

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Power transformers –
Part 16: Transformers for wind turbine applications**

**Transformateurs de puissance –
Partie 16: Transformateurs pour applications éoliennes**



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2011 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 la CEI ou du Comité national de la CEI du pays du demandeur.

Si vous avez des questions sur le copyright de la CEI ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de la CEI de votre pays de résidence.

IEC Central Office
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland
Email: inmail@iec.ch
Web: 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.

- Catalogue of IEC publications: www.iec.ch/searchpub

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 It also gives information on projects, withdrawn and replaced publications.

- IEC Just Published: www.iec.ch/online_news/justpub

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

- Electropedia: www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing more than 20 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary online.

- Customer Service Centre: www.iec.ch/webstore/custserv

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please visit the Customer Service Centre FAQ or contact us:

Email: csc@iec.ch

Tel.: +41 22 919 02 11

Fax: +41 22 919 03 00

A propos de la CEI

La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) 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 CEI

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

- Catalogue des publications de la CEI: www.iec.ch/searchpub/cur_fut-f.htm

Le Catalogue en-ligne de la CEI vous permet d'effectuer des recherches en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...). Il donne aussi des informations sur les projets et les publications retirées ou remplacées.

- Just Published CEI: www.iec.ch/online_news/justpub

Restez informé sur les nouvelles publications de la CEI. Just Published détaille deux fois par mois les nouvelles publications parues. Disponible en-ligne et aussi par email.

- Electropedia: www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne au monde de termes électroniques et électriques. Il contient plus de 20 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans les langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International en ligne.

- Service Clients: www.iec.ch/webstore/custserv/custserv_entry-f.htm

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions, visitez le FAQ du Service clients ou contactez-nous:

Email: csc@iec.ch

Tél.: +41 22 919 02 11

Fax: +41 22 919 03 00

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Power transformers –
Part 16: Transformers for wind turbine applications**

**Transformateurs de puissance –
Partie 16: Transformateurs pour applications éoliennes**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX

W

ICS 29.180

ISBN 978-2-88912-670-5

CONTENTS

FOREWORD.....	4
INTRODUCTION.....	6
1 Scope.....	7
2 Normative references	7
3 Terms and definitions	8
4 Service conditions	8
4.1 Normal service conditions	8
4.2 Altitude.....	8
4.3 Temperature of cooling air.....	8
4.4 Content of harmonic currents in the transformer	9
4.5 Wave-shape of supply voltage	9
4.6 Transient over and under voltages	9
4.7 Humidity and salinity	10
4.8 Special electrical and environmental conditions around the transformer	10
4.9 Level of vibration	11
4.10 Provision for unusual service conditions for transformers for wind turbine applications	11
4.11 Transportation and storage conditions	11
4.12 Corrosion protection	11
5 Electrical characteristics.....	11
5.1 Rated power.....	11
5.2 Highest voltage for equipment.....	11
5.3 Tappings	12
5.4 Connection group	12
5.5 Dimensioning of neutral terminal	12
5.6 Short circuit impedance.....	12
5.7 Insulation levels for high voltage and low voltage windings.....	12
5.8 Temperature rise guaranteed at rated conditions	12
5.9 Overload capability.....	13
5.10 Inrush current.....	13
5.11 Ability to withstand short circuit	13
5.12 Operation with forced cooling	13
6 Rating plate.....	13
7 Tests.....	13
7.1 List and classification of tests (routine, type and special tests)	13
7.2 Routine tests	13
7.3 Type tests	14
7.4 Special tests	14
7.4.1 General	14
7.4.2 Chopped wave test	14
7.4.3 Electrical resonance frequency test	14
7.4.4 Climatic tests.....	14
7.4.5 Environmental test E3	14
7.4.6 Fire behavior test	15
Annex A (informative) Calculation method and tables	16
Bibliography.....	36

Figure A.1 – Heat dissipation in a natural ventilated room.....	17
Figure A.2 – Schematic diagram of power frequency current injection apparatus	30
Figure A.3 – Switched transformer winding voltage responses with capacitor injection.....	31
Figure A.4 – HV Injection test figure	32
Figure A.5 – Example of measurement device	33
Table 1 – Insulation levels	10
Table A.1 – Impact of harmonics content on liquid-immersed transformer losses	23
Table A.2 – Impact of harmonics content on dry type transformers losses	26
Table A.3 – Example of voltage harmonic order	29

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60076-16:2011

Withd 2011

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

POWER TRANSFORMERS –**Part 16: Transformers for wind turbine applications****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 60076-16 has been prepared by IEC technical committee 14: Power transformers.

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

FDIS	Report on voting
14/690/FDIS	14/698/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 of the IEC 60076 series can be found, under the general title *Power transformers*, 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 web site under "<http://webstore.iec.ch>" in the data related to the specific publication. At this date, the publication will be

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

IMPORTANT – The 'colour inside' logo on the cover page of this publication indicates that it contains colours which are considered to be useful for the correct understanding of its contents. Users should therefore print this document using a colour printer.

INTRODUCTION

This part of IEC 60076 is intended to specify the additional requirements for the transformers for installation in wind turbine applications.

Wind turbines use generator step-up transformers to connect the turbines to a network. These transformers can be installed in the nacelle or in the tower or outside close to the wind turbine.

This standard covers transformers for wind turbine applications or wind farms where the constraints on transformers exceed the requirement of the present IEC 60076 series. The constraints are not often known or recognized by the transformer manufacturers, wind turbine manufacturers and operators and as a result the level of reliability of these transformers can be lower than those used for conventional applications.

The transformers for wind turbine applications are not included in the present list of IEC 60076 standard series.

The purpose of this standard is help to obtain the same level of reliability as transformers for more common applications.

This standard deals particularly with the effects of repeated high frequency transient over-voltages, electrical, environmental, thermal, loading, installation and maintenance conditions that are specific for wind turbines or wind farms.

On site measurements, investigations and observations in wind turbines have detected risks for some different kind of installations:

- repeated high frequency transient over or under voltages in the range of kHz;
- over and under frequency due to turbine control;
- values of over voltage;
- over voltage or under voltage coming from LV side;
- high level of transient over voltages due to switching;
- presence of partial discharge around the transformer;
- harmonic contents current and voltage;
- overloading under ambient conditions;
- fast transient overload;
- clearances not in compliance with the minimum prescribed;
- installation conditions and connections;
- restricted conditions of cooling;
- water droplets;
- humidity levels that exceed the maximum permissible values;
- salt and dust pollution and extreme climatic conditions;
- high levels of vibration;
- mechanical stresses.

Therefore it is necessary to take into account in the design of the transformer the constraints of this application, or to define some protective devices to protect the transformer. Additional or improved routine, type or special tests for these transformers have to be specified to be in compliance with the constraints on the network.

POWER TRANSFORMERS –

Part 16: Transformers for wind turbine applications

1 Scope

This part of IEC 60076 applies to dry-type and liquid-immersed transformers for rated power 100 kVA up to 10 000 kVA for wind turbine applications having a winding with highest voltage for equipment up to and including 36 kV and at least one winding operating at a voltage greater than 1,1 kV.

Transformers covered by this standard comply with the relevant requirements prescribed in the IEC 60076 standards.

2 Normative references

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

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

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

IEC 60076-3:2000, *Power transformers – Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air*

IEC 60076-5:2006, *Power transformers – Part 5: Ability to withstand short circuit*

IEC 60076-7:2005, *Power transformers – Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers*

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

IEC 60076-11:2004, *Power transformers – Part 11: Dry-type transformers*

IEC 60076-12:2008, *Power transformers – Part 12: Loading guide for dry-type power transformers*

IEC 60076-13:2006, *Power transformers – Part 13: Self-protected liquid-filled transformers*

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

IEC 61378-1:2011, *Converter transformers – Part 1: Transformers for industrial applications*

IEC 61378-3:2006, *Converter transformers – Part 3: Application guide*

IEC 61400-1:2005, *Wind turbines – Part 1: Design requirements*

ISO 12944 (all parts), *Paints and varnishes – Corrosion protection of steel structures by protective paint systems*

3 Terms and definitions

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

3.1

wind turbine transformer

generator step up transformer connecting the wind turbine to the power collection network of the wind farm

3.2

tower

part of the supporting structure of wind turbine on top of which the nacelle with generator and other equipments are located

3.3

nacelle

housing that contains the drive-train and other elements on top of a horizontal-axis wind turbine tower

4 Service conditions

4.1 Normal service conditions

Unless otherwise stated in this standard, the service conditions in IEC 60076-11 and IEC 60076-1 apply.

4.2 Altitude

IEC 60076 series applies.

4.3 Temperature of cooling air

The installation of transformers inside an enclosure without active cooling systems increases the transformer temperature.

The purchaser shall specify the maximum cooling air temperatures if they are different from those stated in IEC 60076-2.

The transformer shall be designed according to real ambient temperatures and installation real conditions as described by the purchaser at enquiry stage.

Clause A.1 provides considerations for transformers installed in a naturally ventilated area like at the rear of the nacelle or in a separate enclosure installed outside the tower and equipped with air inlet and outlet.

In case of transformer installed in the tower or in an enclosure where natural ventilation is not provided the formula in A.1 is not applicable. For transformers operating under these conditions, the effects of air inlet and outlet, cooling conditions, efficiency of air cooling and ventilation shall be considered.

The purchaser shall prescribe the air ambient temperature and air flow inside the tower at the enquiry stage. If no temperature or air flow is specified, an internal ambient temperature inside the tower of 10 K higher than external temperature shall be assumed and not limited air circulation around the transformers.

The effect of external direct solar radiation is not taken into account at the design stage. This can increase the temperature of transformers parts and therefore information should be given by purchaser at enquiry time.

4.4 Content of harmonic currents in the transformer

At the enquiry stage the purchaser shall specify the magnitude and frequency of all harmonic currents supplied to the transformer. The manufacturer shall take the losses caused by these harmonic currents into account in the transformer design to prevent that the winding and liquid temperature rises exceed the permissible limits.

A method to calculate the impact of the harmonic currents on the design of the transformer is given in A.2.

The transformer shall be designed to take into account the increased rating required due to the harmonic currents. The temperature rise test shall be carried out with the equivalent rated power due to the harmonics defined in A.2. The result of the test shall be in compliance with temperature limits guaranteed for the transformer and related to the transformer insulation thermal class.

4.5 Wave-shape of supply voltage

Within the prescribed value of U_m a transformer shall be capable of continuous service at full load without damage under conditions of 'overfluxing' where the ratio of voltage over frequency exceeds the corresponding ratio at rated voltage and rated frequency according to IEC 60076-1.

The wind turbine manufacturer shall state at enquiry stage the maximum ratio between the voltage and the frequency. The transformer manufacturer shall take into account this value in the design of the transformer.

The purchaser shall specify in the inquiry the magnitude and frequency of any harmonic voltages present in the supply. A method to calculate the impact of the voltage harmonics on the design of the transformer is given in A.3.

4.6 Transient over and under voltages

The risk of failures of a wind turbine transformer is higher due to the fact of repeated transient over and under voltages on each side on transformer.

