

Note 1 to entry: Generally sulfur hexafluoride (SF₆) gas is used, and sometimes this transformer is called a gas-insulated transformer.

3.2

rated gas pressure

gas pressure (gauge pressure) at 20 °C designed for use in a gas-filled power transformer

3.3

guaranteed minimum gas pressure

minimum gas pressure (gauge pressure) at 20 °C, which is able to guarantee the insulation of a gas-filled power transformer

Note 1 to entry: Transformer of which the magnetic circuit and windings are placed in an enclosure or a vessel filled with an insulating liquid such as perfluorocarbon, natural ester, synthetic ester, silicon oil and vegetable oil should be considered a liquid-immersed type transformer.

3.4

design pressure of tanks

relative pressure used to determine the design of the tanks

Note 1 to entry: It is at least equal to the maximum pressure in the tank at the highest temperature that the gas can reach under specified maximum service condition.

3.5 Terms, definitions, symbols and units relating to gas and vacuum tightness

3.5.1

absolute leakage rate

F

amount of gas escaped by time unit at rated filling pressure (or density), expressed in Pa m³/s

3.5.2

permissible leakage rate

F_p

maximum permissible absolute leakage rate of gas at rated filling pressure (or density) specified by the manufacturer, expressed in Pa m³/s

3.5.3

relative leakage rate

F_{rel}

absolute leakage rate related to the total amount of gas in the transformer at rated filling pressure (or density)

Note 1 to entry: It is expressed in percentage per year or per day.

4 Service conditions

Service conditions in IEC 60076-1 apply. As far as cooling conditions are concerned, see IEC 60076-2.

5 Rating and general requirements

5.1 Rated power

5.1.1 General

The rated power for each winding shall either be specified by the purchaser or the purchaser shall provide sufficient information to the manufacturer to determine the rated power at the enquiry stage.

The transformer shall have an assigned rated power for each winding which shall be marked on the rating plate. The rated power refers to continuous loading. This is a reference value for guarantees and tests concerning load losses and temperature rises.

If different values of apparent power are assigned under different circumstances, for example, with different methods of cooling, the highest of these values is the rated power.

A two-winding transformer has only one value of rated power, identical for both windings.

For multi-winding transformers, the purchaser shall specify the required power-loading combinations, stating, when necessary, the active and reactive outputs separately.

When the transformer has rated voltage applied to a primary winding, and rated current flows through the terminals of a secondary winding, the transformer receives the relevant rated power for that pair of windings.

The transformer shall be capable of carrying, in continuous service, the rated power (for a multi-winding transformer: the specified combination(s) of winding rated power(s) under conditions listed in Clause 4 of IEC 60076-1:2011 and without exceeding the temperature-rise limitations specified in 5.3.

NOTE 1 The interpretation of rated power according to this subclause implies that it is a value of apparent power input to the transformer – including its own absorption of active and reactive power. The apparent power that the transformer delivers to the circuit connected to the terminals of the secondary winding under rated loading differs from the rated power. The voltage across the secondary terminals differs from rated voltage by the voltage drop (or rise) in the transformer. Allowance for voltage drop, with regard to load power factor, is made in the specification of the rated voltage and the tapping range (see Clause 7 of IEC 60076-8:1997).

National practices can be different.

NOTE 2 For a multi-winding transformer, half the arithmetic sum of the rated power values of all windings (separate windings, not auto-connected) gives a rough estimate of its physical size as compared with a two winding transformer.

5.1.2 Preferred values of rated power

Preferred values of rated power in IEC 60076-1 apply.

5.1.3 Minimum power under alternative cooling modes

Where the user has a particular requirement for a minimum power under a particular cooling mode other than the cooling mode for rated power, this shall be stated and subjected to agreement between the supplier and the purchaser in the tender stage.

The transformer shall be capable of carrying, in continuous service, the specified minimum power (for a multi-winding transformer: the specified combination(s) of winding rated power(s) under conditions listed in Clause 4 of IEC 60076-1:2011, and under the specified cooling mode, without exceeding the temperature-rise limitations specified in 5.3.

NOTE An example of this is where the transformer is required to operate at a particular minimum percentage of rated power with the forced cooling out of service (GNAN) to allow for the loss of auxiliary supply and large GNAN rating will be pushed up the transformer cost. A minimum percentage of rated power is determined with consideration of the cost-effectiveness.

5.1.4 Loading beyond rated power

Temporary loading beyond nameplate rating capability is subjected to agreement between the supplier and the purchaser in the tender stage.

NOTE 1 The concept of IEC 60076-7 can be applicable to the consideration of the loading beyond rated power of gas-filled power transformers, but constants and/or factors may not be applicable.

Any specific requirements for loading beyond rated power, operation at higher external cooling medium temperatures or reduced temperature rise limits shall be specified by the purchaser in the enquiry and the contract. Any additional tests or calculations required to verify compliance with these specific requirements shall also be specified.

NOTE 2 This option is intended to be used in particular to give a basis for design and guarantees concerning temporary emergency loading of power transformers.

The bushings, tap-changers, current transformers and other auxiliary equipment shall be selected so as not to restrict the loading capability of the transformer.

NOTE 3 The relevant component standards IEC 60137 for bushings and IEC 60214-1 for tap-changers are consulted for the loading capability of those components.

NOTE 4 These requirements do not apply to transformers for special applications, which do not need a loading capability beyond rated power. For these transformers, if such a capability is required, it is specified.

5.2 Cooling mode

5.2.1 General

The user shall specify the cooling medium (air or water). If the user has particular requirements for the cooling method(s) or cooling equipment, this shall be stated in the enquiry and the contract.

5.2.2 Identification symbols

Transformers shall be identified according to the cooling method employed. For gas-filled power transformers, this identification is expressed by a four-letter code as described below.

First letter: Internal cooling medium:

- G: insulating gas;

Second letter: Circulation mechanism for internal cooling medium:

- N: natural/thermosiphon flow through cooling equipment and in windings;
- F: forced circulation through cooling equipment (e.g., gas blower), thermosiphon flow in windings;
- D: forced circulation through cooling equipment, directed from the cooling equipment into at least the main windings.

Third letter: External cooling medium:

- A: air;
- W: water.

Fourth letter: Circulation mechanism for external cooling medium:

- N: natural convection;
- F: forced circulation (fans, air blowers, water pumps).

5.2.3 Transformers with alternative cooling methods

A transformer may be specified with alternative cooling methods. In this case, the specification and the nameplate shall then carry information about the power values at which the transformer fulfils the temperature rise limitations when these alternatives apply.

The power value for the alternative with the highest cooling capacity is the rated power of the transformer (or of an individual winding of a multi-winding transformer). The alternatives are conventionally listed in rising order of cooling capacity.

EXAMPLE

GNAN/GDAF. The transformer has cooling equipment with blowers and fans but is also specified with a reduced power-carrying under natural cooling.

NOTE The percentage of natural cooling capacity to forced cooling capacity of gas-filled transformers is smaller than that of oil-immersed transformers. It is not difficult generally in oil-immersed transformers to achieve ONAN capacity as 50 % of the OFAF or ODAF capacity. But in gas-filled transformers, it is sometimes difficult and not economical to achieve GNAN capacity as 50 % of the GDAF capacity. The purchaser consults with the manufacturer about natural cooling capacity to forced cooling capacity.

5.3 Temperature-rise limits

5.3.1 Classification and insulation system temperature

Transformers are classified by the insulation systems shown in Table 1.

An approximate value for practical purposes of hot-spot temperature can be calculated by using the concept of Annex B.

The application of insulating materials with different thermal classes leads to unconventional insulation systems (see the examples of unconventional insulation systems as described in Clause 5 of IEC 60076-14:2013).

Table 1 – Classification and insulation system temperature

Letter designation ^a	Thermal class (insulation system temperature °C)
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180
N	200
R	220
^a Temperature classifications are given in IEC 60085.	

5.3.2 Normal temperature-rise limits

The temperature rise of each winding of the transformer, designed for operation at normal service conditions, shall not exceed the corresponding limit specified in Table 2 when tested in accordance with 11.5.

The temperature of the core, metallic parts and adjacent materials shall not reach a value that will cause damage to any part of the transformer.

In most of the gases, the temperature-rise limit of gas is higher than the temperature-rise limit of winding, so that the temperature-rise limit of gas is not necessary to be specified. If necessary, it is subjected to agreement between the supplier and the purchaser.

Table 2 – Winding temperature-rise limits

Thermal class (insulation system temperature °C)	Average winding temperature-rise limits K (see note)
105	60
120	75
130	80
155	100
180	125
200	135
220	150
NOTE Temperature-rise measured in accordance with 11.5.	

5.3.3 Reduced temperature-rises for transformers designed for high cooling air temperatures or special air cooling conditions

Reduced temperature-rises for transformers designed for high cooling air temperatures or special air cooling conditions in IEC 60076-2 apply.

5.3.4 High altitude temperature-rise correction

Unless otherwise agreed between the supplier and the purchaser, for transformers designed for operation at an altitude greater than 1 000 m but tested at normal altitudes, the limits of temperature-rise given in Table 2 shall be reduced by the following amounts for each 500 m by which the intended working altitude exceeds 1 000 m:

- natural-air-cooled transformers: 2 %;
- forced-air-cooled transformers: 3 %.

A corresponding reverse correction may be applied in cases where the altitude of the factory is above 1 000 m and the altitude of the installation site is below 1 000 m.

Any temperature-rise correction in dependence on altitude shall be rounded to the nearest whole number of Kelvin.

The influence of differing ambient temperature or altitude on the air cooling of the tank is disregarded for the water-cooled transformers.

5.3.5 Reduced temperature-rise for transformers designed for high cooling water temperatures

Reduced temperature-rise for transformers designed for high cooling water temperatures in IEC 60076-2 apply.

5.3.6 Temperature rise during specified load cycle

By agreement between manufacturer and purchaser, temperature rise limits can be guaranteed and/or a special test regarding load cycle operation specified (see IEC 60076-7).

5.4 Insulation level

Insulation level described in IEC 60076-3 apply.

5.5 Load rejection on transformers directly connected to a generator

The requirements for transformer connected directly to generators described in IEC 60076-1 apply.

5.6 Rated voltage and rated frequency

Rated voltage and rated frequency in IEC 60076-1 apply.

5.7 Provision for unusual service conditions

Any service conditions not covered by the normal service conditions shall be identified by the purchaser as described in IEC 60076-1.

5.8 Highest voltage for equipment U_m and dielectric tests levels

Highest voltage for equipment U_m and dielectric tests levels in IEC 60076-1 apply.

5.9 Additional information required for enquiry

Additional information required for enquiry that is described in IEC 60076-1 apply.

5.10 Components and materials

All components and materials used in the construction of the transformer shall comply with the requirements of the relevant IEC standards where they exist unless otherwise agreed or specified. In particular bushings shall comply with IEC 60137 and tap-changers shall comply with IEC 60214-1. Insulating gas shall comply with IEC 60376 and 60480 for new and used SF₆ or as agreed for other gases.

5.11 Requirements for gases and gas tightness

5.11.1 Requirements for gases

The manufacturer shall specify the type and the required quantity, quality and density of the gas to be used in a gas-filled power transformer.

The maximum allowable moisture content within gas-filled power transformer filled with gas at rated gas pressure shall be such that the dew-point is not higher than -20 °C for a measurement at 20 °C . Adequate correction shall be made for measurement made at other temperatures.

NOTE 1 A dew point of -5 °C for measurement at 20 °C is acceptable for the gas-filled compartments other than main tank.

NOTE 2 The requirement level for the purity of SF_6 before filling transformers is equal and more than 97 %.

NOTE 3 For the measurement and determination of the dew point, see IEC 60376 and IEC 60480.

5.11.2 Gas tightness

IEC 62271-1 gives general rules to the gas tightness of high-voltage switchgears. This rule can be applicable to the gas-filled power transformers.

The tightness characteristic shall be consistent with a minimum maintenance and inspection philosophy. The tightness for gas is specified by the relative leakage rate F_{rel} .

For SF_6 -filled transformers, the relative leakage rate of SF_6 shall not exceed 0,5 percent per year. For transformers filled with the mixture, consisting of SF_6 and other gases, the relative leakage rate of the mixture shall not exceed 0,5 % per year.

6 Requirements for transformers having a tapped winding

Requirements for transformers having a tapped winding in IEC 60076-1 apply.

7 Connection phase displacement symbols

Connection phase displacement symbols in IEC 60076-1 apply.

8 Rating plates

8.1 General

The transformer shall be provided with a rating plate of weatherproof material, fitted in a visible position, showing the appropriate items indicated below. The entries on the plate shall be indelibly marked.

8.2 Information to be given in all cases

The information listed below shall be included on the rating plate in all cases.

- a) Kind of gas-filled power transformer (for example gas-filled power transformer, gas-filled auto-transformer, gas-filled series transformer, etc.).
- b) Number of this standard.
- c) Manufacturer's name, country and town where the transformer was assembled.
- d) Manufacturer's serial number.
- e) Year of manufacture.

- f) Number of phases.
- g) Rated power (in kVA or MVA). (For multi-winding transformers, the rated power of each winding shall be given. The loading combinations shall also be indicated unless the rated power of one of the windings is the sum of the rated powers of the other windings.)
- h) Rated frequency (in Hz).
- i) Rated voltages (in V or kV) and tapping range.
- j) Rated currents (in A or kA).
- k) Connection and phase displacement symbol.
- l) Short-circuit impedance, measured value in percentage. For multi-winding transformers, several impedances for different two-winding combinations are to be given with the respective reference power values. For transformers having a tapped winding, see also 5.5 and item b) of 8.3 in IEC 60076-1:2011.
- m) Type of cooling. (If the transformer has several assigned cooling methods, the respective power values may be expressed as percentages of rated power, for example GNAN/GNAF 30/100 %.)
- n) Total mass.
- o) Mass and type of insulating gas with reference to the relevant IEC standard.
- p) Maximum system short-circuit power or current used to determine the transformer withstand capability if not infinite.
- q) Insulation system temperature for each winding (for multi-winding transformers, the insulation system temperature of each winding should be given).
- r) Rated gas pressure (in MPa-gauge.)
- s) Guaranteed minimum gas pressure (in MPa-gauge).

If the transformer has more than one set of ratings, depending upon different connections of windings which have been specifically allowed for in the design, the additional ratings shall all be given on the rating plate, or separate rating plates shall be fitted for each set.

8.3 Additional information to be given when applicable

The information listed below shall be included on the rating plate when it is applicable to a particular transformer.