Several solutions are available to increase the reliability of the transformer against these fast transient interactions:

- to evaluate the insulation level of the transformer and if necessary apply one or more of the following solutions. This can be done by modeling or measuring the system by high frequency resonance analysis. The resonance frequency test is a special test. The test method shall be agreed between manufacturer and purchaser. One method is described in A.4;
- to install standard protection technique such as surge arresters (HV, LV), or RC circuit or surge capacitor.

The choice of the lists 2 or 3 in Table 1 shall be the responsibility of the system engineer based on specific insulation co-ordination (IEC 60071-1 and -2) and risk assessment.

The list 3 covers transformers with increased ability to withstand repeated transient over voltages and increases the reliability of the transformer.

Table 1 – Insulation levels

Highest voltage for equipment U_m (rms) kV	Rated short duration separated source AC withstand voltage (RMS) kV	Rated lightning impulse withstand voltage (peak value) in kV	
		List 2	List 3
≤ 1,1	3	-	20
3,6	10	40	50
7,2	20	60	75
12	28	75	95
17,5	38	95	125
24	50	125	150
36	70	170	200

High frequency steep surges can be generated by switching operation on LV or HV side. These surges are transferred by cables to the terminals of the transformer. Transformers have different values of resonance frequency. See A.4.

If the high frequency steep surges generated by switching operation on LV and HV side coincide with the internal frequency of the winding, the result of these surges can resonate with the winding internal frequencies and cause higher electric stresses than the dielectric withstand strength of the windings

NOTE For $U_m \leq 1,1$ kV a.c. withstand voltage should have higher value as 10 kV.

4.7 Humidity and salinity

An abnormal level of humidity and salinity can lead to failures of dry type transformers and problems on open type bushings of liquid-immersed transformers or dry type transformers in enclosures.

The standard pollution levels for open type bushing for liquid-immersed transformers are defined in IEC 60815 series. There are also simulated rain tests defined in IEC 60137.

According to IEC 60076-11, the relative humidity in the test chamber shall be maintained above 93 % for environmental class E2 transformers. Salinity shall be such as the conductivity of the water in E2 test shall be in the range of 0,5 to 1,5 S/m.

If a dry type transformer shall operate under more severe conditions than corresponding to class E2 without a protective enclosure against humidity and salinity, the capability of the transformer design shall be demonstrated by the test according to class E3 described in 7.4.5 in this standard.

IEC 61400-1 states that relative humidity up to 95 % shall be taken into account as a normal environmental condition.

Higher values of humidity and salinity shall be given at enquiry stage.

4.8 Special electrical and environmental conditions around the transformer

IEC 60076-3 recommends general minimum clearances between transformer live parts and conductive parts of the wind turbine.

Any part of the wind turbine made of insulation material becomes conductive when moistened with rain water, salt water or other conductive liquids. Partial discharges in the surroundings of the transformer can decrease the dielectric strength of the air.

Therefore the clearances between these wind turbine parts and the live parts of the transformer shall not be less than the clearances recommended in IEC 60076-3.

The transformer manufacturer shall indicate the required minimum clearances on the outline drawing of the transformer and it is the responsibility of the purchaser to follow up that these requirements will be met.

4.9 Level of vibration

Vibrations of the structure where the transformer is to be installed shall be taken into account when designing the transformer and special consideration shall be given in the stress transferred to connection terminals.

The purchaser shall specify vibration spectrum at the enquiry stage. The procedure of vibration test if any should be agreed at enquiry stage between purchaser and manufacturer.

4.10 Provision for unusual service conditions for transformers for wind turbine applications

Provision for unusual service conditions are indicated in IEC 60076-1 for liquid-immersed transformers and IEC 60076-11 for dry type transformers.

4.11 Transportation and storage conditions

Transportation and storage conditions are indicated in IEC 60076-1 for liquid-immersed transformers and IEC 60076-11 for dry type transformers.

Storage conditions shall be included in maintenance and operation manuals and shall be taken into account by the purchaser.

4.12 Corrosion protection

Depending on the kind of the installation, the purchaser should choose a protection class defined in ISO 12944 or otherwise agreed between purchaser and manufacturer.

5 Electrical characteristics

5.1 Rated power

The rated power shall be in accordance with 5.1 of IEC 60076-1.

The rated power S_r of the transformer is based on the fundamental frequency of the voltage U_1 and of the current I_1 . The rated power of a three phase transformer is therefore:

$$S_r = \sqrt{3} \times U_1 \times I_1$$

The temperature rise and the cooling requirements of the transformer shall be determined after allowance is made for any increased losses due to harmonics.

5.2 Highest voltage for equipment

The highest voltage for equipment shall be chosen in accordance with Clause 5 of IEC 60076-3:2000.

The wind turbine designer shall inform the transformer manufacturer of peak voltages, frequencies and durations of any transient and repeated over voltages (see also Table 1 of this standard).

Information about insulation coordination is described in IEC 60071-1 and IEC 60071-2.

5.3 Tappings

The requirements in Clause 5 of IEC 60076-1:2011 apply.

The preferred tapping range if any is either:

- +5 % to –5 % in steps of 2,5 %,
- or
- +5 % to –5 % in steps of 5 %.

Tapping selection shall be made by means of off-circuit bolted links or an off-circuit tap changer.

5.4 Connection group

Unless otherwise specified by the purchaser, transformer connections shall be Dyn with clock hour figure 5 or 11 in accordance with Clause 7 of IEC 60076-1:2011.

5.5 Dimensioning of neutral terminal

The neutral terminal shall be capable of carrying full phase rated current unless otherwise specified by the purchaser.

5.6 Short circuit impedance

For general purpose the impedance voltage shall be in accordance with IEC 60076-5.

For auxiliary windings when the combined impedance voltage of the tertiary winding and the system result in short circuit current levels for which the transformer cannot feasibly or economically be designed to withstand, the manufacturer and the purchaser shall mutually agree on the maximum allowed over current. In this case, provision should be made by the purchaser to limit the over current to the maximum value determined by the manufacturer and stated on the rating plate.

5.7 Insulation levels for high voltage and low voltage windings

The selected insulation level for the high voltage and low voltage windings shall be in accordance with Table 1 of this standard.

5.8 Temperature rise guaranteed at rated conditions

The design of the transformer shall be in accordance with the operating conditions (harmonic contents, ambient temperature) stated by the purchaser at the enquiry stage.

The guaranteed temperature rise shall take into account the additional losses due to harmonics if specified, which increase eddy losses and stray losses in the windings and structural/frame parts.

If no harmonics are specified at the design stage but the actual real load current in service contains harmonics, the load on the transformer may need to be reduced to prevent the transformer temperature rises exceed the guaranteed limits.

Examples of calculations of the impact of harmonic currents are given in A.2.

5.9 Overload capability

The loading guides for liquid-immersed transformers in IEC 60076-7 and for dry type transformers in IEC 60076-12 shall apply.

5.10 Inrush current

Due to frequent energizing of the transformers during wind farm operation, transformers are frequently exposed to mechanical and thermal effects of inrush currents.

Frequency of energisation (number of energisation per year) shall be given at enquiry stage. Unless otherwise specified, switching is done on the HV (grid) side. The method of switching and synchronization shall be described in case of generator side energisation.

System inrush current limitations (maximum value, duration) shall be given at enquiry stage by the purchaser.

5.11 Ability to withstand short circuit

Transformers shall fulfill the requirements in IEC 60076-5. If the purchaser requires a test to demonstrate this fulfillment, this test shall be stated in the contract.

5.12 Operation with forced cooling

When additional cooling by means of fans or pumps is provided, the nominal power rating with and without forced cooling shall be subject to agreement between purchaser and manufacturer.

The rating plate shall indicate both the power rating without forced cooling and the maximum power rating with forced cooling.

NOTE In case of forced cooling, the back-to-back method to carry out the temperature rise test for the transformer is preferred and is subject to agreement between manufacturer and purchaser at enquiry stage. Temperatures measured by the back-to-back tests correspond more closely to those obtained in practice during normal operation.

6 Rating plate

See IEC 60076-1 and IEC 60076-11.

7 Tests

7.1 List and classification of tests (routine, type and special tests)

See IEC 60076-1 and IEC 60076-11.

7.2 Routine tests

Tests described in IEC 60076-1 for liquid-immersed transformers and IEC 60076-11 for dry type transformers apply.

NOTE Impulse test for all transformers type and partial discharge tests for liquid-immersed transformers can be justified on each unit by agreement between purchaser and manufacturer at enquiry stage. See IEC 60076-13 for this kind of test cycle for partial discharge test on liquid-immersed transformers.

7.3 Type tests

Tests described in IEC 60076-1 for liquid-immersed transformers and IEC 60076-11 for dry type transformers shall apply.

Partial discharge for liquid-immersed transformers less 72,5 kV are not defined in IEC 60076-3 and consequently test condition of IEC 60076-13 shall apply.

NOTE Chopped wave test can be a part of type testing by agreement between purchaser and manufacturer at enquiry stage.

7.4 Special tests

7.4.1 General

Special tests shall be defined at enquiry stage by the purchaser.

7.4.2 Chopped wave test

The extension of the lightning impulse test to include impulses chopped on the tail as a special test is recommended after agreement at enquiry stage.

The peak value of the chopped impulse shall be 110 % of the specified full wave impulse (BIL).

Clause 14 of IEC 60076-3:2000 shall apply.

7.4.3 Electrical resonance frequency test

The method is described in A.4.

7.4.4 Climatic tests

IEC 60076-11 shall apply for dry type transformers.

7.4.5 Environmental test E3

The transformer shall be placed in a test chamber in which temperature and humidity are kept under control.

The volume of the chamber shall be at least five times that of the rectangular box circumscribing the transformer. The clearances from any part of the transformer to walls, ceiling and spraying nozzles shall be not less than the smallest phase-to-phase clearance between live parts of the transformer (see IEC 60076-3) and not less than 150 mm according to 26.3.1 of IEC 60076-11:2004.

The temperature of the air in the test chamber shall be such as to ensure condensation on the transformer.

The humidity in the chamber shall be maintained above 95 %. This may be achieved by periodically or continuously atomizing a suitable amount of water.

The conductivity of the water shall be in the range of 3,6 S/m to 4 S/m.

The position of the mechanical atomizers shall be chosen in such a way that the transformer is not directly sprayed.

The transformer shall be kept in air having a relative humidity above 95 % for not less than 6 h, without being energized.

Within 5 min thereafter, the transformer shall be submitted to a test with induced voltage as follows:

- a) transformers with windings intended for connection to a system which are solidly earthed or earthed through a low impedance shall be energised at a voltage of 1,1 times the rated voltage for a period of 15 min;
- b) transformers with windings intended for connection to systems which are isolated or earthed through considerable impedance shall be submitted to a test with induced voltage for 3 successive periods of 5 min. During the test, each high voltage terminal in turn shall be connected to earth and a voltage of 1,1 times the rated voltage shall be applied between the other terminals and earth. The three-phase test can be replaced by single-phase tests with the two non-earthed phase terminals being interconnected.

Preferably the dielectric test should be performed in test chamber.

During the voltage application, no flash over shall occur, and visual inspection shall not show any serious tracking.

If no information in respect of test condition a) or b) is available, test b) should be performed.

7.4.6 Fire behavior test

IEC 60076-11 shall apply for dry type transformers.

Liquids for immersed transformers are described in IEC 61100.

Annex A (informative)

Calculation method and tables

A.1 Cooling of transformer in a naturally ventilated room

A.1.1 Assumptions

The room is cooled by naturally air circulation therefore:

Q_{AF} is the heat dissipation by forced air circulation (kW)

$$Q_{AF} = 0 \quad (A.1)$$

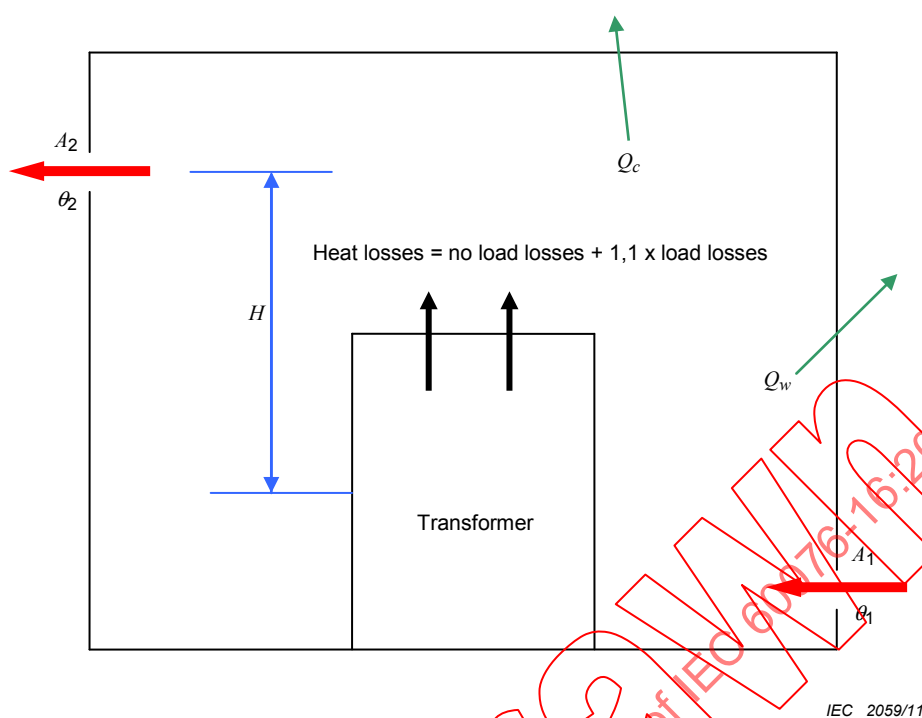
Q_c , Q_w are losses dissipated respectively through ceiling and the walls (kW)

$$Q_c = Q_w = 0 \quad (A.2)$$

In case of harmonics in load current special considerations shall be taken into account according A.2 or the transformer shall to be derated.

The heat dissipation through ceiling and the walls is generally low. This quantity is depending on the heat transfer coefficients of the materials of the walls and ceiling, the surface area of ceiling and the walls and difference between indoor and outdoor temperatures.

See following Figure A 1:

**Key**

- A_1 Air inlet effective cross section (m²)
- A_2 Air outlet effective cross section (m²)
- θ_1, θ_2 Air temperatures of inlet and outlet (°C)
- H Difference in height between mid outlet surface and mid height of transformer (m)
- Q_c, Q_w Losses dissipated respectively through ceiling and the walls (kW)

Figure A.1 – Heat dissipation in a natural ventilated room**A.1.2 Data for the calculation of ventilation**

Transformer produces losses that are dissipated in the room. This subclause gives the calculation of these losses.

$\Delta\theta_a$ is the air temperature rise (K):

$$\Delta\theta_a = \theta_2 - \theta_1 \text{ approximate value} = 15 \text{ K} \quad (\text{A.3})$$

NLL is the transformer no load losses (kW);

LL are the transformer nominal load losses at reference temperature (kW);

HL are the transformer heat losses in the room (kW);

$$\text{Heat losses} = \text{No load losses} + 1,1 \times \text{Load losses:}$$

$$HL = NLL + 1,1 \times LL \text{ (kW)} \quad (\text{A.4})$$

NOTE Value 15 K indicated above is common empirical value from the experience of the manufacturers.

A.1.3 Output

Losses produces by the transformers should be dissipated outside the room. This annex allows to give the surface of the air inlet.

A_1 is the air inlet effective cross section (m^2);

A_2 is the air outlet effective cross section (m^2):

$$A_2 / A_1 > 1,1 \text{ (minimum 10 \% more)} \quad (\text{A.5})$$

Q_{tot} is the heat dissipation in the transformer's room (kW):

$$Q_{\text{tot}} = Q_{\text{nac}} + Q_{\text{wc}} + Q_{\text{AF}} \text{ (kW)} \quad (\text{A.6})$$

Q_{nac} is the dissipation by natural air circulation (kW):

$$Q_{\text{nac}} = 0,1 \times A_1 \times \sqrt{H \Delta \theta_a^3} \text{ (kW)} \quad (\text{A.7})$$

$\Delta \theta_a$ is the air temperature rise (K);

Q_{wc} is the heat dissipation through the walls and ceiling (kW):

$$Q_{\text{wc}} = Q_w + Q_c = 0 \text{ (see assumption)} \quad (\text{A.8})$$

Q_{AF} is the heat dissipation by forced air circulation (kW);

$Q_{\text{AF}} = 0$ (see assumption).

To assure a good ventilation of the room:

$$HL = Q_{\text{nac}} + Q_{\text{wc}} \text{ (kW)} \quad (\text{A.9})$$

The required air inlet section A_1 is then given by:

$$A_1 = \frac{HL}{0,1 \sqrt{H \Delta \theta_a^3}} \text{ (m}^2\text{)} \quad (\text{A.10})$$

Calculation of air outlet section A_2 :

See formula (A.5).

A.1.4 Numerical application for a 1 000 kVA transformer

In this example, harmonics are not considered.

$$NLL = 2,3 \text{ kW}$$

$$LL = 11 \text{ kW}$$

The heat losses HL in the room are:

$$HL = NLL + 1,1 \times LL = 2,3 + 1,1 \times 11 = 14,4 \text{ kW}$$

$$H = 4,6 \text{ m}$$

Finally it comes:

$$A_1 = \frac{14,4}{0,1 \times \sqrt{4,6 \times 15^3}} = 1,155 \text{ m}^2$$

The effective cross section of the air inlet shall be at least of $1,155 \text{ m}^2$ to assure a correct cooling of the transformer in its naturally ventilated room.

Calculation of air outlet section A_2 :

$$A_2 \text{ minimum} = 1,1 \times 1,155 = 1,271 \text{ (m}^2\text{)}$$

The effect of transformer installed in a natural ventilated room is increasing temperature rises of the transformer by approximately half of air increased temperature between inlet and outlet (IEC 62271-202).

A.2 Determination of the power rating of a transformer loaded with non-sinusoidal currents

A.2.1 Transformer load losses

The transformer losses are of two types:

- direct losses (Ohmic losses) = $I^2 \times R$ (W); (A.10)
- additional losses ν are equal to eddy losses + stray losses.

The stray losses and eddy losses definitions are as in IEC 60076-8 and IEC 61378-1. Two frequencies method for separating stray losses and eddy losses by measurement is stated in IEC 61378-3.

A.2.2 Eddy losses (e_1)

Losses due to electromagnetic flux in the winding.

e_1 are eddy losses per unit for considered winding.

A.2.3 Load losses (LI)

Load losses (LI) for a considered winding at the reference temperature.

$$LI = R \times I^2 \times (1 + e_1) \text{ (W)} \quad (\text{A.11})$$

A.2.4 Stray losses (s_i)

Losses due to electromagnetic flux in clamps, cover, tank and other metallic parts.

A.2.5 Total load losses (TI)

The transformer total load losses TI are given by:

$$TI = R_1 \times I_1^2 \times (1 + e_1) + R_2 \times I_2^2 \times (1 + e_2) + S_i \text{ (W)} \quad (\text{A.12})$$

A.2.6 Harmonics

The losses of a transformer loaded with non sinusoidal currents depend on the frequency of each harmonic present in the current and its RMS value.

The total losses of the transformer at rated current change when the current contains harmonic content instead of a simple sinusoidal shape.

A transformer designed without special care concerning harmonic content of its current must be derated.

Harmonic components are represented by a periodic wave having a frequency that is an integral multiple of the fundamental frequency.

Harmonics are designated by their harmonic number or multiple of the fundamental frequency.

Harmonic with a frequency of 250 Hz is called the 5th harmonic (5 times the fundamental harmonic) with a fundamental frequency of 50 Hz for example.

Harmonics superimpose themselves on the fundamental wave form, distorting it and changing its magnitude.

Harmonic currents are generated when a non linear load is connected to the secondary of the transformer (examples: convertors, electronic equipment).

The problems caused by harmonic currents are: increased losses and overheating in the transformer, eddy losses are of most and stray losses are of the less concern when harmonic currents are present.

The eddy losses increase with the square of the frequency.

Due to these physical reasons (increased losses and overheating) the harmonic spectrum must be known before designing or sent to the transformer manufacturer to determine the ability to withstand such harmonics.

A.2.7 Eddy losses due to harmonic currents

A.2.7.1 RMS current calculation: I_{rms}

The root mean square (RMS) of current I_{rms} supplying a non sinusoidal load is:

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h=n} I_h^2} \text{ (A)} \quad (\text{A.13})$$

where

h is the current harmonic order;

I_h is the magnitude of the harmonic h (A).

A.2.7.2 Eddy losses calculation

The eddy current losses at a particular harmonic are given by:

$$P_h = P_f \times r_h^2 \times h^2 \quad (\text{W}) \quad (\text{A.14})$$

where

P_f are the eddy losses at the fundamental frequency f with the RMS of rated current I_r (W);

P_h are the eddy losses at harmonic h (W);

r_h is the ratio of the magnitude of the current of harmonic of order h over the fundamental current:

$$r_h = \frac{I_h}{I_1} \quad (\text{A.15})$$

The total eddy losses (P_{EL}) are given by the sum of the eddy losses for each individual harmonics.

$$P_{EL} = P_f \sum_{h=1}^{h=n} r_h^2 \times h^2 \quad (\text{W}) \quad (\text{A.16})$$

A.2.7.3 Stray losses

The stray losses at a particular harmonic h vary according to 6.2 of IEC 61378-1:2011 and Annex A.

$$SL_{ih} = r_h^2 \times h^{0,8}$$

where

r_h is the ratio of the magnitude of the current of harmonic of order h over the fundamental current.

Example:

Harmonic $h = 5$

Magnitude = 25,8 %

$$SL_{i5} = 0,258^2 \times 5^{0,8} = 0,2412$$

A.2.8 Harmonic eddy loss factor: K factor

The K factor is the ratio between total eddy losses due to all harmonic currents referred to eddy losses at fundamental current I_1 .