- a) For transformers having one or more windings with 'highest voltage for equipment' U_m equal to or above 3,6 kV:
 - short notation of insulation levels (withstand voltages) as described in IEC 60076-3.
- b) Tapping designations
 - For transformers with highest rated voltage less than or equal to 72,5 kV and with rated power less than or equal to 20 MVA (three phase) or 6,7 MVA (single phase) having a tapping range not exceeding $\pm 5\%$, tapping voltages on the tapped winding for all tappings.
 - For all other transformers
 - a table stating tapping voltage and maximum allowable tapping service voltage, tapping current, tapping power, and internal connection for all tappings,
 - a table showing the short-circuit impedance values for the principal tapping and at least the extreme tappings in % with the reference power.
- c) Guaranteed maximum temperature rises of top gas and windings (if not normal values). When a transformer is intended for installation at high altitude, the altitude, power rating and temperature rise at that altitude shall be indicated on the nameplate together with one of the following:
 - If the transformer is designed for installation at high altitude, the (reduced) temperature rise for rated power under normal external cooling medium temperature conditions.

- If the transformer is designed for normal external cooling medium temperature conditions, the rated power for guaranteed temperature rise under normal external cooling medium temperature conditions.
- d) Connection diagram (in cases where the connection symbol will not give complete information regarding the internal connections). If the connections can be changed inside the transformer, this shall be indicated either on the same plate, a separate plate or with duplicate or reversible rating plates. The connection fitted at delivery shall be indicated. Where non-linear resistors or fuses are employed within the transformer, the location and connection of such equipment shall be shown on the connection diagram plate with terminal markings. An indication of any built-in current transformers when used shall be presented on the diagram.
- e) Transportation mass (if different from total mass).
- f) Untanking mass (for transformers exceeding 5 t total mass).
- g) Vacuum withstand capability of the tank, tap-changers and cooling equipment.
- h) For multi-winding transformers, any restriction on power-loading combinations.
- i) For transformers equipped with winding temperature indicators (WTI), the settings for each WTI. This is normally the difference between the winding hot-spot temperature at rated power and the top gas temperature calculated from temperature rise test results. If more than one cooling method is specified, different settings may be required for each cooling method.
- j) For all current transformers installed inside the transformer, the location, ratio(s), accuracy class and rated output (VA rating) of the current transformer.
- k) Minimum temperature of cooling medium if not $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ for indoor transformers or $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ for outdoor transformers.

Plates with identification and characteristics of auxiliary equipment according to standards for such components (bushings, tap-changers, current transformers, special cooling equipment) shall be provided either on the components themselves or on the transformer.

9 Safety, environmental and other requirements

9.1 Safety and environmental requirements

9.1.1 Gas leaks

Transformer manufacturers shall consider the effective containment of the gas of the transformer and take effective measures to prevent leakage. Consideration shall be given to the long term performance of items such as:

- joint design;
- gasket materials;
- welds;
- corrosion prevention.

Transformers shall be designed to be leak free and any leakage found on site at the end of commissioning shall be corrected by the responsible supplier.

9.1.2 Safety considerations

The manufacturer shall consider the safety of operators and maintenance staff in the design of the transformer in particular the following aspects:

- accessibility to parts with high temperatures;
- accessibility of live parts;
- accessibility of moving parts;

- lifting and handling provisions;
- safety during on site gasses handling;
- access for maintenance, where maintenance is required;
- working at height.

Where installation may affect any of the above, suitable installation instructions shall be provided with the transformer.

NOTE 1 ISO 14122 series is consulted where ladders, platforms and similar means of access are provided with the transformer.

NOTE 2 Safety during on site SF₆ handling is described in Annex B of IEC 62271-4:2002. Specially, SF₆ is handled by certified personal, only.

9.2 Dimensioning of neutral connection

Dimensioning of neutral connection in IEC 60076-1 apply.

9.3 Handling procedure for SF₆

SF₆ should be handled in a closed cycle, to avoid any deliberate release to the environment. Among all the voluntary initiatives, gas recovery and reuse have the highest priority.

For the development, manufacturing, installation, operation, maintenance and end-of-life disposal of electric power equipment utilising SF₆, state-of-the-art technologies and procedures are applied to minimize SF₆ emissions. Handling procedure for SF₆ described in IEC 62271-4 apply.

9.4 d.c. currents in neutral circuits

d.c. currents in neutral circuits in IEC 60076-1 apply.

9.5 Centre of gravity marking

Centre of gravity marking in IEC 60076-1 apply.

10 Tolerances

Tolerances in IEC 60076-1 apply.

11 Tests

11.1 General requirements for routine, type and special tests

11.1.1 General

Transformers shall be subjected to tests as specified below.

Tests other than temperature rise tests shall be made at an external cooling medium temperature between 10 °C and 40 °C. See 11.5 for temperature rise tests.

Tests shall be made at the manufacturer's works, unless otherwise agreed between the manufacturer and the purchaser.

All external components and fittings that are likely to affect the performance of the transformer during the test shall be in place.

If the transformer cannot be mounted in its intended operating condition for testing (for example if the transformer is fitted with test-turrets and test-bushings or the arrangement of cooling equipment cannot be mounted in the in-service position, during the relevant factory test), an agreement shall be found between manufacturer and purchaser before the commencement of tests. If there are any limitations known at the tender stage, these shall be made clear by the manufacturer.

Tapped windings shall be connected on their principal tapping, unless the relevant test clause requires otherwise or unless the manufacturer and the purchaser agree otherwise.

The test basis for all characteristics other than insulation is the rated condition, unless the test clause states otherwise.

All measuring systems used for the tests shall have certified, traceable accuracy and be subjected to periodic calibration.

Specific requirements on the accuracy and verification of the measuring systems are described in IEC 60060 series and IEC 60076-8.

All measurements and tests requiring power frequency supply shall be performed with the supply frequency within 1 % of the rated frequency of the transformer. The waveshape of the supply voltage shall be such that the total harmonic content does not exceed 5 %. If this condition is not satisfied then the effect of the waveshape on the measured parameter shall be evaluated by the manufacturer and subject to approval by the purchaser. Loss measurements should not be corrected downwards to account for harmonics in the supply voltage except as allowed in 11.5 of IEC 60076-1:2011. Where a three-phase supply is used, the supply voltage shall be symmetrical. The maximum voltage across each phase winding under test shall not differ from the minimum voltage by more than 3 %.

Any inability of the manufacturer to perform the test or measurement at the rated frequency shall be stated by the manufacturer at the tender stage and appropriate conversion factors agreed.

The following list of tests is not in any specific order. If the purchaser requires the tests performed in a particular order, this shall be included in the enquiry.

11.1.2 Routine tests

11.1.2.1 General

Routine tests listed in 11.1.2.2 shall be applied to all transformers, and additional routine tests listed in 11.1.2.3 shall be applied to transformers with $U_m > 72,5$ kV.

11.1.2.2 Routine test for all transformers

- a) Measurement of winding resistance (IEC 60076-1).
- b) Measurement of voltage ratio and check of phase displacement (IEC 60076-1).
- c) Measurement of short-circuit impedance and load loss (11.2).
- d) Measurement of no-load loss and current (IEC 60076-1).
- e) Dielectric routine tests (IEC 60076-3).
- f) Tests on on-load tap-changers, where appropriate (IEC 60076-1).
- g) Tightness tests for tanks (11.3).
- h) Pressure tests for tanks (11.4).
- i) Check of the ratio and polarity of built-in current transformers (IEC 60076-1).
- j) Check of core and frame insulation for gas-filled power transformers with core or frame insulation (IEC 60076-1).

11.1.2.3 Additional routine tests for transformers with $U_m > 72,5$ kV

- a) Determination of capacitances windings-to-earth and between windings (IEC 60076-1).
- b) Measurement of d.c. insulation resistance between each winding to earth and between windings (IEC 60076-1).
- c) Measurement of dissipation factor ($\tan \delta$) of the insulation system capacitances (IEC 60076-1).
- d) Measurement of dissolved gasses in insulating gas from main-transformer compartment except diverter switch compartment, cable head compartment and gas-insulated switchgear (GIS) structure compartment.
- e) Measurement of no-load loss and current at 90 % and 110 % of rated voltage (IEC 60076-1).

11.1.3 Type tests

- a) Temperature-rise type test (11.5).
- b) Dielectric type tests (IEC 60076-3).
- c) Determination of sound level (11.6) for each method of cooling for which a guaranteed sound level is specified (IEC 60076-1).
- d) Measurement of the power taken by the fan and gas blower motors.
- e) Measurement of no-load loss and current at 90 % and 110 % of rated voltage (IEC 60076-1).

11.1.4 Special tests

- a) Dielectric special tests (IEC 60076-3).
- b) Determination of capacitances windings-to-earth, and between windings (IEC 60076-1).
- c) Measurement of dissipation factor ($\tan \delta$) of the insulation system capacitances (IEC 60076-1).
- d) Determination of transient voltage transfer characteristics (Annex B of IEC 60076-3:2013).
- e) Measurement of zero-sequence impedance(s) on three-phase transformers (IEC 60076-1).
- f) Short-circuit withstand test (IEC 60076-5).
- g) Measurement of d.c. insulation resistance each winding to earth and between windings (IEC 60076-1).
- h) Measurement of frequency response (Frequency Response Analysis or FRA). The test procedure shall be agreed between manufacturer and purchaser (IEC 60076-1).
- i) Check of external coating (ISO 2178 and ISO 2409 or as specified).
- j) Measurement of dissolved gasses in insulating gas from main-transformer compartment except diverter switch compartment, cable head compartment and gas-insulated switchgear (GIS) structure compartment.
- k) Mechanical test or assessment of tank for suitability for transport (to customer specification) (IEC 60076-1).
- l) Determination of weight with transformer arranged for transport. For transformers up to 1,6 MVA by measurement. For larger transformers by measurement or calculation as agreed between manufacturer and purchaser (IEC 60076-1).

Other tests for transformers may be defined in the specific documents for specialized transformers such as dry-type, self-protected and other groups.

NOTE Although "winding hot-spot temperature-rise measurements" is listed in 11.1.4 b) of IEC 60076-1:2011, in this standard, direct measurement (e.g. optical fibre sensors) is not recommended due to concerns about gas leakage. Winding hot-spot temperature-rise will be determined by calculation described in 7.10.2 of IEC 60076-2:2011.

If test methods are not prescribed in this standard, or if tests other than those listed above are specified in the contract, such test methods are subject to agreement.

11.2 Measurement of short-circuit impedance and load loss

The test described in IEC 60076-1 applies.

The reference temperature of the short-circuit impedance and load loss shall be

- 75 °C for an insulation system temperature of 105 °C;
- average winding temperature-rise limits K in Table 2 plus 20 °C for other insulation system temperatures.

NOTE Reference temperature with an insulation system of class 200 or above are subjected to agreement between the supplier and the purchaser.

When a transformer has windings of different insulation system temperatures, the reference temperature relating to the winding having the higher insulation system temperature shall be used.

11.3 Leak testing with pressure (tightness test)

IEC 62271-1 gives a general test method of the gas tightness of high-voltage switchgears.

This method can be applicable to the gas-filled power transformers.

The purpose of the tightness tests is to demonstrate that the absolute leakage rate F does not exceed the specified value of the permissible leakage rate F_p .

Where possible, the tests should be performed at normal ambient temperature on a complete system filled at rated gas pressure. If this is not practical, the tests may be performed on parts, components or sub-assemblies. In such cases, the leakage rate of the total system shall be determined by summation of the component leakage rates. The possible leakage between sub-assemblies of different pressures shall also be taken into account.

In general, only cumulative leakage measurements allow calculation of leakage rates. Due to comparatively small leakage rates of these systems, pressure drop measurements are not applicable. Other methods such as halogen detectors may be used to measure the leakage rate. If the test object is filled with a test gas different from the gas used in service and/or at a test pressure different from the normal operating pressure, corrective factors agreed between manufacturer and purchaser shall be used for calculations.

The test report should include such information as

- a description of the object under test, including its internal volume and the nature of the filling gas;
- the pressures and temperatures recorded at the beginning and end of the test;
- an indication of the calibration of the meters used to detect leakage rates;
- the results of the measurements;
- if applicable, the test gas and the corrective factor to assess the results.

11.4 Pressure tests for tanks

Pressure test shall be made on all tanks. The standard test pressure shall be k times the tank design pressure, where the k factor is

- 1,3 for welded steel and aluminum tanks;
- 2,0 for cast steel and aluminum tanks.

NOTE 1 See IEC 62271-203.

NOTE 2 The k factor is applicable to tanks with both bolted and welded cover.

The test pressure measured by the pressure gauge shall be maintained for at least 1,0 min. No rupture or permanent deformation should occur during the test.

Attention is drawn to the safety issue during the test and water is recommended to be used for the test on the tank with cover.

NOTE 3 If there is local regulation relevant to the pressure vessel, it is to be applied to k factor.

11.5 Temperature-rise test

11.5.1 General

The test described in IEC 60076-2 applies with replacing liquid with gas.

11.5.2 Corrections

The gas temperature rises over the external cooling medium temperature at the shutdown (of the test power) shall be multiplied by:

$$\left(\frac{\text{total losses}}{\text{test losses}} \right)^x$$

The average winding temperature rise over average gas temperature at the shutdown (of the test power) shall be multiplied by:

$$\left(\frac{\text{rated current}}{\text{test current}} \right)^y$$

The exponents to be applied are given in Table 3 in accordance with the transformer type and cooling system.

The corrections made using the exponent of the mentioned table are conservative and intended only for reporting the temperature rise during a test in steady state conditions performed within the limits indicated above.

Table 3 – Exponents for the corrections of temperature rise test results

Type of transformer Type of exponent	Distribution Transformers	Medium and large power transformers		
	GNAN	GN...	GF...	GD...
Top-gas exponent x	0,8	0,9	1,0	1,0
Average winding exponent y	1,6	1,6	1,6	2,0
NOTE For the purposes of this table, distribution transformers are transformers with a rated power up to and equal to 2 500 kVA.				

11.6 Measurement of sound level

11.6.1 General

Measurement of sound level except for prescribed contour in IEC 60076-10 is applied.

11.6.2 Prescribed contour

For measurement made with forced air cooling and forced gas cooling auxiliaries (if any, e.g., fan, gas blower) out of service, the prescribed contour shall be spaced 0,3 m away from the principal radiating surface.

For measurement made with forced air cooling or forced gas cooling auxiliaries in service, the prescribed contour shall be spaced 2 m away from the principal radiating surface.

12 Electromagnetic compatibility (EMC)

Electromagnetic compatibility (EMC) described in IEC 60076-1 apply.

13 High frequency switching transients

High frequency switching transients described in IEC 60076-1 apply.

14 Earthing terminal

Transformers shall be fitted with an earthing terminal.

15 Information required with enquiry and order

The requirements in Annex A apply.