The eddy losses increase by K time its sinusoidal value when the transformer is loaded with non sinusoidal currents.

$$K \text{ factor} = \frac{P_{EL}}{P_f} \quad (\text{A.17})$$

A.2.9 Transformer total losses Ttl s in service with non sinusoidal current

Ttl s = no load losses (Nll) + total load losses with non sinusoidal current (Lls)

$$Ttl \text{ s} = Nll + \left[\left(I_{h1}^2 \times R_1 \times I_1^2 \right) \times (k_1 \times (1 + e_1)) \right] + \left[\left(I_{h2}^2 \times R_2 \times I_2^2 \right) \times (k_2 \times (1 + e_2)) \right] + S_i \quad (\text{A.18})$$

A.2.10 Top oil temperature rise with non sinusoidal currents TO_i for liquid-immersed transformers

See IEC 60076-7 for top oil temperature rise calculation:

$$TO_i = TO_{rx} \left(Ttl \text{ s} / Ttl \right)^{0,8} \quad (\text{A.19})$$

where

TO_i is the top oil temperature rise with non sinusoidal currents.

TO_r is the top oil temperature rise at rated current.

A.2.11 De-rating of the transformer

De-rating of the transformer shall be approximately as follows:

SrE = permissible loading for the transformer:

$$SrE = Sr \times (Ttl / Ttl \text{ s})^{0,5} \quad (\text{A.20})$$

Sr is the nominal load of the transformer (kVA).

The derating factor of transformer is $(Ttl / Ttl \text{ s})^{0,5}$.

A.2.12 Calculation examples of harmonic effects for liquid-immersed and dry type transformers

A.2.12.1 Equivalent currents due to harmonic contents

This example is for design purpose and to demonstrate the influence of the transformer design especially regarding the importance of quantity of the eddy losses. Eddy losses are depending on the design of the windings (dimension, raw material, impedance).

The magnitude of the harmonic is given according to IEC 61378 series to enhancement factors.

Two examples are given in the following Tables A.1 and A.2. Table A.1 is for a liquid-immersed transformer and Table A.2 is for a dry type transformer.

In the first table: RMS current is increased by 3,82 % above fundamental current, resulting in eddy losses increased by a K factor of 3,808 and stray losses by a factor of 1,308.

In the second table: RMS current is increased by 4,6 % above fundamental current, resulting in eddy losses increased by a K factor of 5,96 and stray losses by a factor of 1,41.

A.2.12.2 Example for a liquid-immersed transformer**A.2.12.2.1 Calculation of the permissible loading for the transformer****Table A.1 – Impact of harmonics content on liquid-immersed transformer losses**

Harmonic order (h)	Magnitude (%)	I_h/I_1	$(I_h/I_1)^2$ enhancement factor	Eddy losses enhancement factor	Stray losses enhancement factor
1	100	1	1	1,000	1,000 0
5	25,8	0,258	0,066 56	1,664	0,241 2
7	8,3	0,083	0,006 89	0,338	0,032 7
11	5,2	0,052	0,002 70	0,327	0,018 4
13	3,3	0,033	0,001 09	0,184	0,008 5
17	1,5	0,015	0,000 23	0,065	0,002 2
19	1,4	0,014	0,000 20	0,071	0,002 1
23	0,9	0,009	0,000 08	0,043	0,001 0
25	0,8	0,008	0,000 06	0,040	0,000 8
29	0,7	0,007	0,000 05	0,041	0,000 7
31	0,6	0,006	0,000 04	0,035	0,000 6

	Σ	1,077 9	3,808	1,308
RMS current	1,038 2	THD is the total harmonic distortion rate (%)		
THD	27,91 %			

THD according to IEC60076-1:2011,3.13.2

$$I_r^2 = \sqrt{\sum_{h=1}^{h=n} I_h^2}$$

$$I_r^2 = 1,077 9$$

$$K \text{ factor} = \frac{P_{EL}}{P_f} = 3,808$$

This calculation below is done with the coefficient calculated in Table A.1.

Rated power = 1 000 kVA

No load losses = 1 100 W

Load losses at 75 °C = 10 456 W

Frequency = 50 Hz

Rated top oil temperature rise = 60 K

Mean winding temperature rise = 65 K

Low voltage winding

Calculated losses at fundamental current

$\dot{P}_R$ losses at 75 °C = 4 000 W

Eddy losses (4 %) = 160 W

Total losses at 75 °C = 4 000 + 160 = 4 160 W

LV winding gradient = 18 K

Stray losses = 320 W

Calculated losses in service with non sinusoidal currents

$\dot{P}_R$ losses = $4\,000 \times (1,038\,2)^2 = 4\,312\text{ W}$

Eddy losses = $160 \times 3,808 = 609\text{ W}$

Total LV winding losses = $4\,312 + 609 = 4\,921\text{ W}$

Calculated LV winding gradient = $18 \times (4\,921/4\,160)^{0,5 \times 1,6} = 20,6\text{ K}$

Total in service stray losses = $320 \times 1,308 = 419\text{ W}$

High voltage winding

Calculated losses at fundamental current

$\dot{P}_R$ losses at 75 °C = 5 300 W

Eddy losses (12 %) = 636 W

Total losses at 75 °C = 5 300 + 636 = 5 936 W

HV winding gradient = 17 K

Stray losses = 40 W

Calculated losses in service with non sinusoidal currents

$\dot{P}_R$ losses = $5\,300 \times (1,038\,2)^2 = 5\,710\text{ W}$

Eddy losses = $636 \times 3,808 = 2\,421\text{ W}$

Total HV winding losses = $5\,710 + 2\,421 = 8\,131\text{ W}$

Calculated HV winding gradient = $17 \times (8\,131/5\,936)^{0,5 \times 1,6} = 21,9\text{ K}$

Total in service stray losses = $40 \times 1,308 = 52 \text{ W}$

Transformer total losses (Ttl) at fundamental current

Ttl = no load losses (NLI) + total load losses (LI)

$Ttl = 1\,100 + 4\,000 + 160 + 320 + 5\,300 + 636 + 40 = 11\,556 \text{ W}$

Transformer Total losses Ttl s in service with non sinusoidal current

$Ttl_s = 1\,100 + 4\,312 + 609 + 419 + 5\,710 + 2\,421 + 52 = 14\,623 \text{ W}$

pu increased top oil temperature rise with non sinusoidal currents

$TOi / Tor = (14\,623/11\,556)^{0,8} = 1,21 (+21 \%)$

Derating of the transformer shall be approximately:

Permissible loading for the transformer = Rated power $\times (11\,556/14\,623)^{0,5}$

Permissible loading for the transformer = Rated power $\times 0,89$

Derating of the transformer shall be approximately 11 %.

A.2.12.2.2 Conclusion

The 1 000 kVA transformer taken as an example is not appropriate for the service described and

- transformer shall be designed with reduced winding temperatures and top oil temperature rises,
- or
- purchaser has to select a transformer with a higher rated power (e.g. 1 000/0,89 kVA),
- or
- the transformer rated power is not adequate for such load profile and the user shall reduce transformer loading by a factor of 0,89.

NOTE In the case where the (ohmic and eddy) losses are known in both LV and HV windings, then the specific losses of the considered winding should be considered for an accuracy value of derating based on winding hot spot.

A.2.12.3 Example for a dry type transformer

A.2.12.3.1 Calculation of the permissible loading of the transformer

Table A.2 – Impact of harmonics content on dry type transformers losses

Harmonic order (h)	Magnitude (%)	I_h/I_1	$(I_h/I_1)^2$ enhancement factor	Eddy losses enhancement factor	Stray losses enhancement factor
1	100	1	1	1,000	1,000 0
5	26,2	0,262	0,068 64	1,716	0,248 8
7	11,0	0,110	0,012 10	0,593	0,057 4
11	8,1	0,081	0,006 56	0,794	0,044 7
13	5,8	0,058	0,003 36	0,569	0,026 2
17	4,2	0,042	0,001 76	0,510	0,017 0
19	2,6	0,026	0,000 68	0,244	0,007 1
23	1,9	0,019	0,000 36	0,191	0,004 4
25	1,6	0,016	0,000 26	0,160	0,003 4
29	1,2	0,012	0,000 14	0,121	0,002 1
31	0,8	0,008	0,000 06	0,062	0,001 0

	Σ	1,093 9	5,960	1,412
RMS current	1,046	THD is the total harmonic distortion rate (%)		
THD	30,65 %			

THD according to IEC 60076-1:2011, 3.13.2

Calculation of the equivalent current

$$I_r^2 = \sqrt{\sum_{h=1}^{h=n} I_h^2}$$

$$I_r^2 = 1,093 9$$

$$K \text{ factor} = \frac{P_{EL}}{P_f} = 5,960$$

Rated power = 1 000 kVA

No load losses = 2 300 W

Load losses at 120 °C = 11 000 W

Frequency = 50 Hz

Mean winding temperature rise = 100 K

Low voltage windingCalculated losses at fundamental current

$$\dot{P}_R \text{ losses at } 120\text{ }^{\circ}\text{C} = 4\ 100\text{ W}$$

$$\text{Eddy losses (2,9 \%)} = 120\text{ W}$$

$$\text{Total losses at } 120\text{ }^{\circ}\text{C} = 4\ 100 + 120 = 4\ 220\text{ W}$$

$$\text{LV winding gradient} = 100\text{ K}$$

$$\text{Stray losses} = 320\text{ W}$$

Calculated losses in service with non sinusoidal currents

$$\dot{P}_R \text{ losses} = 4\ 100 \times (1,046)^2 = 4\ 485\text{ W}$$

$$\text{Eddy losses} = 120 \times 5,959 = 715\text{ W}$$

$$\text{Total LV winding losses} = 4\ 485 + 715 = 5\ 200\text{ W}$$

$$\text{Calculated LV winding gradient} = 100 \times (5\ 200 / 4\ 220)^{0,5 \times 1,6} = 118,1\text{ K}$$

$$\text{Total in service stray losses} = 320 \times 1,412 = 452\text{ W}$$

High voltage windingCalculated losses at fundamental current

$$\dot{P}_R \text{ losses at } 120\text{ }^{\circ}\text{C} = 6\ 000\text{ W}$$

$$\text{Eddy losses (7,5 \%)} = 450\text{ W}$$

$$\text{Total losses at } 120\text{ }^{\circ}\text{C} = 6\ 000 + 450 = 6\ 450\text{ W}$$

$$\text{HV winding gradient} = 100\text{ K}$$

Calculated losses in service with non sinusoidal currents

$$\dot{P}_R \text{ losses} = 6\ 000 \times (1,046)^2 = 6\ 563\text{ W}$$

$$\text{Eddy losses} = 450 \times 5,959 = 2\ 682\text{ W}$$

$$\text{Total HV winding losses} = 6\ 563 + 2\ 682 = 9\ 245\text{ W}$$

$$\text{Calculated HV winding gradient} = 100 \times (9\ 245 / 6\ 450)^{0,5 \times 1,6} = 133,4\text{ K}$$

Transformer total losses (T_{tl}) at fundamental current

$$T_{tl} = \text{no load losses (} N_{ll} \text{)} + \text{total load losses (} L_{ll} \text{)}$$

$$T_{tl} = 2\,300 + 4\,100 + 123 + 320 + 6\,000 + 450 = 13\,293 \text{ W}$$

Transformer total losses T_{tl} s in service with non sinusoidal currents

$$T_{tl} s = 2\,300 + 4\,485 + 715 + 452 + 6\,563 + 2\,682 = 17\,197 \text{ W}$$

Derating of transformer shall be approximately:

$$\text{Permissible loading for the transformer} = \text{Rated power} \times (13\,293 / 17\,197)^{0,5}$$

$$\text{Permissible loading for the transformer} = \text{Rated power} \times 0,88$$

Derating of transformer shall be approximately 12 %.

A.2.12.3.2 Conclusion

The 1 000 kVA transformer taken as example is not appropriate for the service described and

- transformer shall be designed with reduced winding temperatures,
- or
- purchaser has to select a transformer with a higher rated power (eg 1 000/0,88 kVA),
- or
- the transformer rated power is not adequate for such load profile and the user shall reduce transformer loading by a factor of 0,88.

A.3 Effects of voltage harmonics

The effect of this voltage distortion leads to an increasing of:

- magnetic flux density;
- no load losses,
- no load current,
- noise level;
- magnetic core temperature;

B_h: Flux density corresponding to harmonic *h* (T)

B_n: Flux density at nominal voltage (T)

V_h: Voltage harmonic components (V)

V₁: Rated voltage. (V)

Table A.3 – Example of voltage harmonic order

Harmonic order (<i>h</i>)	Magnitude (%)	V _h /V ₁	(V _h /V ₁) ²	B _h /B _n	(B _h /B _n) ²
1	100	1	1	1	1
2	4	0,04	0,001 6	0,02	0,000 4
3	16	0,16	0,025 6	0,053 333	0,002 844 44
4	6	0,06	0,003 6	0,015	0,000 225
5	20	0,2	0,04	0,04	0,001 6
6	2	0,02	0,000 4	0,003 333	$1,1111 \times 10^{-5}$
7	11	0,11	0,012 1	0,015 714	0,000 246 94
8	2	0,02	0,000 4	0,002 5	0,000 006 25
9	5,8	0,058	0,003 36	0,006 444	$4,1531 \times 10^{-5}$
10	4,2	0,042	0,001 76	0,004 2	0,000 017 64
11	2,6	0,026	0,000 68	0,002 364	$5,5868 \times 10^{-6}$
13	1,9	0,019	0,000 36	0,001 462	$2,1361 \times 10^{-6}$
15	1,6	0,016	0,000 26	0,001 067	$1,1378 \times 10^{-6}$
29	1,2	0,012	0,000 14	0,000 414	$1,7122 \times 10^{-7}$
31	0,8	0,008	0,000 06	0,000 258	$6,6597 \times 10^{-8}$

	Σ	1,090 3		1,005 402 014
RMS voltage	1,044			
THD (voltage)	30,05 %			
RMS flux density	1,003			
THD (flux density)	7,35 %			

THD according to IEC60076-1:2011, 3.13.2.

RMS voltage is the square root of the sum of (V_h/V₁)².

RMS flux density is the square root of the sum of (B_h/B_n)².

The consequences of this high voltage distortion (THD <5 % is considered being practically sinusoidal) are not high as flux density is much less distorted than voltage.

Magnetic flux density is time integral of voltage and thus each harmonic flux density component is inversely relative to the harmonic order. The increase in RMS flux value is close to zero, therefore no correction is needed for the measured no load losses in regard to voltage harmonics.

The following parameters are also related to the design of the transformer under non sinusoidal voltage:

- no load current (especially under presence of DC component);
- noise level, (especially under presence of DC and second harmonics);
- magnetic core temperature (especially under presence of DC and second harmonics).

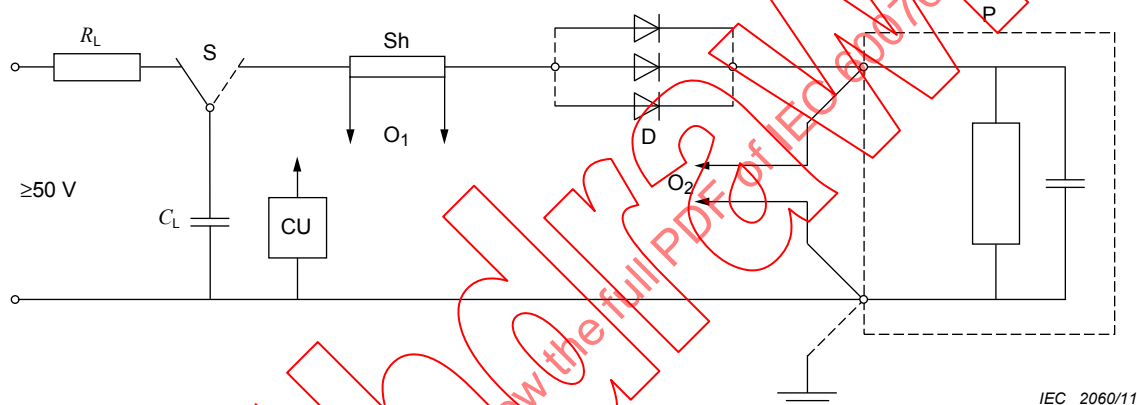
NOTE The harmonic frequency flux density components increase only eddy current part no load losses. With grain oriented core materials this part is approximately 50 % of total no load losses. The second part, hysteresis losses part, also approximately 50 % is influenced only by an increase in hysteresis loop area and peak flux density reached, which both in practical cases are not influenced.

A.4 Electrical resonance frequency measurement

A.4.1 Method of measurement

In order to determine the resonance natural frequency of a winding of a transformer, in a frequency range between 50 Hz and some 100 kHz, the measurement using the principle by capacitor current injection will be used. This method is also described in Annex F of IEC 62271-100:2008. During the measurement the other windings shall be short circuited.

The general diagram of current injection device, given by IEC 62271-100 is given in Figure A.2 below.



Key

R_L	Charging resistor
S	Switching relays
C_L	Source capacitance
Sh	Current measuring shunt
O ₁	Cathode-ray oscillograph, trace 1 recording magnitude and linearity of the current and checking the diode operation
O ₂	Cathode-ray oscillograph, trace 2 recording the response of the circuit
D	Parallel connection of up to 100 fast silicon switching diodes
P	Circuit the prospective TRV of which is to be measured
CU	Control unit to provide the sequence of operation

Figure A.2 – Schematic diagram of power frequency current injection apparatus

NOTE Other method like frequency sweep with respective continuous impedance measurements can be used. During the measurement other windings of transformer shall be short circuited.

A.4.2 Measurement of the resonance frequency of a transformer winding

The principle consists in discharging a capacitor in the winding of the transformer and to analyse the visual winding voltage response.

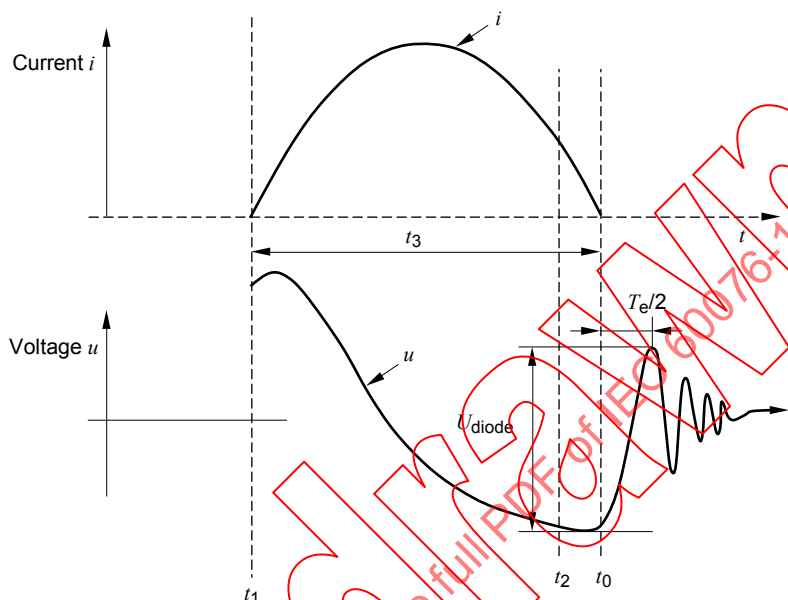
The capacitance discharge is followed by a damped oscillation, as no energy is feeded.

The frequency of this oscillation is the frequency of resonance of the transformer.

he following Figure A.3 shows the waveforms of current i and voltage u after the time where the current passes through 0 after switching the switching relay S.

The transient recovery voltage (TRV) is starting and the damped oscillation is illustrated.

The first half cycle $T_e/2$ of the TRV gives the frequency of resonance of the switched winding of the transformer.



IEC 2061/11

Key

t_0	Time where current passes through zero (beginning of the TRV oscillation)
t_1	Instant of switching of relays S
t_2	Tripping of the cathode-ray oscillograph
t_3	Duration of current through diode D
u	Voltage curve across the terminals of the circuit P
i	Waveform of the injected current
U_{diode}	Maximum voltage stressing of the diodes
$T_e/2$	Duration of half-cycle of TRV

Figure A.3 – Switched transformer winding voltage responses with capacitor injection

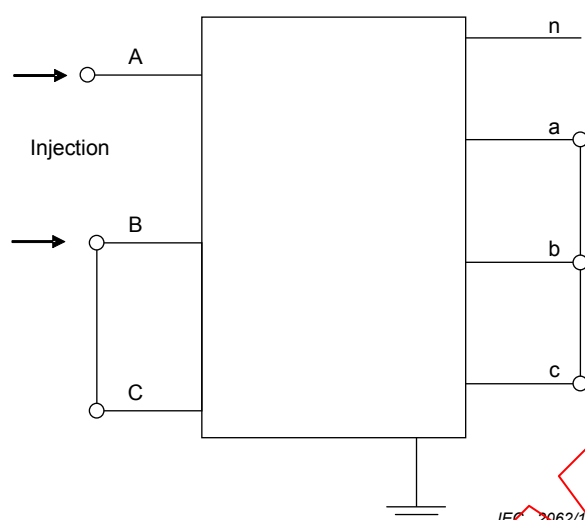
A.4.3 Practical aspects of the injection measurement method

A.4.3.1 Injection test figures

This measurement is carried out in single phase supply for three phase transformers.

Below is described a scheme to measure phase A.