Annex A (informative)

Check list of information to be provided with enquiry and order

A.1 Rating and general data

A.1.1 Normal information

The following information shall be given in all cases:

- a) Particulars of the specifications to which the transformer shall comply.
- b) Kind of transformer, for example, separate winding transformer, auto-transformer or series transformer.
- c) Single or three-phase unit.
- d) Number of phases in system.
- e) Frequency.
- f) Gas-filled, type of gas, whether SF₆ or others.
- g) Indoor or outdoor type.
- h) Type of cooling.
- i) Rated power for each winding and, for tapping range exceeding $\pm 5\%$, the specified maximum current tapping, if applicable. If the transformer is specified with alternative methods of cooling, the respective lower power values are to be stated together with the rated power (which refers to the most efficient cooling).
- j) Rated voltage for each winding.
- k) For a transformer with tapplings (see 6.4 of IEC 60076-1:2011):
 - whether 'de-energized' or 'on-load' tap-changing is required;
 - any requirements for fixing the ratio of turns between two particular windings on a more than two winding transformer;
 - whether any tapping or range of tapplings can be reduced power tapplings;
 - the number of tapping steps and the size of the tapping step or the tapping range;
 and either:
 - which winding is tapped;
 - if the tapping range is more than $\pm 5\%$, the type of voltage variation, and the location of the maximum current tapping, if applicable;
 or:
 - direction of power flow (can be both directions);
 - which voltage shall vary for the purpose of defining rated tapping voltage;
 - minimum full load power factor.
- l) Highest voltage for equipment (U_m) for each winding line and neutral terminals (with respect to insulation, see IEC 60076-3).
- m) Method of system earthing (for each winding).
- n) Insulation level and dielectric test levels (see IEC 60076-3), for each winding line and neutral terminals.
- o) Connection symbol and neutral terminal requirements for each winding.
- p) Any peculiarities of installation, assembly, transport and handling. Restrictions on dimensions and mass.
- q) Details of auxiliary supply voltage (for fans and gas blowers, tap-changer, alarms, etc.).

- r) Fittings required and an indication of the side from which meters, rating plates, etc., shall be legible.
- s) For multi-winding transformers, required power-loading combinations, stating, when necessary, the active and reactive outputs separately, especially in the case of multi winding auto-transformers.
- t) Guaranteed maximum temperature rise information.
- u) Unusual service conditions (see Clause 4 and 5.5 of IEC 60076-1:2011).
- v) Details of type and arrangement of terminals, for example air bushings or cable box or gas insulated bus bar.
- w) Whether the core and frame connections should be brought out for external earthing.
- x) Vacuum withstand of the transformer tank.
- y) Local regulation relevant to pressure vessel.

A.1.2 Special information

The following additional information shall be given if the particular item is required by the purchaser:

- a) If a lightning impulse voltage test is required, and whether or not the test is to include chopped waves (see IEC 60076-3).
- b) Whether a stabilizing winding is required and, if so, the method of earthing.
- c) Short-circuit impedance, or impedance range (see Annex C of IEC 60076-1:2011). For multi-winding transformers, any impedances that are specified for particular pairs of windings (together with relevant reference ratings if percentage values are given).
- d) Tolerances on voltage ratios and short-circuit impedances as left to agreement in Table 1 of IEC 60076-1:2011, or deviating from values given in the table.
- e) If a transformer has alternative winding connections, how they should be changed, and which connection is required ex works.
- f) Short-circuit characteristics of the connected systems (expressed as short-circuit power or current, or system impedance data) and possible limitations affecting the transformer design (see IEC 60076-5).
- g) Details of sound-level requirements, guarantees, and special measurements (see IEC 60076-10).
- h) Any special tests not referred to above which are required by the purchaser.
- i) Loss evaluation information or maximum losses.
- j) Any physical size limitations, for example for installation on an existing foundation or in a building. Special installation space restrictions which may influence the insulation clearances and terminal locations on the transformer.
- k) Shipping size and weight limitations. Minimum acceleration withstand values if higher than specified in 5.7.4.2 of IEC 60076-1:2011.
- l) Transport and storage conditions not covered by normal conditions described in 5.7.4 and 4.2 of IEC 60076-1:2011.
- m) Any particular maintenance requirements or limitations.
- n) Whether a disconnection chamber is required for direct cable connections.
- o) Whether facilities for condition monitoring are required (see Annex C).
- p) Any particular environmental considerations regarding the impact of the transformer on the environment that shall be taken into account in the transformer design, see Annex G of IEC 60076-1:2011. Especially, SF₆ should be handled in a closed cycle, to avoid any deliberate release to the environment. Among all the voluntary initiatives, gas recovery and reuse have the highest priority, see 9.3.

- q) Any particular health and safety considerations that shall be taken into account in the transformer design regarding manufacture, installation, operation, maintenance and disposal, see Annex G of IEC 60076-1:2011.
- r) Unusual electrical operating conditions as follows:
 - 1) whether a transformer is to be connected to a generator directly or through switchgear, and whether it will be subjected to load rejection conditions and any special load rejection conditions.
 - 2) whether load current wave shape will be heavily distorted. Whether unbalanced three-phase loading is anticipated. In both cases, details to be given.
 - 3) whether a transformer is to be connected directly or by a short length of overhead line to gas-insulated switchgear (GIS).
 - 4) whether transformers will be subjected to frequent overcurrents, for example, furnace transformers and traction feeding transformers.
 - 5) details of intended regular cyclic overloading other than covered by 5.1.4 of IEC 60076-1:2011 (to enable the rating of the transformer auxiliary equipment to be established).
 - 6) unbalanced a.c. voltages, or departure of a.c. system voltages from a substantially sinusoidal wave form.
 - 7) loads involving abnormal harmonic currents such as those that may result where appreciable load currents are controlled by solid-state or similar devices. Such harmonic currents can cause excessive losses and abnormal heating.
 - 8) specified loading conditions (kVA outputs, winding load power factors, and winding voltages) associated with multi-winding transformers and autotransformers.
 - 9) excitation exceeding either 110 % rated voltage or 110 % rated V/Hz.
 - 10) planned short circuits as a part of regular operating or relaying practice.
 - 11) unusual short-circuit application conditions differing from those in IEC 60076-5.
 - 12) unusual voltage conditions including transient overvoltages, resonance, switching surges, etc. which may require special consideration in insulation design.
 - 13) unusually strong magnetic fields. It should be noted that solar-magnetic disturbances can result in telluric currents in transformer neutrals.
 - 14) large transformers with high-current bus bar arrangements. It should be noted that high-current isolated phase bus ducts with accompanying strong magnetic fields may cause unanticipated circulating currents in transformer tanks, covers, and in the bus ducts. The losses resulting from these unanticipated currents may result in excessive temperatures when corrective measures are not included in the design.
 - 15) parallel operation. It should be noted that while parallel operation is not unusual, it is advisable that users advise the manufacturer when paralleling with other transformers is planned and identify the transformers involved.
 - 16) regular frequent energisation in excess of 24 times per year.
 - 17) frequent short circuits.
- s) Unusual physical environmental conditions
 - 1) altitude above sea-level, if in excess of 1 000 m (3 300 ft).
 - 2) special external cooling medium temperature conditions, outside the normal range (see 4.2 b) of IEC 60076-1:2011), or restrictions to circulation of cooling air.
 - 3) expected seismic activity at the installation site which requires special consideration.
 - 4) damaging fumes of vapours, excessive or abrasive dust, explosive mixtures of dust or gasses, steam, salt spray, excessive moisture, or dripping water, etc.
 - 5) abnormal vibration, tilting, or shock.

A.2 Parallel operation

If parallel operation with existing transformers is required, this shall be stated and the following information on the existing transformers given:

- a) Rated power.
- b) Rated voltage ratio.
- c) Voltage ratios corresponding to tapplings other than the principal tapping.
- d) Load loss at rated current on the principal tapping, corrected to the appropriate reference temperature, see 11.1 of IEC 60076-1:2011.
- e) Short-circuit impedance on the principal tapping and on the extreme tapplings, if the voltage on the extreme tapplings is more than 5 % different to the principal tapping. Impedance on other tapplings if available.
- f) Diagram of connections, or connection symbol, or both.

On multi-winding transformers, supplementary information will generally be required.

Annex B (informative)

Transient loading – Mathematical model

B.1 General

The result from a temperature-rise test to steady state, according to 11.5, may be used for an estimate of steady-state temperature-rise at a different loading, and also for an estimate of transient temperature-rise (if the thermal time-constants of the transformer are known).

For small and medium-size transformers such estimates are performed according to a conventional mathematical model which is described in Clause B.2 below.

The validity of this model for any particular large transformer is, however, not so certain as for transformers of lower rated power. When load ability analysis is to be performed, for example, concerning emergency loading above rated power, it is advisable to obtain relevant data for the actual transformer. One way is to conduct special testing with transient load in excess of rated power. Recommendations for a suitable test procedure and for the associated measurements and observations are presented in IEC 60076-2.

B.2 Mathematical model for temperature distribution in a winding of a gas-filled power transformer – The hot-spot concept

Cooling gas enters the bottom of the winding and is at 'bottom gas temperature'. It passes upwards through the winding and its temperature is assumed to rise linearly with the height. The winding losses are transferred from the winding to the gas all along the winding. This heat transfer requires a temperature drop between winding and surrounding gas which is assumed to be the same at all levels of height. In the graphic presentation, Figure B.1, the winding temperature and the gas temperature will therefore appear as two parallel lines.

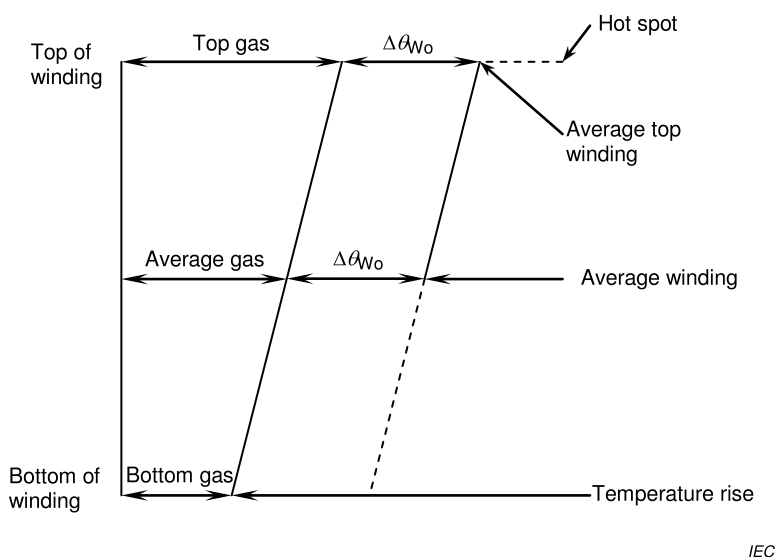


Figure B.1 – Temperature distribution model

The maximum temperature occurring in any part of the winding insulation system is called the 'hot-spot temperature'. This parameter is assumed to represent the thermal limitation of loading of the transformer. As a general rule other parts of the transformer, for example, bushings,

current transformers or tap changers, should be selected so as not to represent any narrower restriction of the load ability of the transformer, see 5.1.4 of IEC 60076-1:2011.

Towards the upper end of the winding there is usually a concentration of eddy current losses and the winding may be provided with extra electrical insulation which increases the thermal insulation. The actual local temperature difference between conductor and gas is therefore assumed to be higher by the 'hot-spot factor'. This factor is assumed to be from 1,1 in distribution transformers to 1,3 in medium size power transformers. In large transformers there is considerable variation depending on design, and the manufacturer should be consulted for information, unless actual measurements are carried out.

The steady-state temperature difference between winding and gas, average along the winding, is taken as the difference between [resistance-measured winding average temperature] and [average gas temperature], see 7.4 and 7.6 in IEC 60076-2:2011 respectively with the translation of liquid to gas.

The steady-state hot-spot temperature-rise above external cooling medium temperature (air or water) is the sum of [top gas temperature-rise above cooling medium temperature] and [hot-spot factor] $\times$ [average temperature difference winding-to-gas].

Annex C (informative)

Gauges, indicators and relays for gas-filled power transformers

This annex compares gauges, indicators and relays as shown Table C.1 for gas-filled power transformers to oil-immersed power transformers. The actual gauges, indicators and relays provided shall be agreed between manufacturer and purchaser and will depend on the size and criticality of the gas-filled power transformer.

Further guidance is contained in CIGRE brochure 445 Appendix 2: February 2011.

Table C.1 – Comparison of gauges, indicators and relays between
gas-filled power transformers and oil-immersed power transformers

	Gas-filled power transformer	Oil-immersed power transformer
Recommended components for gas-filled power transformer	Gas temperature indicator	Oil temperature indicator
	Compound gauge	Oil level indicator
	Gas density relay	
	Sudden gas pressure relay for OLTC	Rapid pressure rise relay (Fault gas relay, fault pressure relay, and sudden pressure relay)
Optional components for gas-filled power transformer	Sudden gas pressure relay for main tank	
	Winding temperature indicator	Winding temperature indicator
	Pressure relief device (See NOTE 1)	Pressure relief device
	Gas flow indicators	Oil flow indicators
NOTE 1 Pressure relief devices are not recommended to apply on gas-filled transformer tanks because pressure increase in gas-filled power transformer is very small when internal fault occurs. NOTE 2 Although buchholz relays are applied on oil-immersed power transformers, there are no relays which has similar functions for gas-filled power transformers.		