In case of injection between A and B (then B and C connected together) with LV phases (a, b, c) short circuited and LV neutral not connected, the following way of injection given in Figure A.4 will be used:



Key

A,B,C High voltage terminals
a,b,c Low voltage terminals
n Is neutral terminal

Figure A.4 – HV Injection test figure

With the 3 LV phases short circuited, 3 different ways of HV injection should be considered:

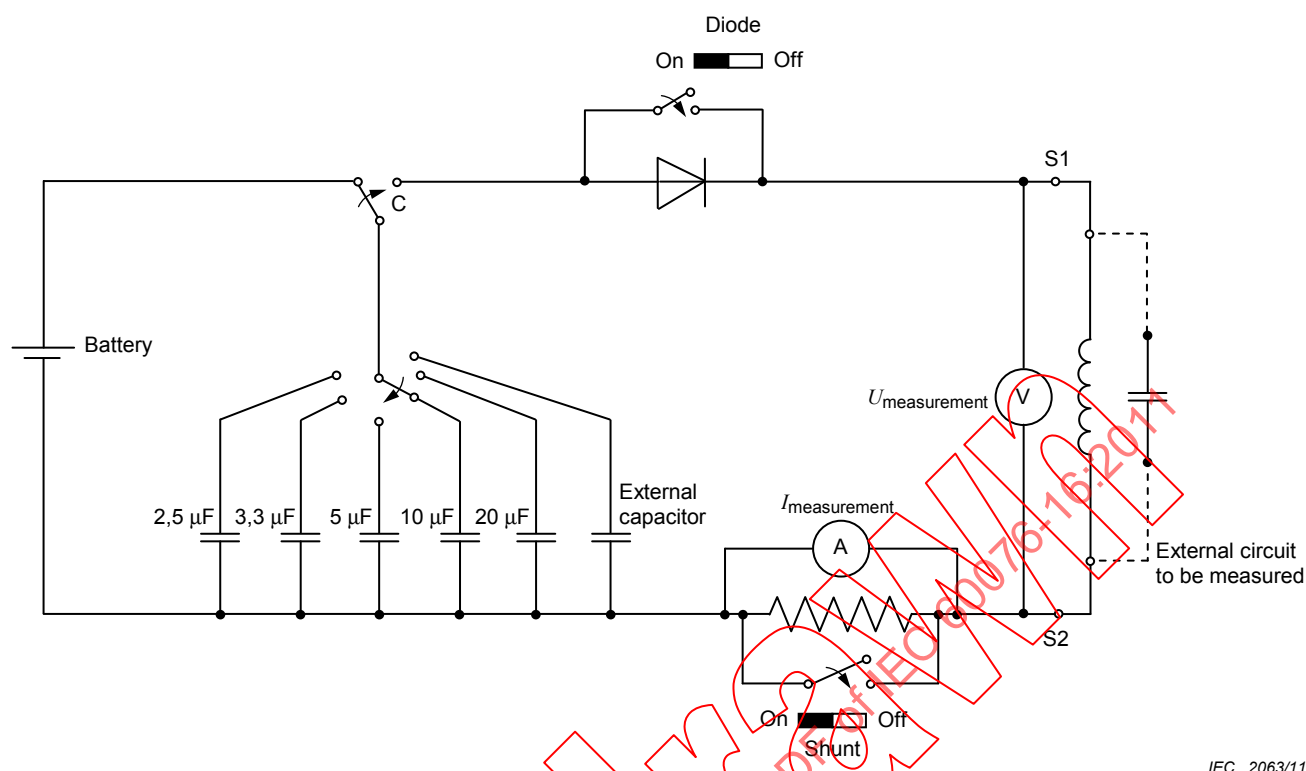
- HV phases B and C connected together and LV neutral connected to the ground of transformer. This case shall be used when the LV neutral is earthed during operation and gives the value of phase A.
- HV phases B and C connected together and connected to ground and LV neutral connected to the ground of transformer. This case is valid to see the difference in case of high voltage system ground fault and gives the value of phase A.
- HV phases B and C connected together and LV neutral not connected. This case shall be used when the LV neutral is not earthed during operation. Figure A.4 shows this kind of measurement configuration and gives the value of phase A.

For measurement of the other phases, rotation of the same sequences should be applied.

A.4.3.2 Example of measurement system

Figure A.5 is showing a practical measurement system with devices such as:

- battery supply, capacitors, driving diode, winding of transformer to be measured at the bushings;
- S1 and S2, current and voltage measuring and waveform visualisation devices;



IEC 2063/11

Figure A.5 – Example of measurement device

The recommendations are as follows:

- contact C with no bounces required;
- some diodes with reduced recovery time may be used and mounted in parallel;
- supply of the voltage visualisation device (oscilloscope) by battery or with an insulation transformer.

A.5 Table of symbols

Symbol	Meaning	Units
θ_1	Air inlet temperature	°C
θ_2	Air outlet temperature	°C
$\Delta\theta_a$	Air temperature rise between outlet and inlet	K
ν	Additional losses	W
A_1	Air inlet effective cross section	m ²
A_2	Air outlet effective cross section	m ²
AF	Air forced cooling	-
Bh	Flux density corresponding to harmonic h	T
Bn	Flux density at nominal voltage	T
E2 , E3	Environmental classes	-

Symbol	Meaning	Units
e_i	Eddy losses per unit for considered winding	-
f	Frequency	Hz
h	Current harmonic order	-
H	Difference in height between mid outlet surface and mid height of the transformer	m
HL	Heat losses of transformer	kW
HV	High voltage	kV
I	Load current circulating in the considered winding (see A.2)	A
I_{rms}	RMS current	A
I_1	Fundamental current	A
I_h	Magnitude of the harmonic h current	A
I_r	Rated current	A
K factor	Ratio between total eddy losses due to all harmonic currents referred to eddy losses at fundamental current	-
LL	Transformer nominal load losses at reference temperature	kW
Ll	Load losses for a considered winding at reference temperature	W
Lls	Transformer total load losses with non sinusoidal current	W
LV	Low voltage	V
NLL	Transformer no-load losses	kW
P_{EL}	Total eddy losses for each individual harmonics	W
P_f	Eddy losses at fundamental frequency with rated current	W
Ph	Eddy losses at harmonic h	W
Q_{AF}	Heat dissipation by forced air circulation	kW
Q_c, Q_w	Losses dissipated respectively through ceiling and the walls	kW
Q_{nac}	Dissipation power by natural air circulation	kW
Q_{tot}	Heat dissipation power in the transformer's room	kW
Q_{wc}	Heat dissipation through the walls and ceiling	kW
R, R_1, R_2	Winding resistance	Ω
rh	Ratio of magnitude of current harmonic h over fundamental current	-
S_i	Stray losses	W
SL_{ih}	Stray losses for harmonic of order h referred to stray losses at fundamental current I_1	-
S_r	Nominal load of the transformer	kVA
S_rE	Permissible loading for the transformer	kVA
THD	Total harmonic distortion rate	%
Tl	Transformer total load losses	W
TOi	Top oil temperature rise with non sinusoidal currents	K
Tor	Top oil temperature rise with rated current	K

Symbol	Meaning	Units
T_{tl}	Transformer total losses at fundamental current	W
T_{tls}	Transformer total losses in service with non sinusoidal current	W
U_m	Highest voltage for equipment	kV
V1	Rated voltage	kV
V _h	Voltage harmonic at order n expressed per unit	V

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60076-16:2011

Withd 2011

Bibliography

IEC 60071-1:2006, *Insulation co-ordination – Part 1: Definitions, principles and rules*

IEC 60071-2:1996, *Insulation co-ordination – Part 2: Application guide*

IEC 60137:2008, *Insulated bushings for alternating voltages above 1 000 V*

IEC 60270:2000, *High-voltage test techniques – Partial discharge measurements*

IEC 60815 (all parts), *Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions*

IEC 62271-100:2008, *High-voltage switchgear and controlgear – Part 100: Alternating-current circuit-breakers*

IEC 62271-202:2006, *High-voltage switchgear and controlgear – Part 202: High voltage/low voltage prefabricated substation*

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60076-16:2011

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60076-16:2017

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	40
INTRODUCTION.....	42
1 Domaine d'application	43
2 Références normatives	43
3 Termes et définitions	44
4 Conditions de service	44
4.1 Conditions normales de service	44
4.2 Altitude.....	44
4.3 Température de l'air de refroidissement	44
4.4 Contenu des courants harmoniques dans le transformateur.....	45
4.5 Forme d'onde de la tension d'alimentation.....	45
4.6 Surtensions et sous-tensions transitoires	45
4.7 Humidité et salinité.....	46
4.8 Conditions électriques et environnementales particulières autour du transformateur.....	47
4.9 Niveau de vibration	47
4.10 Dispositions pour conditions de service exceptionnelles pour les transformateurs destinés à des applications éoliennes	47
4.11 Conditions de transport et de stockage.....	47
4.12 Protection contre la corrosion	47
5 Caractéristiques électriques	47
5.1 Puissance assignée.....	47
5.2 Tension la plus élevée pour le matériel	48
5.3 Prises.....	48
5.4 Groupe de connexions.....	48
5.5 Dimensionnement de la borne neutre	48
5.6 Impédance de court-circuit	48
5.7 Niveaux d'isolement pour les enroulements haute tension et basse tension	49
5.8 Échauffement garanti aux conditions assignées	49
5.9 Capacité de surcharge	49
5.10 Courant d'enclenchement.....	49
5.11 Tenue au court-circuit.....	49
5.12 Fonctionnement avec refroidissement forcé.....	49
6 Plaque signalétique	50
7 Essais	50
7.1 Liste et classification des essais (essais individuels de série, de type et spéciaux)	50
7.2 Essais individuels de série	50
7.3 Essais de type.....	50
7.4 Essais spéciaux	50
7.4.1 Généralités.....	50
7.4.2 Essai d'onde coupée	50
7.4.3 Essai de fréquence de résonance électrique.....	50
7.4.4 Essais climatiques	50
7.4.5 Essai environnemental E3	50
7.4.6 Essai de comportement au feu	51
Annexe A (informative) Méthode et tableaux de calcul	52

Bibliographie.....	72
Figure A.1 – Dissipation thermique dans une pièce à ventilation naturelle	53
Figure A.2 – Schéma de l'appareil d'injection de courant à fréquence industrielle	66
Figure A.3 – Réponses en tension de l'enroulement sous tension du transformateur avec injection par condensateur.....	67
Figure A.4 – Figure d'essai d'injection HT	68
Figure A.5 – Exemple de dispositif de mesure	69
Tableau 1 – Niveaux d'isolement	46
Tableau A.1 – Impact du contenu harmonique sur les pertes d'un transformateur immergé	59
Tableau A.2 – Impact du contenu harmonique sur les pertes d'un transformateur de type sec	62
Tableau A.3 – Exemple de rang d'harmonique de tension	65

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE –

Partie 16: Transformateurs pour applications éoliennes

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de la CEI"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de la CEI intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de la CEI se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de la CEI. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que la CEI s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; la CEI ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de la CEI dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de la CEI et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) La CEI 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 la CEI. La CEI 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 la CEI, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de la CEI, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de la CEI ou de toute autre Publication de la CEI, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de la CEI peuvent faire l'objet de droits de brevet. La CEI 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 CEI 60076-16 a été établie par le comité d'études 14 de la CEI: Transformateurs de puissance.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
14/690/FDIS	14/698/RVD

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

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

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

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 la CEI sous "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives à la publication recherchée. A cette date, la publication sera

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

IMPORTANT – Le logo "colour inside" qui se trouve sur la page de couverture de cette publication indique qu'elle contient des couleurs qui sont considérées comme utiles à une bonne compréhension de son contenu. Les utilisateurs devraient, par conséquent, imprimer cette publication en utilisant une imprimante couleur.

INTRODUCTION

La présente partie de la CEI 60076 a pour objet de spécifier les exigences supplémentaires pour les transformateurs destinés à être installés dans des applications éoliennes.

Les éoliennes utilisent des transformateurs élévateurs de générateur pour connecter les turbines à un réseau. Ces transformateurs peuvent être installés dans la nacelle ou dans le mât ou à l'extérieur, à proximité de l'éolienne.

La présente norme traite des transformateurs pour applications éoliennes ou pour parcs éoliens, où les contraintes imposées sur les transformateurs dépassent les exigences de la présente série CEI 60076. Les contraintes ne sont souvent pas connues ni reconnues par les fabricants de transformateurs, les fabricants et les exploitants d'éoliennes et, de ce fait, le niveau de fiabilité de ces transformateurs peut être inférieur à celui des transformateurs utilisés pour des applications conventionnelles.