Bibliography

IEC 60044 (all parts), *Instrument transformers*

IEC 60050, *International Electrotechnical Vocabulary* (available at www.electropedia.org)

IEC 60071 (all parts) , *Insulation co-ordination*

IEC 60076-6, *Power transformers – Part 6: Reactors*

IEC 60076-7, *Power transformers – Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers*

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

IEC 60076-13, *Power transformers – Part 13: Self-protected liquid-filled transformers*

IEC 60076-14:2013, *Power transformers – Part 14: Liquid-immersed power transformers using high-temperature insulation materials*

IEC 60076-16, *Power transformers – Part 16: Transformers for wind turbine applications*

IEC 60085, *Electrical insulation – Thermal evaluation and designation*

IEC 60214-1, *Tap-changers – Part 1: Performance requirements and test methods*

IEC 60310, *Railway applications – Traction transformers and inductors on board rolling stock*

IEC 60721-3-4, *Classification of environmental conditions – Part 3: Classification of groups of environmental parameters and their severities – Section 4: Stationary use at non-weatherprotected locations*

IEC/TR 60943, *Guidance concerning the permissible temperature rise for parts of electrical equipment, in particular for terminals*

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

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

IEC 62271-203, *High-voltage switchgear and controlgear – Part 203: Gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltages above 52 kV*

ISO 2178, *Non-magnetic coatings on magnetic substrates – Measurement of coating thickness – Magnetic method*

ISO 2409, *Paints and varnishes – Cross-cut test*

ISO 14122 (all parts), *Safety of machinery – Permanent means of access to machinery*

CIGRE brochure 445: February 2011

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	33
1 Domaine d'application.....	35
2 Références normatives	35
3 Termes et définitions	36
3.5 Termes, définitions, symboles et unités relatifs à l'étanchéité au gaz et au vide	37
4 Conditions de service	37
5 Caractéristiques assignées et exigences générales	37
5.1 Puissance assignée	37
5.1.1 Généralités	37
5.1.2 Valeurs préférentielles de la puissance assignée	38
5.1.3 Puissance minimale dans les modes de refroidissement alternatifs	38
5.1.4 Charge au-delà de la puissance assignée.....	38
5.2 Mode de refroidissement	39
5.2.1 Généralités	39
5.2.2 Symboles d'identification.....	39
5.2.3 Transformateurs avec autres méthodes de refroidissement.....	39
5.3 Limites d'échauffement.....	40
5.3.1 Classification et température du système d'isolation	40
5.3.2 Limites normales d'échauffement.....	40
5.3.3 Réduction des échauffements dans le cas de transformateurs prévus pour une température élevée de l'air de refroidissement ou pour des conditions spéciales de refroidissement par air	41
5.3.4 Correction d'échauffement prévue pour des altitudes élevées	41
5.3.5 Réduction des échauffements dans le cas de transformateurs prévus pour une température élevée de l'eau de refroidissement.....	41
5.3.6 Échauffement au cours d'un cycle de charge spécifié.....	41
5.4 Niveau d'isolement.....	41
5.5 Perte de charge sur les transformateurs directement connectés à un générateur	42
5.6 Tension assignée et fréquence assignée	42
5.7 Dispositions pour les conditions de service inhabituelles.....	42
5.8 Tension la plus élevée pour le matériel U_m et niveaux d'essais diélectriques.....	42
5.9 Informations supplémentaires exigées pour l'appel d'offres	42
5.10 Composants et matériaux.....	42
5.11 Exigences relatives aux gaz et à l'étanchéité aux gaz	42
5.11.1 Exigences relatives aux gaz	42
5.11.2 Étanchéité	42
6 Exigences relatives aux transformateurs dotés d'un enroulement à prises.....	43
7 Symboles des couplages et des déphasages.....	43
8 Plaques signalétiques.....	43
8.1 Généralités	43
8.2 Informations devant être fournies dans tous les cas	43
8.3 Informations supplémentaires devant être données le cas échéant.....	44
9 Exigences de sécurité, exigences environnementales et autres exigences	45
9.1 Exigences de sécurité et exigences environnementales	45
9.1.1 Fuites de gaz	45

9.1.2	Considérations relatives à la sécurité	45
9.2	Dimensionnement de la connexion de neutre	46
9.3	Procédure de manipulation du SF ₆	46
9.4	Courants continus dans les circuits de neutre	46
9.5	Marquage du centre de gravité	46
10	Tolérances	46
11	Essais	46
11.1	Exigences générales relatives aux essais individuels de série, aux essais de type et aux essais spéciaux	46
11.1.1	Généralités	46
11.1.2	Essais individuels de série	47
11.1.3	Essais de type	48
11.1.4	Essais spéciaux	48
11.2	Mesure de l'impédance de court-circuit et des pertes dues à la charge	49
11.3	Essai de fuite avec pression (essai d'étanchéité)	49
11.4	Essais de pression pour les cuves	50
11.5	Essai d'échauffement	50
11.5.1	Généralités	50
11.5.2	Corrections	50
11.6	Mesure du niveau de bruit	51
11.6.1	Généralités	51
11.6.2	Contour prescrit	51
12	Compatibilité électromagnétique (CEM)	51
13	Transitoires de commutation à haute fréquence	51
14	Borne de terre	51
15	Informations exigées à l'appel d'offres et à la commande	51
Annexe A (informative)	Liste de contrôle des informations devant être fournies avec l'appel d'offres et la commande	52
A.1	Caractéristiques assignées et données générales	52
A.1.1	Informations normales	52
A.1.2	Informations spéciales	53
A.2	Fonctionnement en parallèle	55
Annexe B (informative)	Charge transitoire – Modèle mathématique	56
B.1	Généralités	56
B.2	Modèle mathématique de distribution de température dans un enroulement de transformateur de puissance à isolation gazeuse – Concept de point chaud	56
Annexe C (informative)	Jauges, indicateurs et relais des transformateurs de puissance à isolation gazeuse	59
Bibliographie		60
Figure B.1	– Modèle de distribution de température	57
Tableau 1	– Classification et température du système d'isolation	40
Tableau 2	– Limites d'échauffement des enroulements	41
Tableau 3	– Exposants pour les corrections des résultats d'essai d'échauffement	51

Tableau C.1– Comparaison des jauges, indicateurs et relais des transformateurs de puissance à isolation gazeuse et des transformateurs de puissance immergés dans l'huile	59
---	----

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE –

Partie 15: Transformateurs de puissance à isolation gazeuse

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de l'IEC). L'IEC 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, l'IEC – 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 l'IEC"). 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 l'IEC, participent également aux travaux. L'IEC 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 l'IEC concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de l'IEC intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de l'IEC se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de l'IEC. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que l'IEC s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; l'IEC 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 l'IEC s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de l'IEC dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de l'IEC et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) L'IEC elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de l'IEC. L'IEC n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 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 l'IEC, 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 l'IEC, 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 l'IEC ou de toute autre Publication de l'IEC, 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 l'IEC peuvent faire l'objet de droits de brevet. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale IEC 60076-15 a été établie par le comité d'études 14 de l'IEC: Transformateurs de puissance

Cette seconde édition de l'IEC 60076-15 annule et remplace la première édition, parue en 2008, dont elle constitue une révision technique.

Les principales modifications techniques suivantes ont été apportées depuis la première édition:

- Modification conforme aux normes révisées apparentées IEC 60076-1, IEC 60076-2, IEC 60076-3 et éléments apparentés du gaz SF₆ dans la norme révisée "Appareillage à haute tension"
- Ajout du paragraphe "Puissance minimale dans les modes de refroidissement alternatifs"

- Ajout de l'Article " Exigences de sécurité, exigences environnementales et autres exigences"
- Ajout du paragraphe "Courants continus dans les circuits de neutre"
- Ajout de l'Article "Compatibilité électromagnétique (CEM)"
- Ajout de l'Article "Transitoires de commutation à haute fréquence"

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

FDIS	Rapport de vote
14/811/FDIS	14/818/RVD

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

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

Une liste de toutes les parties de la série IEC 60076, publiées sous le titre général *Transformateurs de puissance*, peut être consultée sur le site web de l'IEC.

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

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

TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE –

Partie 15: Transformateurs de puissance à isolation gazeuse

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 60076 s'applique aux transformateurs de puissance à isolation gazeuse triphasés et monophasés (y compris les autotransformateurs) à l'exception de certaines catégories de petits transformateurs et de transformateurs spéciaux, tels que:

- les transformateurs monophasés de puissance assignée inférieure à 1 kVA et aux transformateurs triphasés de puissance assignée inférieure à 5 kVA;
- les transformateurs dépourvus d'enroulements présentant une tension assignée supérieure à 1 000 V;
- les transformateurs de mesure;
- les transformateurs de traction montés sur équipement roulant;
- les transformateurs de démarrage;
- les transformateurs d'essai;
- les transformateurs de soudage.

S'il n'existe pas de normes IEC pour ces catégories de transformateurs (en particulier les transformateurs dépourvus d'enroulement de plus de 1 000 V destinés aux applications industrielles), la présente partie de l'IEC 60076 peut toujours être appliquée en totalité ou en partie. La présente norme ne précise pas les exigences susceptibles de rendre un transformateur adapté au montage dans une position accessible au public. Pour ces catégories de transformateurs de puissance et de bobine d'inductance qui font l'objet de normes IEC particulières, la présente partie s'applique uniquement dans la mesure où elle est spécifiquement mentionnée par la référence croisée d'une autre norme. Ces normes concernent:

- les bobines d'inductance en général (IEC 60076-6);
- les transformateurs autoprotégés (IEC 60076-13);
- les transformateurs pour applications éoliennes (IEC 60076-16);
- les transformateurs de traction et bobines d'inductance de traction (IEC 60310);
- les transformateurs de conversion pour applications industrielles (IEC 61378-1);
- les transformateurs de conversion pour applications à courant continu haute tension (HVDC High Voltage Direct Current en anglais) (IEC 61378-2).

Il est spécifié ou recommandé en plusieurs points de la présente norme, de trouver un "accord" concernant les solutions techniques ou procédures alternatives ou complémentaires. Ce type d'accord est conclu entre le constructeur et l'acheteur. Il conviendrait de préférence de soulever la question dès le début du projet et d'inclure les accords dans la spécification contractuelle.

NOTE La présente norme peut être appliquée aux parties contenant du gaz d'un transformateur dans lequel un isolant gazeux est utilisé avec un liquide isolant.

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités en référence de manière normative, en intégralité ou en partie, dans le présent document et sont indispensables pour son application. 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).

IEC 60076-1:2011, *Transformateurs de puissance – Partie 1: Généralités*

IEC 60076-2:2011, *Transformateurs de puissance – Partie 2: Echauffement des transformateurs immergés dans le liquide*

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

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

IEC 60076-10, *Transformateurs de puissance – Partie 10: Détermination des niveaux de bruit*

IEC 60137, *Traversées isolées pour tensions alternatives supérieures à 1 000 V*

IEC 60376, *Spécifications de la qualité technique de l'hexafluorure de soufre (SF₆) pour utilisation dans les appareils électriques*

IEC 60480, *Lignes directrices relatives au contrôle et au traitement de l'hexafluorure de soufre (SF₆) prélevé sur le matériel électrique et spécification en vue de sa réutilisation*

IEC 62271-1, *Appareillage à haute tension – Partie 1: Spécifications communes*

IEC 62271-4:2002, *Appareillage à haute tension – Partie 4: Utilisation et manipulation de l'hexafluorure de soufre (SF₆) et des mélanges contenant du SF₆*

3 Termes et définitions

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

NOTE Les autres termes utilisent les significations de l'IEC 60076-1, 2, 3, 5 et 10, ou de la série IEC 60050.

3.1

transformateurs de puissance à isolation gazeuse

transformateur dont le circuit magnétique et les enroulements sont placés dans une enveloppe remplie d'un isolant gazeux.

(Note cancelled in French)

3.2

pression assignée de gaz

pression de gaz (pression manométrique) à 20 °C, destinée à être utilisée dans un transformateur de puissance à isolation gazeuse

3.3

pression de gaz minimale garantie

pression de gaz minimale (pression manométrique) à 20 °C, qui peut garantir l'isolation d'un transformateur de puissance à isolation gazeuse

Note 1 à l'article: Il convient qu'un transformateur dont le circuit magnétique et les enroulements sont placés dans une enveloppe ou une cuve rempli(e) d'un liquide isolant tel qu'un perfluorocarbène, un ester naturel, un ester synthétique, une huile silicone ou une huile végétale soit considéré comme un transformateur immergé dans un liquide.

3.4

pression de calcul des cuves

pression relative utilisée pour déterminer la conception des cuves

Note 1 à l'article: Elle est au moins égale à la pression maximale de la cuve à la température la plus élevée que le gaz peut atteindre dans les conditions de service maximales spécifiées.

3.5 Termes, définitions, symboles et unités relatifs à l'étanchéité au gaz et au vide

3.5.1

taux de fuite absolu

F

quantité de gaz perdu par unité de temps, à pression (ou densité) de remplissage assignée exprimée en Pa m³/s

3.5.2

taux de fuite admissible

F_p

taux de fuite absolu admissible maximal de gaz, à pression (ou densité) de remplissage assignée spécifié par le constructeur et exprimé en Pa m³/s

3.5.3

taux de fuite relatif

F_{rel}

taux de fuite absolu rapporté à la quantité totale de gaz du transformateur à la pression (ou densité) assignée de remplissage

Note 1 à l'article: Il s'exprime en pourcentage par an ou par jour.

4 Conditions de service

Les exigences de l'IEC 60076-1 s'appliquent. Pour ce qui concerne les conditions de refroidissement, voir l'IEC 60076-2.

5 Caractéristiques assignées et exigences générales

5.1 Puissance assignée

5.1.1 Généralités

La puissance assignée de chaque enroulement doit être spécifiée par l'acheteur ou ce dernier doit donner des informations suffisantes au constructeur pour déterminer la puissance assignée au stade de l'appel d'offres.

Le transformateur doit avoir une puissance assignée pour chaque enroulement, qui doit être marquée sur la plaque signalétique. La puissance assignée correspond à une charge continue. Il s'agit d'une valeur de référence pour les garanties et les essais des pertes dues à la charge et les échauffements.

Si des valeurs différentes de puissance apparente sont assignées dans certaines circonstances, par exemple avec différents modes de refroidissement, la plus haute de ces valeurs sera la valeur de la puissance assignée.

Un transformateur à deux enroulements n'a qu'une seule valeur de puissance assignée, identique pour les deux enroulements.

Pour les transformateurs à plus de deux enroulements, l'acheteur doit spécifier les combinaisons des charges exigées en indiquant séparément, s'il y a lieu, leurs composantes actives et réactives.

Quand la tension assignée est appliquée à un enroulement primaire du transformateur et que le courant assigné traverse les bornes d'un enroulement secondaire, le transformateur reçoit la puissance assignée correspondant à cette paire d'enroulements.

Le transformateur doit être en mesure de transmettre, en service continu, la puissance assignée (pour un transformateur à plus de deux enroulements: la (les) combinaison(s) particulière(s) de puissance assignée d'enroulement) dans les conditions énumérées à l'Article 4 de l'IEC 60076-1:2011 et sans dépasser les limites d'échauffement spécifiées en 5.3.

NOTE 1 L'interprétation de la puissance assignée selon le présent paragraphe implique qu'il s'agit d'une valeur de puissance apparente au primaire du transformateur, y compris sa propre absorption de la puissance active et réactive. La puissance apparente que le transformateur délivre au circuit connecté aux bornes de l'enroulement secondaire en charge assignée diffère de la puissance assignée. La tension aux bornes secondaires diffère de la tension assignée par la chute (ou l'élévation) de tension dans le transformateur. La chute de tension, concernant le facteur de puissance de la charge, est prise en compte dans la spécification de la tension assignée et de l'étendue de prises (voir Article 7 de l'IEC 60076-8:1997).

Les pratiques nationales peuvent être différentes.

NOTE 2 Pour un transformateur à plus de deux enroulements, la moitié de la somme arithmétique des valeurs de puissance assignée de tous les enroulements (enroulements séparés non autoconnectés) donne une estimation approximative de sa taille physique comparée à un transformateur à deux enroulements.

5.1.2 Valeurs préférentielles de la puissance assignée

Les valeurs préférentielles de la puissance assignée de l'IEC 60076-1 s'appliquent.

5.1.3 Puissance minimale dans les modes de refroidissement alternatifs

Si l'utilisateur a une exigence particulière quant à la puissance minimale dans un mode de refroidissement particulier de puissance assignée, cela doit être énoncé et faire l'objet d'un accord entre le fournisseur et l'acheteur à l'établissement de l'offre.

Le transformateur doit être en mesure de transmettre, en service continu, la puissance minimale spécifiée (pour un transformateur à plus de deux enroulements: la/les combinaison(s) particulière(s) de puissance assignée d'enroulement) dans les conditions énumérées à l'Article 4 de l'IEC 60076-1:2011 et dans le mode de refroidissement spécifié sans dépasser les limites d'échauffement spécifiées en 5.3.

NOTE Par exemple, lorsque le transformateur doit fonctionner à un pourcentage minimal donné de la puissance assignée avec le refroidissement forcé hors service (GNAN (Gas Natural Air Natural)) pour permettre la perte de l'alimentation des auxiliaires et une caractéristique assignée GNAN importante va dépasser le coût du transformateur. Un pourcentage minimal de puissance assignée est déterminé en tenant compte des impacts économiques.

5.1.4 Charge au-delà de la puissance assignée

La charge temporaire au-delà de la capacité assignée de la plaque signalétique fait l'objet d'un accord entre le fournisseur et l'acheteur à l'établissement de l'offre.

NOTE 1 Le concept de l'IEC 60076-7 peut être applicable à la prise en compte de la charge au-delà de la puissance assignée des transformateurs de puissance à isolation gazeuse, mais des constantes et/ou des facteurs peuvent ne pas s'appliquer.

Toutes les exigences spécifiques pour la charge au-delà de la puissance assignée, le fonctionnement à des températures de milieu de refroidissement externe plus élevées ou des limites d'échauffement réduites doivent être spécifiées par l'acheteur dans le cadre de l'appel d'offres et dans le contrat. Tous les essais ou calculs supplémentaires exigés pour vérifier que ces exigences particulières sont satisfaites doivent également être spécifiés.

NOTE 2 Cette option est destinée à être utilisée en particulier pour donner des critères de conception et des garanties concernant la charge de secours temporaire des transformateurs de puissance.

Les traversées, changeurs de prises, transformateurs de courant et autres équipements auxiliaires doivent être choisis de façon à ne pas restreindre la capacité de charge du transformateur.

NOTE 3 Les normes de composants correspondantes IEC 60137 pour les traversées et l'IEC 60214-1 pour les changeurs de prises sont consultées pour connaître la capacité de charge de ces composants.

NOTE 4 Ces exigences ne s'appliquent pas aux transformateurs pour applications particulières, qui n'ont pas besoin d'une capacité de charge au-delà de la puissance assignée. Si une telle capacité est exigée pour ces transformateurs, elle est spécifiée.

5.2 Mode de refroidissement

5.2.1 Généralités

L'utilisateur doit spécifier le milieu de refroidissement (air ou eau). Si l'utilisateur a des exigences particulières quant à la/aux méthode(s) de refroidissement ou au système de refroidissement, cela doit être énoncé dans l'appel d'offres et le contrat.

5.2.2 Symboles d'identification

Les transformateurs doivent être désignés selon le mode de refroidissement utilisé. Pour les transformateurs de puissance à isolation gazeuse, cette désignation est réalisée par un code à quatre lettres défini ci-dessous.

Première lettre: milieu de refroidissement interne:

- G: gaz isolant;

Deuxième lettre: mode de circulation du milieu de refroidissement interne:

- N: circulation naturelle/par thermosiphon à travers le système de refroidissement et les enroulements;
- F: circulation forcée à travers le système de refroidissement (pompes à gaz, par exemple), circulation par thermosiphon dans les enroulements;
- D: circulation forcée à travers le système de refroidissement, et dirigée du système de refroidissement jusqu'aux enroulements principaux au moins.

Troisième lettre: milieu de refroidissement externe:

- A: air;
- W: (Water en anglais) eau.

Quatrième lettre: mode de circulation du milieu de refroidissement externe:

- N: convection naturelle;
- F: circulation forcée (ventilateurs, souffleries d'air, pompes à eau).

5.2.3 Transformateurs avec autres méthodes de refroidissement

Un transformateur peut être spécifié avec des variantes de modes de refroidissement. Dans ce cas, la spécification et la plaque signalétique doivent contenir les informations relatives aux valeurs de puissance auxquelles le transformateur satisfait aux limites d'échauffement lorsque ces alternatives s'appliquent.

La puissance assignée du transformateur pour toutes les configurations de refroidissement est celle qui correspond à la capacité de refroidissement la plus élevée (ou d'un enroulement individuel d'un transformateur à plus de deux enroulements). Les variantes sont, par convention, énumérées par ordre croissant de capacité de refroidissement.

EXEMPLE

GNAN/GDAF). Le transformateur a un système de refroidissement avec des pompes dans le gaz et des ventilateurs dans l'air, mais est également spécifié avec une capacité de puissance réduite en refroidissement naturel.

NOTE Le pourcentage de capacité de refroidissement naturel par rapport au pourcentage de capacité de refroidissement forcé des transformateurs à isolation gazeuse est inférieur à celui des transformateurs immergés dans l'huile. Il n'est en général pas difficile, dans les transformateurs immergés dans l'huile, d'atteindre une capacité ONAN) représentant 50 % de la capacité OFAF ou de la capacité ODAF (. Cependant, dans les transformateurs à isolation gazeuse, il est parfois difficile et non économique d'atteindre une capacité GNAN représentant 50 % de la capacité GDAF. L'acheteur doit se renseigner auprès du constructeur au sujet du rapport entre la capacité de refroidissement naturel et la capacité de refroidissement forcé.

5.3 Limites d'échauffement

5.3.1 Classification et température du système d'isolation

Les transformateurs sont classés en fonction des systèmes d'isolation présentés dans le Tableau 1.

Pour des raisons pratiques, une valeur approximative de la température de point chaud peut être calculée en utilisant le concept de l'Annexe B.

L'application de matériaux isolants avec différentes classes thermiques conduit à des systèmes d'isolation non conventionnels (voir les exemples de systèmes d'isolation non conventionnels décrits à l'Article 5 de l'IEC 60076-14:2013).

Tableau 1 – Classification et température du système d'isolation

Lettre d'identification ^a	Classe thermique (température du système d'isolation °C)
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180
N	200
R	220
^a Les classifications de températures sont données dans l'IEC 60085.	

5.3.2 Limites normales d'échauffement

L'échauffement de chaque enroulement du transformateur destiné à fonctionner dans des conditions normales ne doit pas dépasser la limite correspondante spécifiée dans le Tableau 2 lorsque les essais sont menés conformément au 11.5.

La température du circuit magnétique, des parties métalliques et des matériaux adjacents ne doit pas atteindre une valeur susceptible d'endommager une partie quelconque du transformateur.

Dans la plupart des gaz, la limite d'échauffement du gaz est supérieure à la limite d'échauffement de l'enroulement, de sorte que la limite d'échauffement du gaz ne doit pas nécessairement être spécifiée. Si nécessaire, celle-ci est soumise à un accord entre l'acheteur et le fournisseur.

Tableau 2 – Limites d'échauffement des enroulements

Classe thermique (température du système d'isolation °C)	Limites d'échauffement moyen des enroulements K (voir la NOTE)
105	60
120	75
130	80
155	100
180	125
200	135
220	150
NOTE Échauffement mesuré conformément à 11.5.	

5.3.3 Réduction des échauffements dans le cas de transformateurs prévus pour une température élevée de l'air de refroidissement ou pour des conditions spéciales de refroidissement par air

La réduction des échauffements dans le cas de transformateurs prévus pour une température élevée de l'air de refroidissement ou pour des conditions spéciales de refroidissement par air de l'IEC 60076-2 s'applique.

5.3.4 Correction d'échauffement prévue pour des altitudes élevées

Sauf accord contraire entre le fournisseur et l'acheteur, pour les transformateurs prévus pour fonctionner à des altitudes supérieures à 1 000 m, mais soumis aux essais à des altitudes normales, les limites d'échauffement données dans le Tableau 2 doivent être réduites des quantités suivantes pour chaque tranche de 500 m au-dessus de 1 000 m:

- transformateurs à refroidissement naturel par air: 2 %;
- transformateurs à refroidissement forcé par air: 3 %.

Un correctif inverse correspondant peut être appliqué dans les cas où l'altitude de l'usine est supérieure à 1 000 m et où l'altitude de l'installation est inférieure à 1 000 m.

Toute correction d'échauffement en fonction de l'altitude doit être arrondie au nombre de Kelvin entier le plus proche.

L'influence d'une température ambiante ou d'une altitude différente sur le refroidissement de l'air de la cuve n'est pas prise en compte pour les transformateurs refroidis à l'eau.

5.3.5 Réduction des échauffements dans le cas de transformateurs prévus pour une température élevée de l'eau de refroidissement

La réduction des échauffements dans le cas de transformateurs prévus pour une température élevée de l'eau de refroidissement de l'IEC 60076-2 s'applique.

5.3.6 Échauffement au cours d'un cycle de charge spécifié

Dans le cadre d'un accord entre le constructeur et l'acheteur, les limites d'échauffement peuvent être garanties et/ou un essai spécial relatif à un fonctionnement en cycle de charge spécifié (voir l'IEC 60076-7).

5.4 Niveau d'isolement

Le niveau d'isolement décrit dans l'IEC 60076-3 s'applique.

5.5 Perte de charge sur les transformateurs directement connectés à un générateur

Les exigences relatives aux transformateurs directement connectés aux générateurs décrits dans l'IEC 60076-1 s'appliquent.

5.6 Tension assignée et fréquence assignée

La tension assignée et la fréquence assignée de l'IEC 60076-1 s'appliquent.

5.7 Dispositions pour les conditions de service inhabituelles

Toutes les conditions de service qui ne sont pas couvertes par les conditions de service normales doivent être identifiées par l'acheteur comme indiqué dans l'IEC 60076-1.

5.8 Tension la plus élevée pour le matériel U_m et niveaux d'essais diélectriques

La tension la plus élevée pour le matériel U_m et les niveaux d'essais diélectriques de l'IEC 60076-1 s'appliquent.

5.9 Informations supplémentaires exigées pour l'appel d'offres

Les informations supplémentaires exigées pour l'appel d'offres décrites dans l'IEC 60076-1 s'appliquent.

5.10 Composants et matériaux

Tous les composants et matériaux utilisés dans la construction des transformateurs doivent satisfaire aux exigences des normes IEC applicables, si elles existent, sauf accord ou spécification contraire. En particulier, les traversées doivent satisfaire à l'IEC 60137 et les changeurs de prises à l'IEC 60214-1. Les isolants gazeux doivent être conformes à l'IEC 60376 et à l'IEC 60480 pour les SF₆ neufs et usagés ou comme convenu pour les autres gaz.

5.11 Exigences relatives aux gaz et à l'étanchéité aux gaz

5.11.1 Exigences relatives aux gaz

Le constructeur doit spécifier le type ainsi que la quantité, la qualité et la densité exigées du gaz à utiliser dans un transformateur de puissance à isolation gazeuse.

La teneur en humidité maximale admissible à l'intérieur du transformateur de puissance à isolation gazeuse à la pression assignée de gaz doit être telle que le point de rosée ne soit pas supérieur à –20 °C pour une mesure à 20 °C. Une correction appropriée doit être effectuée pour les mesures réalisées à d'autres températures.

NOTE 1 Un point de rosée de –5 °C pour une mesure à 20 °C est acceptable pour les compartiments à remplissage de gaz autres que la cuve principale.

NOTE 2 Le niveau d'exigence pour la pureté de SF₆ avant le remplissage des transformateurs est supérieur ou égal à 97 %.

NOTE 3 Voir l'IEC 60376 et l'IEC 60480 pour la mesure et la détermination du point de rosée.

5.11.2 Étanchéité

L'IEC 62271-1 donne des règles générales relatives à l'étanchéité au gaz des appareillages à haute tension. Ces règles peuvent s'appliquer aux transformateurs de puissance à isolation gazeuse.

Les caractéristiques d'étanchéité doivent être cohérentes avec une philosophie minimale de maintenance et d'examen. L'étanchéité aux gaz est spécifiée par le taux de fuite relatif F_{rel} .

Pour les transformateurs remplis de SF₆, le taux de fuite relatif de SF₆ ne doit pas dépasser 0,5 % par an. Pour les transformateurs remplis d'un mélange de SF₆ et d'autres gaz, le taux de fuite relatif du mélange ne doit pas dépasser 0,5 % par an.

6 Exigences relatives aux transformateurs dotés d'un enroulement à prises

Les exigences relatives aux transformateurs dotés d'un enroulement à prises de l'IEC 60076-1 s'appliquent.

7 Symboles des couplages et des déphasages

Les symboles des couplages et des déphasages de l'IEC 60076-1 s'appliquent.

8 Plaques signalétiques

8.1 Généralités

Le transformateur doit être muni d'une plaque signalétique résistant aux intempéries, fixée à un emplacement visible et donnant les indications énumérées ci-dessous. Les inscriptions doivent être marquées de manière indélébile.

8.2 Informations devant être fournies dans tous les cas

Dans tous les cas, les informations énumérées ci-dessous doivent être incluses sur la plaque signalétique.

- a) Type de transformateur de puissance à isolation gazeuse (par exemple, transformateur de puissance à isolation gazeuse, autotransformateur de puissance à isolation gazeuse, transformateur survolteur-dévolteur à isolation gazeuse, etc.).
- b) Le numéro de cette norme.
- c) Le nom du constructeur, le pays et la ville d'assemblage du transformateur.
- d) Le numéro de série du constructeur.
- e) L'année de fabrication.
- f) Le nombre de phases.
- g) La puissance assignée (en kVA ou en MVA). (Pour les transformateurs à plus de deux enroulements, la puissance assignée de chacun d'eux doit être donnée. Les combinaisons de charges doivent également être indiquées, sauf si la puissance assignée de l'un des enroulements est égale à la somme des puissances assignées des autres enroulements).
- h) La fréquence assignée (en Hz).
- i) Les tensions assignées (en V ou en kV) et l'étendue de prises.
- j) Les courants assignés (en A ou en kA).
- k) Les symboles des couplages et des déphasages.
- l) L'impédance de court-circuit, valeur mesurée en pourcentage. Pour les transformateurs à plus de deux enroulements, plusieurs impédances correspondant à différentes combinaisons de deux enroulements doivent être données avec les valeurs de puissances de référence respectives. Pour les transformateurs dotés d'un enroulement à prises, voir également 5.5 et le point b) en 8.3 de l'IEC 60076-1:2011.
- m) Le mode de refroidissement. (si le transformateur a plusieurs modes assignés de refroidissement, les puissances correspondantes peuvent être exprimées en pourcentage de la puissance assignée, GNAN/GNAF (0/100 %, par exemple).
- n) Masse totale.
- o) La masse et le type de l'isolant gazeux en référence à la norme IEC correspondante.