Les transformateurs pour applications éoliennes ne figurent pas dans la liste actuelle de la série de normes CEI 60076.

L'objectif de la présente norme est de contribuer à obtenir le même niveau de fiabilité que pour les transformateurs utilisés pour des applications plus courantes.

La présente norme traite en particulier des effets des surtensions transitoires répétées à haute fréquence, et des conditions électriques, environnementales, thermiques, de charge, d'installation et de maintenance, qui sont spécifiques aux éoliennes ou aux parcs éoliens.

Les mesures sur site, les recherches et les observations dans les éoliennes ont permis de détecter des risques pour certains types différents d'installations:

- surtensions ou sous-tensions transitoires répétées à haute fréquence, dans la gamme des kHz;
- sur-fréquence et sous-fréquence dues aux commandes de la turbine;
- valeurs de surtensions;
- surtension ou sous-tension provenant de la basse tension;
- niveau élevé de surtensions transitoires dues aux manœuvres;
- présence de décharges partielles autour du transformateur;
- contenus harmonique de courant et de tension;
- surcharge dans des conditions ambiantes;
- surcharge transitoire rapide;
- distances d'isolement non conformes aux valeurs minimales prescrites;
- conditions d'installation et connexions;
- conditions limitées de refroidissement;
- gouttes d'eau;
- niveaux d'humidité dépassant les valeurs maximales permises;
- pollution saline et par la poussière, et conditions climatiques extrêmes;
- niveaux élevés de vibrations;
- contraintes mécaniques.

Il est par conséquent nécessaire de prendre en compte les contraintes de cette application lors de la conception des transformateurs, ou de définir certains dispositifs de protection pour protéger le transformateur. Des essais individuels de série, de type ou spéciaux supplémentaires ou améliorés pour ces transformateurs doivent être spécifiés pour être conformes aux contraintes imposées sur le réseau.

TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE –

Partie 16: Transformateurs pour applications éoliennes

1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 60076 s'applique aux transformateurs de type sec et immergés dans un liquide, pour une puissance assignée comprise entre 100 kVA et 10 000 kVA, destinés à des applications éoliennes, ayant un enroulement avec une tension la plus élevée pour le matériel inférieure ou égale à 36 kV et au moins un enroulement fonctionnant à une tension supérieure à 1,1 kV.

Les transformateurs couverts par la présente norme sont conformes aux exigences applicables spécifiées dans la série CEI 60076.

2 Références normatives

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

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

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

CEI 60076-3:2000, *Transformateurs de puissance – Partie 3: Niveaux d'isolement, essais diélectriques et distances d'isolement dans l'air*

CEI 60076-5:2006, *Transformateurs de puissance – Partie 5: Tenue au court-circuit*

CEI 60076-7:2005, *Transformateurs de puissance – Partie 7: Guide de charge pour transformateurs immergés dans l'huile*

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

CEI 60076-11:2004, *Transformateurs de puissance – Partie 11: Transformateurs de type sec*

CEI 60076-12:2008, *Transformateurs de puissance – Partie 12: Guide de charge pour transformateurs de puissance de type sec*

CEI 60076-13:2006, *Transformateurs de puissance – Partie 13: Transformateurs auto-protégés immergés dans un liquide diélectrique*

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

CEI 61378-1:2011, *Converter transformers – Part 1: Transformers for industrial applications* (disponible en anglais seulement)

CEI 61378-3:2006, *Transformateurs de conversion – Partie 3: Guide d'application*

CEI 61400-1:2005, *Eoliennes – Partie 1: Exigences de conception*

ISO 12944 (toutes les parties), *Peintures et vernis – Anticorrosion des structures en acier par systèmes de protection de peinture*

3 Termes et définitions

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

3.1

transformateur d'éolienne

transformateur élévateur de générateur reliant l'éolienne au réseau de collecte de puissance du parc éolien

3.2

mât

partie de la structure de support d'une éolienne, au sommet de laquelle se situent la nacelle avec le générateur et d'autres matériels

3.3

nacelle

cellule contenant la transmission et d'autres éléments, placée au sommet du mât d'une éolienne à axe horizontal

4 Conditions de service

4.1 Conditions normales de service

Sauf spécification contraire dans la présente norme, les conditions de service de la CEI 60076-11 et de la CEI 60076-1 s'appliquent.

4.2 Altitude

La série CEI 60076 s'applique.

4.3 Température de l'air de refroidissement

L'installation des transformateurs à l'intérieur d'une enveloppe sans systèmes de refroidissement actif augmente la température du transformateur.

L'acheteur doit spécifier les températures maximales de l'air de refroidissement si elles sont différentes de celles indiquées dans la CEI 60076-2.

Le transformateur doit être conçu conformément aux conditions de températures ambiantes et d'installation réelles, tel que spécifié par l'acheteur au stade de l'appel d'offres.

L'Article A.1 donne les considérations à prendre en compte pour les transformateurs installés dans une zone naturellement ventilée, comme par exemple à l'arrière de la nacelle ou dans une enveloppe séparée, installée à l'extérieur du mât et munie d'une entrée et d'une sortie d'air.

Dans le cas d'un transformateur installé dans le mât ou dans une enveloppe sans ventilation naturelle, la formule de A.1 ne s'applique pas. Pour les transformateurs fonctionnant dans ces conditions, les effets de l'entrée et de la sortie d'air, les conditions de refroidissement, l'efficacité du refroidissement de l'air et de la ventilation, doivent être pris en compte.

L'acheteur doit spécifier la température de l'air ambiant et le débit d'air à l'intérieur du mât au stade de l'appel d'offres. Si aucune température ni aucun débit d'air ne sont spécifiés, une température ambiante à l'intérieur du mât de 10 K supérieure à la température à l'extérieur et aucune restriction de circulation d'air autour des transformateurs ne doivent être prises en compte.

L'effet du rayonnement solaire externe n'est pas pris en compte au stade de la conception. Ceci peut augmenter la température des parties du transformateur, il convient par conséquent que l'acheteur donne des informations au stade de l'appel d'offres.

4.4 Contenu des courants harmoniques dans le transformateur

L'acheteur doit spécifier dans l'appel d'offres l'amplitude et la fréquence de tous les courants harmoniques présents dans l'alimentation. Le fabricant doit prendre en compte les pertes provoquées par ces courants harmoniques lors de la conception du transformateur, afin d'empêcher que l'enroulement et les échauffements du liquide ne dépassent les limites admissibles.

Une méthode de calcul de l'impact des courants harmoniques sur la conception du transformateur est donnée en A.2.

Le transformateur doit être conçu pour prendre en compte l'augmentation de puissance requise en raison des courants harmoniques. L'essai d'échauffement doit être réalisé avec la puissance assignée équivalente tenant compte des harmoniques définis en A.2. Le résultat de l'essai doit être conforme aux limites de température garanties pour le transformateur et à la classe thermique d'isolation du transformateur.

4.5 Forme d'onde de la tension d'alimentation

Dans les limites de la valeur spécifiée de U_m , un transformateur doit être capable de fonctionner en continu à pleine charge sans dommages, dans des conditions de « surinduction », lorsque le rapport de la tension sur la fréquence dépasse le rapport correspondant à la tension assignée et à la fréquence assignée conformément à la CEI 60076-1.

Le fabricant de l'éolienne doit indiquer au stade de l'appel d'offres le rapport maximal entre la tension et la fréquence. Le fabricant du transformateur doit prendre en compte cette valeur lors de la conception du transformateur.

L'acheteur doit spécifier dans l'appel d'offres l'amplitude et la fréquence de toutes les tensions harmoniques présentes dans l'alimentation. Une méthode de calcul de l'impact des harmoniques de tension sur la conception du transformateur est donnée en A.3.

4.6 Surtensions et sous-tensions transitoires

Le risque de défaillance d'un transformateur d'éolienne est plus élevé en raison de surtensions et de sous-tensions transitoires répétées de chaque côté du transformateur.

Plusieurs solutions sont disponibles pour augmenter la fiabilité du transformateur face à ces transitoires rapides de tension:

- évaluer le niveau d'isolement du transformateur et, si nécessaire, appliquer une ou plusieurs des solutions suivantes. Ceci peut être réalisé en modélisant ou en mesurant le système par une analyse de la résonance haute fréquence. L'essai de fréquence de résonance est un essai spécial. La méthode d'essai doit faire l'objet d'un accord entre le fabricant et l'acheteur. Une méthode est décrite en A.4;
- installer une protection normalisée, comme par exemple des parafoudres (HT, BT) ou un circuit RC ou un condensateur de surtension.

Le choix des listes 2 ou 3 du Tableau 1 doit incomber à l'ingénieur système, et doit être basé sur la coordination de l'isolement spécifique (CEI 60071-1 et -2) et l'évaluation des risques.

La liste 3 couvre les transformateurs avec une aptitude accrue à résister aux surtensions transitoires répétées, ce qui augmente la fiabilité du transformateur.

Tableau 1 – Niveaux d'isolement

Tension la plus élevée pour le matériel U_m (efficace) en kV	Tension (efficace) alternative en kV de courte durée de tenue assignée de source séparée	Tension de tenue assignée au choc de foudre (valeur de crête) en kV	
		Liste 2	Liste 3
$\leq 1,1$	3	-	20
3,6	10	40	50
7,2	20	60	75
12	28	75	95
17,5	38	95	125
24	50	125	150
36	70	170	200

Des surtensions à haute fréquence à front raide peuvent être générées par une manœuvre de commutation côté BT ou HT. Ces surtensions sont transférées par les câbles aux bornes du transformateur. Les transformateurs ont différentes valeurs de fréquence de résonance. Voir A.4.

Si les surtensions à haute fréquence à front raide générées par une manœuvre de commutation côté BT et HT coïncident avec la fréquence interne de l'enroulement, le résultat de ces surtensions peut résonner avec les fréquences internes de l'enroulement et provoquer des contraintes électriques plus élevées que la tenue de rigidité diélectrique des enroulements.

NOTE Pour $U_m \leq 1,1$ kV, il convient que la valeur de la tension de tenue alternative soit supérieure, comme 10 kV.

4.7 Humidité et salinité

Un niveau anormal d'humidité et de salinité peut entraîner des défaillances de transformateurs de type sec et des problèmes sur les traversées de type ouvertes des transformateurs immergés ou des transformateurs de type sec en cellules.

Les niveaux de pollution normalisés pour les traversées de type ouvertes des transformateurs immergés dans un liquide sont définis dans la série CEI 60815. Il y a également des essais de pluie simulés définis dans la CEI 60137.

Conformément à la CEI 60076-11, l'humidité relative dans l'enceinte d'essai doit être maintenue au-dessus de 93 % pour les transformateurs de classe d'environnement E2. La salinité doit être telle que le niveau de conductivité de l'eau pour l'essai E2 doit être compris entre 0,5 et 1,5 S/m.

Si le transformateur de type sec doit fonctionner dans des conditions plus sévères que le niveau E2 sans cellule de protection contre l'humidité et la salinité, le transformateur doit être conçu pour un essai conformément à la classe E3 décrit dans le 7.4.5 de la présente norme.