- p) La puissance ou le courant de court-circuit maximal(e) du système utilisé(e) pour déterminer la capacité de tenue du transformateur, si elle n'est pas infinie.
- q) La température du système d'isolation pour chaque enroulement (pour les transformateurs à plus de deux enroulements, il convient de donner la température du système d'isolation de chacun d'eux).
- r) La pression assignée de gaz (pression manométrique en MPa).
- s) La pression de gaz minimale garantie (pression manométrique en MPa).

Si le transformateur a plus d'un ensemble de régimes assignés selon les différentes connexions d'enroulements qui ont été spécifiquement prévues à la construction, les régimes assignés supplémentaires doivent tous être indiqués sur la plaque signalétique, ou sur des plaques signalétiques différentes pour chaque ensemble.

8.3 Informations supplémentaires devant être données le cas échéant

Les informations énumérées ci-dessous doivent être incluses sur la plaque signalétique, lorsque cela est applicable à un transformateur particulier.

- a) Pour les transformateurs dotés d'un ou de plusieurs enroulements et dont 'la tension la plus élevée pour le matériel' U_m est supérieure ou égale à 3,6 kV:
 - la notation abrégée des niveaux d'isolement (tensions de tenue), telle que décrite dans l'IEC 60076-3.
- b) Les désignations de prise
 - Pour les transformateurs dont la tension assignée la plus élevée est inférieure ou égale à 72,5 kV et dont la puissance assignée est inférieure ou égale à 20 MVA (triphasé) ou 6,7 MVA (monophasé) ayant une étendue de prises ne dépassant pas $\pm 5\%$, les tensions de prise sur l'enroulement à prises pour toutes les prises.
 - Pour tous les autres transformateurs
 - un tableau énonçant la tension de prise et la tension de service de prise maximale admissible, le courant de prise, la puissance de prise et la connexion interne pour toutes les prises,
 - un tableau indiquant les valeurs d'impédance de court-circuit de la prise principale et au moins des prises extrêmes en % avec la puissance de référence.
- c) Garantie maximum des échauffements du gaz en partie supérieur et des enroulements (si ce ne sont pas des valeurs normales). Si un transformateur est destiné à être installé à haute altitude, l'altitude, la puissance assignée et l'échauffement à cette altitude doivent être indiqués sur la plaque signalétique, accompagnés de l'un des éléments suivants:
 - Si le transformateur est conçu pour être installé à haute altitude, l'échauffement (réduit) pour la puissance assignée dans les conditions de température normales du milieu de refroidissement externe.
 - Si le transformateur est conçu pour des conditions de température normales du milieu de refroidissement externe, la puissance assignée pour l'échauffement garanti dans les conditions de température normales du milieu de refroidissement externe.
- d) Le schéma de connexions (dans le cas où les symboles de couplage ne donneraient pas d'informations exhaustives quant aux connexions intérieures). Si les connexions peuvent être modifiées à l'intérieur du transformateur, cela doit être indiqué sur la même plaque, sur une plaque séparée ou avec des plaques signalétiques en double ou réversibles. Les connexions réalisées à la livraison doivent être indiquées.

Si des résistances non linéaires ou des fusibles sont utilisés dans le transformateur, l'emplacement et la connexion de ce type de matériel doivent être précisés sur la plaque du schéma de connexions avec les marquages de borne. Une indication des transformateurs de courant intégrés, le cas échéant, doit être présentée sur le schéma.
- e) Masse pour le transport (si elle est différente de la masse totale).
- f) Masse à soulever pour décuver (pour les transformateurs dont la masse totale dépasse 5 t).

- g) Capacité de tenue au vide de la cuve, des changeurs de prise et du matériel de refroidissement.
- h) Pour les transformateurs à plus de deux enroulements, toutes les restrictions des combinaisons de charge.
- i) Pour les transformateurs équipés d'indicateurs de température des enroulements (WTI (winding temperature indicator)), les paramètres de chacun des indicateurs. Il s'agit en général de la différence entre la température du point chaud de l'enroulement à la puissance assignée et la température du gaz au sommet calculée à partir des résultats d'essai d'échauffement. Si plusieurs méthodes de refroidissement sont spécifiées, différents paramètres peuvent être exigés pour chacune d'elles.
- j) Pour les transformateurs de courant installés à l'intérieur du transformateur, l'emplacement, le(s) rapport(s), la classe de précision et la puissance de précision (caractéristiques assignées VA) du transformateur de courant.
- k) La température minimale du milieu de refroidissement si elle n'est pas de -5 °C pour les transformateurs intérieurs ou de -25 °C pour les transformateurs extérieurs.

Les plaques avec l'identification et les caractéristiques du matériel auxiliaire conformément aux normes relatives à ces composants (traversées, changeurs de prises, transformateurs de courant, équipements de refroidissement particulier) doivent être fournies soit sur les composants eux-mêmes, soit sur le transformateur.

9 Exigences de sécurité, exigences environnementales et autres exigences

9.1 Exigences de sécurité et exigences environnementales

9.1.1 Fuites de gaz

Les constructeurs de transformateur doivent prévoir le confinement efficace du gaz du transformateur et prendre des mesures efficaces pour éviter les fuites. Les performances des éléments suivants doivent être prises en considération:

- la conception des raccords;
- les matériaux des joints;
- les soudures;
- la prévention contre la corrosion.

Les transformateurs doivent être conçus pour ne présenter aucune fuite et toutes les fuites détectées sur site à l'issue de la mise en service doivent être réparées par le fournisseur responsable.

9.1.2 Considérations relatives à la sécurité

Le constructeur doit prévoir la sécurité des opérateurs et du personnel de maintenance dans la conception du transformateur, concernant les aspects suivants:

- accès aux pièces à haute température;
- accès aux parties sous tension;
- accès aux pièces mobiles;
- les dispositions de levage et de manutention;
- la sécurité pendant la manipulation du gaz sur site;
- accès pour la maintenance là où c'est nécessaire;
- le travail en hauteur.

Si l'installation peut affecter l'un des éléments ci-dessus, des instructions d'installation adaptées doivent accompagner le transformateur.

NOTE 1 La série ISO 14122 est consultée si des échelles, des plateformes et d'autres moyens analogues sont fournis avec le transformateur.

NOTE 2 La sécurité lors de la manipulation du SF₆ sur site est décrite dans l'Annexe B de l'IEC 62271-4:2002. Plus particulièrement, la manipulation du SF₆ ne doit être effectuée que par du personnel dûment qualifié.

9.2 Dimensionnement de la connexion de neutre

Le dimensionnement de la connexion de neutre de l'IEC 60076-1 s'applique.

9.3 Procédure de manipulation du SF₆

Il convient de manipuler le SF₆ en cycle fermé, afin d'éviter toute dispersion délibérée dans l'environnement. Parmi toutes les initiatives volontaires, la récupération et la réutilisation du gaz ont la priorité.

Pour le développement, la fabrication, l'installation, l'exploitation, la maintenance et l'élimination en fin de vie des équipements d'alimentation électrique utilisant le SF₆, les technologies de pointe et les procédures sont appliquées pour réduire au minimum les émissions de SF₆. La procédure de manipulation du SF₆ décrite dans l'IEC 62271-4 s'applique.

9.4 Courants continus dans les circuits de neutre

Les courants continus dans les circuits de neutre de l'IEC 60076-1 s'appliquent.

9.5 Marquage du centre de gravité

Le marquage du centre de gravité de l'IEC 60076-1 s'applique.

10 Tolérances

Les tolérances de l'IEC 60076-1 s'appliquent.

11 Essais

11.1 Exigences générales relatives aux essais individuels de série, aux essais de type et aux essais spéciaux

11.1.1 Généralités

Les transformateurs doivent être soumis aux essais décrits ci-dessous.

Les essais à l'exception des essais d'échauffement doivent être réalisés à une température du milieu de refroidissement externe comprise entre 10 °C et 40 °C. Voir 11.5 pour les essais d'échauffement.

Les essais doivent être effectués dans les ateliers du constructeur, sauf accord contraire entre le constructeur et l'acheteur.

Tous les composants extérieurs et accessoires qui sont susceptibles d'influencer le fonctionnement du transformateur pendant l'essai doivent être en place.

Si le transformateur ne peut pas être monté dans ses conditions de fonctionnement prévues pour l'essai (s'il est équipé de piètement d'essai et des traversées d'essai ou si la disposition des équipements de refroidissement ne peut pas être identique à la position de service, pendant l'essai en usine correspondant, par exemple), un accord doit être conclu entre le constructeur et l'acheteur avant le début des essais. Si des limitations sont connues lors de l'appel d'offres, elles doivent être précisées par le constructeur.

Les enroulements à prise doivent être reliés à leur prise principale, sauf exigence contraire précisée dans l'article relatif à l'essai en cause ou sauf accord contraire entre le constructeur et l'acheteur.

Pour toutes les caractéristiques autres que l'isolement, les essais sont basés sur les conditions assignées, à moins qu'il n'en soit spécifié autrement par l'article relatif à l'essai en cause.

Tous les appareils de mesure utilisés pour les essais doivent être garantis de précision connue et régulièrement étalonnés.

Des exigences spécifiques relatives à la précision et la vérification des systèmes de mesure sont décrites dans la série IEC 60060 et dans l'IEC 60076-8.

Toutes les mesures et tous les essais exigeant une alimentation à fréquence industrielle doivent être réalisés avec la fréquence d'alimentation à 1 % près de la fréquence assignée du transformateur. La forme d'onde de la tension d'alimentation doit être telle que le contenu harmonique total ne dépasse pas 5 %. Si cette condition n'est pas satisfaite, les effets de la forme d'onde sur le paramètre mesuré doivent être évalués par le constructeur et être soumis à approbation par l'acheteur. Il convient de ne pas corriger à la baisse les mesures de perte pour tenir compte des harmoniques dans la tension d'alimentation, sauf dans le cadre de ce qui est admis en 11.5 de l'IEC 60076-1:2011. Si une alimentation triphasée est utilisée, la tension d'alimentation doit être symétrique. La tension maximale dans chaque enroulement de phase en essai ne doit pas différer de la tension minimale de plus de 3 %.

Si le constructeur n'est pas en mesure de réaliser l'essai ou la mesure à la fréquence assignée, cela doit être indiqué lors de l'appel d'offres par le constructeur, et les facteurs de conversion appropriés doivent faire l'objet d'un accord.

La liste d'essais suivante n'est pas présentée dans un ordre particulier. Si l'acheteur exige que les essais soient réalisés dans un ordre particulier, cela doit être inclus dans l'appel d'offres.

11.1.2 Essais individuels de série

11.1.2.1 Généralités

Les essais individuels de série énumérés en 11.1.2.2 doivent être appliqués à tous les transformateurs et les essais individuels de série supplémentaires énumérés en 11.1.2.3 doivent être appliqués aux transformateurs avec $U_m > 72,5$ kV.

11.1.2.2 Essais individuels de série pour tous les transformateurs

- a) Mesure de la résistance de l'enroulement (IEC 60076-1).
- b) Mesure du rapport de tension et contrôle du déphasage (IEC 60076-1).
- c) Mesure de l'impédance de court-circuit et des pertes dues à la charge (11.2).
- d) Mesure des pertes à vide et du courant à vide (IEC 60076-1).
- e) Essais diélectriques de routine (IEC 60076-3).
- f) Essais réalisés sur les changeurs de prises en charge, le cas échéant (IEC 60076-1).
- g) Essais d'étanchéité des cuves (11.3).
- h) Essais de pression des cuves (11.4).
- i) Vérification du rapport et de la polarité des transformateurs de courant intégrés (IEC 60076-1).
- j) Vérification de l'isolation du circuit magnétique et de son habillage pour les transformateurs de puissance à isolation gazeuse qui en sont dotés (IEC 60076-1).

11.1.2.3 Essais individuels de série supplémentaires pour les transformateurs avec $U_m > 72,5 \text{ kV}$

- a) Détermination des capacités enroulements/terre et entre les enroulements (IEC 60076-1).
- b) Mesure de la résistance d'isolement en courant continu entre chaque enroulement et la terre et entre les enroulements (IEC 60076-1).
- c) Mesure du facteur de dissipation ($\tan \delta$) des capacités du système d'isolement (IEC 60076-1).
- d) Mesure des gaz dissous dans l'isolant gazeux provenant du compartiment du transformateur principal, sauf le compartiment du commutateur, de l'extrémité de câble et de l'appareillage de commutation à isolation gazeuse (GIS (Gas-Insulated Switchgear)).
- e) Mesure des pertes à vide et du courant à vide à 90 % et 110 % de la tension assignée (IEC 60076-1).

11.1.3 Essais de type

- a) Essai de type d'échauffement (11.5).
- b) Essais de type diélectriques (IEC 60076-3).
- c) Détermination du niveau de bruit (11.6) pour chaque méthode de refroidissement pour laquelle un niveau de bruit garanti est spécifié (IEC 60076-1).
- d) Mesure de la puissance absorbée par les moteurs des ventilateurs et des pompes de circulation du gaz.
- e) Mesure des pertes à vide et du courant à vide à 90 % et 110 % de la tension assignée (IEC 60076-1).

11.1.4 Essais spéciaux

- a) Essais spéciaux diélectriques (IEC 60076-3).
- b) Détermination des capacités enroulements/terre et entre les enroulements (IEC 60076-1).
- c) Mesure du facteur de dissipation ($\tan \delta$) des capacités du système d'isolement (IEC 60076-1).
- d) Détermination des caractéristiques de transfert de tension transitoire (Annexe B de l'IEC 60076-3:2013).
- e) Mesures d'impédance(s) homopolaire(s) sur des transformateurs triphasés (IEC 60076-1).
- f) Essai de tenue au court-circuit (IEC 60076-5).
- g) Mesure de la résistance d'isolement en courant continu entre chaque enroulement et la terre et entre les enroulements (IEC 60076-1).
- h) Mesure de la réponse en fréquence (analyse de la réponse en fréquence ou FRA (Frequency Response Analysis)). La procédure d'essai doit être convenue entre le constructeur et l'acheteur (IEC 60076-1).
- i) Vérification du revêtement extérieur (ISO 2178 et ISO 2409 ou telle que spécifiée).
- j) Mesure des gaz dissous dans l'isolant gazeux provenant du compartiment du transformateur principal, sauf le compartiment du commutateur, de l'extrémité de câble et de l'appareillage de commutation à isolation gazeuse (GIS (Gas-Insulated Switchgear)).
- k) Essai mécanique ou évaluation de la cuve pour l'aptitude au transport (spécification du client) (IEC 60076-1).
- l) Détermination du poids, le transformateur étant préparé pour le transport. Pour les transformateurs jusqu'à 1,6 MVA, par mesure. Pour les transformateurs plus volumineux, par mesure ou calcul dans le cadre d'un accord entre le constructeur et l'acheteur (IEC 60076-1).

D'autres essais pour les transformateurs peuvent être définis dans les documents spécifiques pour les transformateurs spécialisés (de type sec, autoprotégés et autres groupes, par exemple).

NOTE Bien que les "mesures directes d'échauffement du point chaud des enroulements" soient énumérées en 11.1.4 b) de l'IEC 60076-1:2011, dans la présente norme, il n'est pas recommandé de procéder à des mesures directes (capteurs à fibres optiques, par exemple) en raison de problèmes liés aux fuites de gaz. L'échauffement du point chaud des enroulements est déterminé selon les calculs décrits en 7.10.2 de l'IEC 60076-2:2011.

Si certaines méthodes d'essais ne sont pas décrites dans la présente norme, ou si des essais autres que ceux énumérés ci-dessus sont spécifiés dans le contrat, les méthodes d'essais font l'objet d'un accord.

11.2 Mesure de l'impédance de court-circuit et des pertes dues à la charge

L'essai décrit dans l'IEC 60076-1 s'applique.

La température de référence de l'impédance de court-circuit et des pertes dues à la charge doit être égale

- à 75 °C pour une température du système d'isolation de 105 °C;
- aux limites K du Tableau 2 pour l'échauffement moyen des enroulements, plus 20 °C pour les autres températures du système d'isolation.

NOTE La température de référence avec un système d'isolation de classe 200 ou supérieure est soumise à un accord entre le fournisseur et l'acheteur.

Lorsqu'un transformateur possède des enroulements comportant des systèmes d'isolation de températures différents, la température de référence utilisée doit être celle qui est relative à l'enroulement ayant la température du système d'isolation la plus élevée.

11.3 Essai de fuite avec pression (essai d'étanchéité)

L'IEC 62271-1 donne une méthode d'essai générale relative à l'étanchéité au gaz des appareillages à haute tension.

Cette méthode peut s'appliquer aux transformateurs de puissance à isolation gazeuse.

L'objet des essais d'étanchéité est de démontrer que le taux de fuite absolu F n'excède pas la valeur spécifiée du taux de fuite admissible F_p .

Dans la mesure du possible, il convient que les essais soient effectués à la température ambiante normale sur un système complet rempli à la pression assignée de gaz. Quand cela n'est pas pratique, les essais peuvent être effectués sur des parties, composants ou sous-ensembles. Dans ces conditions, le taux de fuite du système complet doit être déterminé par addition des taux de fuite des composants. Les fuites éventuelles entre sous-ensembles à différentes pressions doivent également être prises en compte.

En général, seules des mesures de fuite par accumulation permettent de calculer le taux de fuite. Étant donné les taux de fuite relativement faibles de ces systèmes, les mesures de baisse de pression ne sont pas applicables. D'autres méthodes telles que les détecteurs à halogène peuvent être utilisées pour mesurer le taux de fuite. Si l'objet en essai est rempli avec un gaz d'essai différent du gaz utilisé en service et/ou à une pression d'essai différente de la pression normale de service, des facteurs de correction définis entre le constructeur et l'acheteur doivent être utilisés pour les calculs.

Il convient que le rapport d'essai comprenne les informations suivantes:

- une description de l'objet en essai, comprenant son volume interne et la nature du gaz de remplissage;
- les pressions et les températures enregistrées au début et à la fin de l'essai;
- une indication de l'étalonnage des appareils de mesure utilisés pour détecter les taux de fuite;
- les résultats des mesures;

- s'il y a lieu, le gaz d'essai et le facteur de correction pour estimer les résultats.

11.4 Essais de pression pour les cuves

Un essai de pression doit être réalisé sur toutes les cuves. La pression d'essai normalisée doit être égale à k fois la pression de calcul de la cuve, où le facteur k est égal à

- 1,3 pour les cuves en acier et en aluminium soudées;
- 2,0 pour les cuves en acier et en aluminium moulées.

NOTE 1 Voir l'IEC 62271-203.

NOTE 2 Le facteur k est applicable à la fois aux cuves aux couvercles boulonnés et soudés.

La pression d'essai mesurée par le manomètre doit être maintenue pendant au moins 1,0 min. Il convient qu'aucune rupture ou déformation permanente ne se produise au cours de l'essai.

L'attention est attirée sur les questions relatives à la sécurité pendant l'essai et il est recommandé d'utiliser de l'eau pour l'essai sur la cuve avec couvercle.

NOTE 3 S'il existe des réglementations locales relatives aux réservoirs sous pression, celles-ci seront appliquées au facteur k .

11.5 Essai d'échauffement

11.5.1 Généralités

L'essai décrit dans l'IEC 60076-2 s'applique en remplaçant le liquide par du gaz.

11.5.2 Corrections

L'échauffement du gaz au moment de la coupure de l'essai d'échauffement doit être multiplié par:

$$\left(\frac{\text{total losses}}{\text{test losses}} \right)^x$$

Anglais	Français
total losses	pertes totales
test losses	pertes d'essai

Le gradient des enroulements (différence entre échauffement moyen du gaz et échauffement moyen des enroulements) au moment de la coupure doit être multiplié par:

$$\left(\frac{\text{rated current}}{\text{test current}} \right)^y$$

Anglais	Français
rated current	courant assigné
test current	courant d'essai

Les exposants devant être appliqués sont donnés dans le Tableau 3 en fonction du type de transformateur et du système de refroidissement.

Les corrections apportées à l'aide de l'exposant du tableau mentionné sont conservatrices et destinées uniquement à rapporter l'échauffement pendant un essai dans les conditions stables et dans les limites indiquées ci-dessus.

Tableau 3 – Exposants pour les corrections des résultats d'essai d'échauffement

Type de transformateur Type d'exposant	Transformateurs de distribution	Transformateur de grande puissance et de moyenne puissance		
	GNAN	GN...	GF...	GD...
Exposant x de l'échauffement du gaz en partie supérieure	0,8	0,9	1,0	1,0
Exposant y de l'échauffement moyen des enroulements	1,6	1,6	1,6	2,0
NOTE Pour les besoins du présent tableau, les transformateurs de distribution sont des transformateurs dont la puissance assignée est égale ou inférieure 2 500 kVA.				

11.6 Mesure du niveau de bruit

11.6.1 Généralités

La mesure du niveau de bruit, à l'exception du contour prescrit dans l'IEC 60076-10, s'applique.

11.6.2 Contour prescrit

S'agissant des mesures effectuées avec des auxiliaires de refroidissement à ventilation forcée et à circulation forcée de gaz (le cas échéant, ventilateur, souffleurs à gaz, par exemple) hors service, le contour prescrit doit être espacé de 0,3 m de la surface de rayonnement principale.

Pour les mesures effectuées avec des auxiliaires de refroidissement à ventilation forcée ou à circulation forcée de gaz en service, le contour prescrit doit être espacé de 2 m de la surface de rayonnement principale.

12 Compatibilité électromagnétique (CEM)

La Compatibilité électromagnétique (CEM) décrite dans l'IEC 60076-1 s'applique.

13 Transitoires de commutation à haute fréquence

Les transitoires de commutation à haute fréquence décrits dans l'IEC 60076-1 s'appliquent.

14 Borne de terre

Les transformateurs doivent être munis d'une borne de terre.

15 Informations exigées à l'appel d'offres et à la commande

Les exigences de l'Annexe A s'appliquent.

Annexe A (informative)

Liste de contrôle des informations devant être fournies avec l'appel d'offres et la commande

A.1 Caractéristiques assignées et données générales

A.1.1 Informations normales

Les informations suivantes doivent être données dans tous les cas:

- a) Spécifications particulières auxquelles le transformateur doit satisfaire.
- b) Type de transformateur, par exemple transformateur à enroulements séparés, autotransformateur ou transformateur survolteur-dévolteur.
- c) Unité monophasée ou triphasée.
- d) Nombre de phases du réseau.
- e) Fréquence.
- f) Transformateurs à isolation gazeuse, type de gaz, SF₆ ou autres;
- g) Type intérieur ou extérieur.
- h) Mode de refroidissement.
- i) Puissance assignée de chaque enroulement et, dans le cas où l'étendue de prises dépasse $\pm 5\%$, la prise à courant maximal spécifiée, s'il y a lieu. Si le transformateur possède plusieurs modes possibles de refroidissement, les niveaux de puissance inférieurs doivent être énoncés en même temps que la puissance assignée (qui correspond au mode de refroidissement le plus efficace).
- j) Tension assignée pour chaque enroulement.
- k) Pour un transformateur avec prises (voir 6.4 de l'IEC 60076-1:2011):
 - si un changeur de prises hors tension ou un changeur de prises en charge est exigé;
 - toutes les exigences relatives au rapport du nombre de spires entre deux enroulements particuliers sur un transformateur à plus de deux enroulements;
 - si une prise ou une étendue de prises peut être une prise à puissance réduite;
 - le nombre d'échelons de réglage et la taille de l'échelon de réglage ou de l'étendue de prises;et soit:
 - l'enroulement à prises;
 - si l'étendue de prises est supérieure à $\pm 5\%$, le type de réglage de la tension et la position de la prise à courant maximal, s'il y a lieu;soit:
 - la direction du flux de puissance (éventuellement bidirectionnel);
 - quelle tension doit varier afin de définir la tension de prise assignée ;
 - le facteur de puissance minimale à pleine charge.
- l) Tension la plus élevée pour le matériel (U_m) pour chaque borne de ligne et de neutre de chaque enroulement (concernant l'isolation, voir l'IEC 60076-3).
- m) Méthode de mise à la terre du réseau (pour chaque enroulement).
- n) Niveaux d'isolement et d'essai diélectrique (voir l'IEC 60076-3), pour chaque borne de ligne et de neutre de chaque enroulement.
- o) Exigences relatives au symbole de couplage et aux bornes neutres pour chaque enroulement.

- p) Toutes les particularités d'installation, de montage, de transport et de manutention. Limitations en dimensions et en masse.
- q) Détails relatifs à la tension d'alimentation des auxiliaires (pour ventilateurs et souffleurs à gaz, changeur de prises, alarmes, etc.).
- r) Accessoires requis et indication du côté où les appareils de mesure, plaques signalétiques, etc., doivent être lisibles.
- s) Pour les transformateurs à plus de deux enroulements, combinaison des charges requises en indiquant séparément, s'il y a lieu, les transits de puissance actives et réactives, notamment dans le cas d'un autotransformateur à plus de deux enroulements.
- t) Informations sur l'échauffement maximum garanti.
- u) Conditions de service inhabituelles (voir Article 4 et en 5.5 de l'IEC 60076-1:2011).
- v) Détails concernant le type et la disposition des bornes, par exemple traversées aériennes ou boîte à câbles ou jeu de barres isolé au gaz (GIS).
- w) S'il convient de sortir les connexions du circuit magnétique et de son habillage pour une mise à la terre externe.
- x) Tenue au vide de la cuve du transformateur.
- y) Réglementations locales relatives aux réservoirs sous pression.

A.1.2 Informations spéciales

Les informations supplémentaires suivantes doivent être données si le point particulier est exigé par l'acheteur:

- a) Si un essai au choc de foudre est exigé, et s'il doit comporter ou non un essai en onde coupée (voir IEC 60076-3).
- b) Si un enroulement de stabilisation est exigé et, si c'est le cas, le mode de mise à la terre.
- c) L'impédance de court-circuit ou la plage d'impédances (voir Annexe C de l'IEC 60076-1:2011). Pour les transformateurs à plus de deux enroulements, toutes les impédances qui sont spécifiées pour des paires d'enroulements particuliers (avec les valeurs de référence si les valeurs sont données en pourcentage).
- d) Les tolérances sur les rapports de transformation et les impédances de court-circuit laissées au choix dans le Tableau 1 de l'IEC 60076-1:2011, ou différentes des valeurs données dans ce tableau.
- e) Les couplages exigés au départ de l'usine, dans le cas des transformateurs ayant plusieurs possibilités de couplages des enroulements, et la manière dont il convient de modifier ces couplages.
- f) Les caractéristiques de court-circuit du réseau (données par la puissance ou le courant de court-circuit, ou les données d'impédance du réseau) et les limites éventuelles affectant la conception du transformateur (voir l'IEC 60076-5).
- g) Les détails des exigences de niveau de bruit, des garanties et des mesures particulières (voir l'IEC 60076-10).
- h) Tous les essais particuliers qui ne sont pas mentionnés ci-dessus et qui sont exigés par l'acheteur.
- i) Les informations sur l'évaluation des pertes ou les pertes maximales.
- j) Toutes les limites de dimension physique (pour l'installation sur une fondation existante ou dans un bâtiment, par exemple). Les limites dimensionnelles particulières qui peuvent avoir des conséquences sur les distances d'isolement et la position des bornes du transformateur.
- k) Les limitations de dimension et de poids pour l'expédition. Les valeurs minimales de tenue à l'accélération, si elles sont supérieures à celles spécifiées en 5.7.4.2 de l'IEC 60076-1:2011.
- l) Les conditions de transport et de stockage qui ne sont pas couvertes par les conditions normales décrites en 5.7.4 et 4.2 de l'IEC 60076-1:2011.

- m) Toutes les exigences ou limitations de maintenance particulières.
- n) Si une chambre de coupure est requise pour les connexions par boîte à câble.
- o) Si des installations de surveillance d'état sont exigées (voir Annexe C).
- p) Toutes les considérations environnementales particulières eu égard à l'impact du transformateur sur l'environnement qui doivent être prises en compte dans la conception du transformateur (voir Annexe G de l'IEC 60076-1:2011). Plus particulièrement, il convient de manipuler le SF₆ dans un cycle fermé, afin d'éviter toute fuite délibérée dans l'environnement. Parmi toutes les initiatives volontaires, la détente et la réutilisation du gaz ont la priorité (voir 9.3).
- q) Toutes les considérations relatives à la santé et la sécurité qui doivent être prises en compte dans la conception du transformateur quant à la fabrication, l'installation, l'exploitation, la maintenance et la mise au rebut (voir Annexe G de l'IEC 60076-1:2011).
- r) Les conditions de fonctionnement électrique inhabituelles ci-dessous:
 - 1) si un transformateur doit être connecté à un générateur directement ou par un appareil de connexion, et s'il fera l'objet de conditions de perte de charge et de conditions particulières de perte de charge.
 - 2) si la forme d'onde du courant de charge sera fortement altérée. Si une charge triphasée déséquilibrée est prévue. Dans les deux cas, donner des détails.
 - 3) si un transformateur doit être connecté directement ou par une ligne aérienne de courte longueur à un appareillage de commutation à isolation gazeuse (GIS).
 - 4) si les transformateurs vont être soumis à de fréquentes surintensités (les transformateurs de fours ou de traction, par exemple).
 - 5) détails des surcharges cycliques régulières prévues, autres que celles considérées en 5.1.4 de l'IEC 60076-1:2011 (pour permettre d'établir les caractéristiques assignées des accessoires du transformateur).
 - 6) tensions c.a. déséquilibrées, ou écart de tensions c.a. du réseau par rapport à une forme d'onde pratiquement sinusoïdale.
 - 7) charges impliquant des courants d'harmoniques anormaux, tels que ceux qui peuvent résulter de courants de charge appréciables contrôlés par des dispositifs statiques ou analogues. Ces courants d'harmonique peuvent être à l'origine de pertes excessives et d'un échauffement anormal.
 - 8) conditions de charge spécifiées (sorties kVA, facteurs de puissance de la charge de l'enroulement et tensions de l'enroulement) associées aux transformateurs à plus de deux enroulements et aux autotransformateurs.
 - 9) excitation dépassant 110 % de la tension assignée ou 110 % de V/Hz assigné .
 - 10) courts-circuits prévus dans le cadre du fonctionnement normal ou du contrôle de commande.
 - 11) conditions d'application de court-circuit inhabituelles différentes de celles de l'IEC 60076-5.
 - 12) conditions de tension inhabituelles, y compris les surtensions transitoires, la résonance, les surtensions de manœuvre, etc. qui peuvent exiger de considérer la conception de l'isolement de manière particulière.
 - 13) champs magnétiques exceptionnellement puissants. Il convient de noter que les perturbations magnétiques solaires peuvent donner lieu à des courants géomagnétiques dans les neutres du transformateur.
 - 14) les transformateurs de grande puissance munis de jeux de barres à fort courant. Il convient de noter que les gaines à barre isolées à fort courant avec les champs magnétiques importants qui les accompagnent peuvent causer des courants de circulation imprévus dans les cuves et les couvercles des transformateurs, et dans les gaines. Les pertes résultant de ces courants imprévus peuvent entraîner des températures excessives lorsque des mesures préventives ne sont pas incluses dans la conception.

- 15) fonctionnement en parallèle. Il convient de noter que lorsque le fonctionnement en parallèle est habituel, il est souhaitable que les utilisateurs informent le constructeur si un fonctionnement en parallèle avec d'autres transformateurs est prévu et il est souhaitable d'identifier les transformateurs concernés.
 - 16) enclenchements répétés fréquents dépassant 24 fois par an.
 - 17) courts-circuits fréquents.
- s) Conditions environnementales physiques exceptionnelles
- 1) altitude au-dessus du niveau de la mer, si elle dépasse 1 000 m (3 300 pieds).
 - 2) conditions de température particulières du milieu de refroidissement externe, hors de la plage normale (voir 4.2 b) de l'IEC 60076-1:2011) ou restrictions à la circulation d'air de refroidissement.
 - 3) activité sismique présumée sur le site, qui exige une prise en compte particulière.
 - 4) fumées de vapeur nuisibles, poussière excessive ou abrasive, mélanges de poussière ou de gaz explosifs, vapeur, brouillard salin, excès d'humidité ou égouttement d'eau, etc.
 - 5) vibrations, inclinaisons ou chocs anormaux.

A.2 Fonctionnement en parallèle

Si le fonctionnement en parallèle avec des transformateurs existants est exigé, cela doit être énoncé et les informations suivantes sur les transformateurs existants fournies:

- a) Puissance assignée.
- b) Rapport de transformation assigné.
- c) Rapports de transformation correspondant aux prises autres que la prise principale.
- d) Pertes dues à la charge au courant assigné sur la prise principale et ramenées à la température de référence appropriée. Voir 11.1 de l'IEC 60076-1:2011.
- e) Impédance de court-circuit sur la prise principale et sur les prises extrêmes, si la tension sur les prises extrêmes est différente de plus de 5 % de celle de la prise principale. Impédance sur les autres prises, le cas échéant.
- f) Schéma des connexions et/ou symbole de couplage.

Pour les transformateurs à plus de deux enroulements, des informations supplémentaires sont en général exigées.

Annexe B (informative)

Charge transitoire – Modèle mathématique

B.1 Généralités

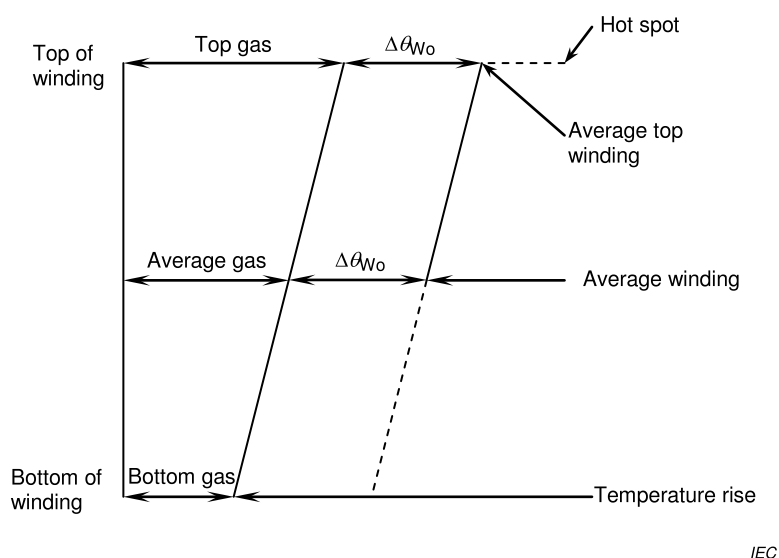
Le résultat d'un essai d'échauffement en régime établi, conformément à 11.5, peut être utilisé pour une estimation de l'échauffement en régime établi à différentes charges, et également pour une estimation de l'échauffement en régime transitoire (si les constantes de temps thermiques du transformateur sont connues).

Pour les transformateurs de petite taille et de taille moyenne, de telles estimations sont réalisées conformément à un modèle mathématique conventionnel qui est décrit dans l'Article B.2 ci-dessous.

La validité de ce modèle pour chacun des transformateurs de grande puissance particuliers n'est cependant pas aussi certaine que pour les transformateurs de plus faible puissance assignée. Lorsqu'une étude de capacité de charge doit être réalisée, par exemple, pour une charge de secours au-dessus de la puissance assignée, il est souhaitable d'obtenir les données propres au transformateur réel. Un moyen consiste à procéder à un essai spécial avec une surcharge transitoire au-delà de la puissance assignée. Les recommandations concernant une procédure appropriée d'essai et portant sur les mesures et les observations associées sont exposées dans l'IEC 60076-2.

B.2 Modèle mathématique de distribution de température dans un enroulement de transformateur de puissance à isolation gazeuse – Concept de point chaud

Le gaz de refroidissement entre par la partie inférieure des enroulements et est à la "température du gaz de la partie inférieure". Il monte à travers les enroulements et sa température est supposée s'élever linéairement avec la hauteur. Les pertes des enroulements sont transférées des enroulements vers le gaz tout au long de ceux-ci. Ce transfert de chaleur se traduit par un gradient de température entre les enroulements et le gaz environnant qui est supposée être le même à toutes les altitudes. Dans la représentation graphique, Figure B.1, la température de l'enroulement et la température du gaz apparaissent donc comme deux lignes parallèles.



IEC

Anglais	Français
Top of winding	Sommet de l'enroulement
Top gas	Gaz en partie supérieure
$\Delta\theta_{Wo}$	$\Delta\theta_{Wo}$
Hot spot	Point chaud
Average top winding	Enroulement moyen en haut
Average gas	Gaz moyen
Average winding	Enroulement moyen
Bottom of winding	Base de l'enroulement
Bottom gas	Gaz, partie inférieure
Temperature rise	Échauffement

Figure B.1 – Modèle de distribution de température

La température maximale apparaissant en n'importe quel point du système d'isolation des enroulements est appelée "température du point chaud". Ce paramètre est supposé représenter la limitation thermique due à la charge du transformateur. En règle générale, il convient de choisir les autres parties du transformateur (les traversées, les transformateurs de courant ou les changeurs de prises, par exemple) de manière à ce qu'elles ne limitent pas la capacité de charge du transformateur à une valeur inférieure. Voir 5.1.4 de l'IEC 60076-1:2011.

Au voisinage de l'extrémité supérieure des enroulements, il y a habituellement une concentration de pertes par courant de Foucault et les enroulements peuvent être munis d'une isolation électrique renforcée qui augmente l'isolation thermique. C'est pourquoi la différence réelle de température locale entre le conducteur et le gaz est supposée être augmentée par le "facteur de point chaud". Ce facteur est supposé être entre 1,1 pour les transformateurs de distribution, et 1,3 pour les transformateurs de taille moyenne. Les grands transformateurs présentent des différences considérables selon le mode de construction, et il convient de consulter le constructeur pour information, à moins que des mesures réelles ne soient réalisées.

Le gradient en régime établi entre les enroulements et le gaz, valeur moyenne le long de l'enroulement, est prise comme étant la différence entre [la température moyenne des enroulements mesurée par variation de résistance] et [la température moyenne du gaz], voir respectivement 7.4 et 7.6 de l'IEC 60076-2:2011, avec la transposition du liquide au gaz.

En régime établi, l'échauffement du point chaud au-dessus de la température du fluide de refroidissement externe (air ou eau) est la somme de [l'échauffement du gaz supérieur au-dessus de la température du fluide de refroidissement] et du produit [facteur de point chaud] × [gradient moyen entre enroulement et gaz].

Annexe C (informative)

Jauges, indicateurs et relais des transformateurs de puissance à isolation gazeuse

La présente Annexe compare les niveaux, indicateurs et relais montrés dans le Tableau C.1 pour les transformateurs de puissance à isolation gazeuse par rapport aux transformateurs de puissance immergés dans l'huile. Les niveaux, indicateurs et relais réellement fournis doivent être convenus entre le constructeur et l'acheteur et dépendent de la taille et de la criticité du transformateur de puissance à isolation gazeuse.

D'autres lignes directrices sont données dans la brochure 445 du CIGRE Annexe 2: février 2011.

Tableau C.1– Comparaison des jauges, indicateurs et relais
des transformateurs de puissance à isolation gazeuse et
des transformateurs de puissance immergés dans l'huile

	Transformateurs de puissance à isolation gazeuse	Transformateurs de puissance immergés dans l'huile
Composants recommandés pour le transformateur de puissance à isolation gazeuse	Indicateur de température du gaz	Indicateur de température de l'huile
	Manovacuumètre	Indicateur de niveau d'huile
	densistat	
	Relais de pression soudaine du gaz pour changeurs de prises en charge (OLTC On-load tap-changers))	Relais de montée rapide de la pression (Relais de détection de gaz , Relais de détection de défaut à pression et Relais de brusque pression)
Composants facultatifs pour le transformateur de puissance à isolation gazeuse	Relais de brusque pression du gaz pour la cuve principale	
	Indicateur de température de l'enroulement	Indicateur de température de l'enroulement
	soupape ou membrane fusible (Voir NOTE 1)	soupape
	Indicateurs de débit de gaz	Indicateurs de circulation d'huile
NOTE 1 Il n'est pas recommandé d'utiliser des dispositifs de décharge de pression sur la cuve du transformateur à isolation gazeuse, car la montée en pression du transformateur de puissance à isolation gazeuse est très faible lorsqu'un défaut interne se produit. NOTE 2 Bien que des relais Buchholz soient utilisés pour les transformateurs de puissance immergés dans l'huile, il n'existe pas de relais aux fonctions analogues pour les transformateurs de puissance à isolation gazeuse.		

Bibliographie

IEC 60044 (toutes les parties), *Transformateurs de mesure*

IEC 60050, *Vocabulaire Électrotechnique International* (à l'adresse www.electropedia.org)

IEC 60071 (toutes les parties), *Coordination de l'isolement*

IEC 60076-6, *Transformateurs de puissance – Partie 6: Bobines d'inductance*

IEC 60076-7, *Transformateurs de puissance – Partie 7: Guide de charge pour transformateurs immergés dans l'huile*

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

IEC 60076-13, *Transformateurs de puissance – Partie 13: Transformateurs auto-protégés immergés dans un liquide diélectrique*

IEC 60076-14:2013, *Transformateurs de puissance – Partie 14: Transformateurs de puissance immergés dans du liquide utilisant des matériaux isolants haute température*

IEC 60076-16, *Transformateurs de puissance – Partie 16: Transformateurs pour applications éoliennes*

IEC 60085, *Isolation électrique – Evaluation et désignation thermiques*

IEC 60214-1, *Changeurs de prises – Partie 1: Prescriptions de performances et méthodes d'essai*

IEC 60310, *Applications ferroviaires – Transformateurs de traction et bobines d'inductance à bord du matériel roulant*

IEC 60721-3-4, *Classification des conditions d'environnement – Partie 3: Classification des groupements des agents d'environnement et de leurs sévérités – Section 4: Utilisation à poste fixe, non protégé contre les intempéries*

IEC/TR 60943, *Guide concernant l'échauffement admissible des parties des matériels électriques, en particulier les bornes de raccordement*

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

IEC 61378-2, *Transformateurs de puissance – Partie 2: Transformateurs pour applications CCHT*

IEC 62271-203, *Appareillage à haute tension – Partie 203: Appareillage sous enveloppe métallique à isolation gazeuse de tensions assignées supérieures à 52 kV*

ISO 2178, *Revêtements métalliques non magnétiques sur métal de base magnétique – Mesurage de l'épaisseur du revêtement – Méthode magnétique*

ISO 2409, *Peintures et vernis – Essai de quadrillage*

ISO 14122 (toutes les parties), *Sécurité des machines – Moyens d'accès permanents aux machines*

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

3, rue de Varembé
PO Box 131
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel: + 41 22 919 02 11
Fax: + 41 22 919 03 00
info@iec.ch
www.iec.ch