La CEI 61400-1 spécifie que les valeurs de conditions d'environnement normales doivent prendre en compte une humidité relative allant jusqu'à 95 %.

Des valeurs d'humidité et de salinité plus élevées doivent être données au stade de l'appel d'offres.

4.8 Conditions électriques et environnementales particulières autour du transformateur

La CEI 60076-3 recommande des distances d'isolement générales minimales entre les parties actives du transformateur et les parties conductrices de l'éolienne.

Toute partie de l'éolienne réalisée en matériau isolant devient conductrice lorsqu'elle est humidifiée avec de l'eau de pluie, de l'eau salée ou tout autre liquide conducteur. Les décharges partielles dans l'environnement du transformateur peuvent diminuer la rigidité diélectrique de l'air.

Par conséquent, les distances d'isolement entre ces parties d'une éolienne et les parties actives du transformateur ne doivent pas être inférieures aux distances d'isolement recommandées dans la CEI 60076-3.

Le fabricant du transformateur doit indiquer les distances d'isolement minimales requises sur le plan général du transformateur et il incombe à l'acheteur de s'assurer que ces exigences seront satisfaites.

4.9 Niveau de vibration

Les vibrations de la structure sur laquelle le transformateur doit être installé doivent être prises en compte lors de la conception du transformateur et une attention particulière doit être accordée aux contraintes transférées aux bornes de connexion.

Le niveau du spectre de vibration doit être spécifié au stade de l'appel d'offres par l'acheteur. Il convient que la procédure de l'essai de vibration, s'il est réalisé, fasse l'objet d'un accord au stade de l'appel d'offres entre l'acheteur et le fabricant.

4.10 Dispositions pour conditions de service exceptionnelles pour les transformateurs destinés à des applications éoliennes

Les dispositions pour des conditions de service exceptionnelles sont indiquées dans la CEI 60076-1 pour les transformateurs immergés et dans la CEI 60076-11 pour les transformateurs de type sec.

4.11 Conditions de transport et de stockage

Les conditions de transport et de stockage sont indiquées dans la CEI 60076-1 pour les transformateurs immergés et dans la CEI 60076-11 pour les transformateurs de type sec.

Les conditions de stockage doivent être incluses dans les manuels de maintenance et de fonctionnement, et elles doivent être prises en compte par l'acheteur.

4.12 Protection contre la corrosion

Selon le type d'installation, il convient que l'acheteur choisisse une classe de protection définie dans l'ISO 12944 ou ayant sinon fait l'objet d'un accord entre l'acheteur et le fabricant.

5 Caractéristiques électriques

5.1 Puissance assignée

La puissance assignée doit être conforme au 5.1 de la CEI 60076-1.

La puissance assignée S_r du transformateur est fondée sur la fréquence fondamentale de la tension U_1 et du courant I_1 . La puissance assignée d'un transformateur triphasé est par conséquent:

$$S_r = \sqrt{3} \times U_1 \times I_1$$

Les exigences relatives à l'échauffement et au refroidissement du transformateur doivent être déterminées après la prise en compte d'un accroissement des pertes dues aux harmoniques.

5.2 Tension la plus élevée pour le matériel

La tension la plus élevée pour le matériel doit être choisie conformément à l'Article 5 de la CEI 60076-3:2000.

Le concepteur de l'éolienne doit informer le fabricant du transformateur des tensions de crête, des fréquences et des durées de toutes les surtensions transitoires répétées (voir aussi Tableau 1 de la présente norme).

Des informations concernant la coordination de l'isolement sont décrites dans la CEI 60071-1 et la CEI 60071-2.

5.3 Prises

Les exigences de l'Article 5 de la CEI 60076-1:2011 s'appliquent.

L'étendue préférentielle des plages de réglage est:

- +5 % à –5 % par pas de 2,5 %,
- ou
- +5 % à –5 % par pas de 5 %.

La sélection de prise doit être réalisée hors tension au moyen de connexions boulonnées ou d'un changeur de prise.

5.4 Groupe de connexions

Sauf spécification contraire de l'acheteur, les connexions du transformateur doivent être Dyn, avec un indice horaire de 5 ou 11, conformément à l'Article 7 de la CEI 60076-1:2011.

5.5 Dimensionnement de la borne neutre

La borne neutre doit pouvoir transporter la totalité du courant assigné de phase, sauf spécification contraire de l'acheteur.

5.6 Impédance de court-circuit

Pour l'usage général, la tension d'impédance doit être conforme à la CEI 60076-5.

Pour les enroulements auxiliaires, lorsque l'impédance combinée de l'enroulement tertiaire et du système entraîne des niveaux de courant de court-circuit pour lesquels le transformateur ne peut pas, soit physiquement, soit économiquement, être conçu, le fabricant et l'acheteur doivent se mettre d'accord mutuellement sur la surintensité maximale autorisée. Dans ce cas, il convient que l'acheteur limite la surintensité à la valeur maximale déterminée par le fabricant et indiquée sur la plaque signalétique.

5.7 Niveaux d'isolement pour les enroulements haute tension et basse tension

Le niveau d'isolement choisi pour les enroulements haute tension et basse tension doit être conforme au Tableau 1 de la présente norme.

5.8 Echauffement garanti aux conditions assignées

La conception du transformateur doit être conforme aux conditions de fonctionnement (contenu harmonique, température ambiante) données par l'acheteur au moment de l'appel d'offres.

L'échauffement garanti doit prendre en compte les pertes supplémentaires dues aux harmoniques si elles sont spécifiées, qui augmentent les pertes par courants de Foucault et les pertes parasites dans les enroulements et les parties de la structure/du châssis.

Si aucun harmonique n'est spécifié au stade de la conception, mais si le courant de charge réel en service comprend des harmoniques, il peut être nécessaire de réduire la charge sur le transformateur, afin d'empêcher que les échauffements du transformateur ne dépassent les limites garanties.

Des exemples de calculs de l'impact des courants harmoniques sont donnés en A.2.

5.9 Capacité de surcharge

Les guides de charge pour les transformateurs immergés de la CEI 60076-7 et les transformateurs de type sec de la CEI 60076-12 doivent s'appliquer.

5.10 Courant d'enclenchement

En raison de manœuvres fréquentes au cours du fonctionnement d'un parc éolien, les transformateurs sont fréquemment exposés aux effets mécaniques et thermiques des courants d'enclenchement.

La fréquence des manœuvres (nombre de manœuvres par an) doit être donnée au stade de l'appel d'offres. Sauf spécification contraire, l'enclenchement est réalisé côté HT (réseau). La méthode de commutation et de synchronisation doit être décrite en cas de manœuvre côté générateur.

Les limitations du réseau des courants d'enclenchement (valeur maximale, durée) doivent être données au stade de l'appel d'offres par l'acheteur.

5.11 Tenue au court-circuit

Les transformateurs doivent satisfaire aux exigences de la CEI 60076-5. Si l'acheteur exige un essai pour démontrer cette tenue, cet essai doit être indiqué dans le contrat.

5.12 Fonctionnement avec refroidissement forcé

Lorsqu'un refroidissement supplémentaire au moyen de ventilateurs ou de pompes est fourni, la puissance assignée nominale avec et sans refroidissement forcé doit faire l'objet d'un accord entre l'acheteur et le fabricant.

La plaque signalétique doit indiquer à la fois la puissance assignée sans refroidissement forcé et la puissance assignée maximale avec refroidissement forcé.

NOTE Dans le cas d'un refroidissement forcé, la méthode en opposition pour réaliser l'essai d'échauffement du transformateur est la méthode préférentielle, et est soumise à un accord entre le fabricant et l'acheteur, au stade de l'appel d'offres. Les températures mesurées par les essais en opposition correspondent davantage à celles obtenues en pratique au cours d'un fonctionnement normal.

6 Plaque signalétique

Voir la CEI 60076-1 et la CEI 60076-11.

7 Essais

7.1 Liste et classification des essais (essais individuels de série, de type et spéciaux)

Voir la CEI 60076-1 et la CEI 60076-11.

7.2 Essais individuels de série

Les essais décrits dans la CEI 60076-1 pour les transformateurs immergés et dans la CEI 60076-11 pour les transformateurs de type sec s'appliquent.

NOTE Un essai de choc pour tous les types de transformateur et des essais de décharges partielles pour les transformateurs immergés dans un liquide peuvent être justifiés sur chaque élément par accord entre l'acheteur et le fabricant au stade de l'appel d'offres. Voir la CEI 60076-13 pour ce type de cycle d'essai de décharges partielles sur les transformateurs immergés dans un liquide.

7.3 Essais de type

Les essais décrits dans la CEI 60076-1 pour les transformateurs immergés et dans la CEI 60076-11 pour les transformateurs de type sec doivent s'appliquer.

La CEI 60076-3 ne définit pas de décharge partielle pour les transformateurs immergés dans un liquide de moins de 72,5 kV, par conséquent la condition d'essai de la CEI 60076-13 doit s'appliquer.

NOTE Un essai d'onde coupée peut faire partie des essais de type par accord entre l'acheteur et le fabricant au stade de l'appel d'offres.

7.4 Essais spéciaux

7.4.1 Généralités

Des essais spéciaux doivent être définis au stade de l'appel d'offres par l'acheteur.

7.4.2 Essai d'onde coupée

L'extension de l'essai de choc de foudre comme un essai spécial en incluant des impulsions coupées sur la queue est recommandée après accord au stade de l'appel d'offres.

La valeur de crête du choc coupé doit être de 110 % du choc d'onde pleine spécifiée (tension de tenue au choc (BIL)).

L'Article 14 de la CEI 60076-3:2000 doit s'appliquer.

7.4.3 Essai de fréquence de résonance électrique

La méthode est décrite en A.4.

7.4.4 Essais climatiques

La CEI 60076-11 doit s'appliquer aux transformateurs de type sec.

7.4.5 Essai environnemental E3

Le transformateur doit être placé dans une enceinte d'essai dont la température et l'humidité sont contrôlées.

Le volume de l'enceinte doit être d'au moins cinq fois celui du parallélépipède circonscrit au transformateur. Les distances d'isolement des différentes parties du transformateur aux murs, au plafond et aux buses d'aspersion ne doivent pas être inférieures à la plus petite distance d'isolement entre phases, entre les parties actives du transformateur (voir la CEI 60076-3) et pas inférieures à 150 mm conformément au 26.3.1 de la CEI 60076-11:2004.

La température de l'air dans l'enceinte d'essai doit être telle qu'elle assure la condensation sur le transformateur.

L'humidité dans l'enceinte doit être maintenue au-dessus de 95 %. Ceci peut être obtenu en pulvérisant périodiquement ou en continu une quantité adéquate d'eau.

La conductivité de l'eau doit être comprise entre 3,6 S/m et 4 S/m.

La position des buses d'aspersion doit être choisie de telle sorte que le transformateur ne soit pas directement aspergé.

Le transformateur doit être laissé dans une atmosphère ayant un taux d'humidité relative supérieur à 95 % pendant au moins 6 h, sans être mis sous tension.

Dans les 5 min suivantes, le transformateur doit être soumis à un essai de tension induite, tel que spécifié ci-dessous:

- a) les transformateurs dont les enroulements sont destinés à être connectés à un réseau dont le neutre est relié à la terre directement ou au travers d'une impédance de faible valeur, doivent être alimentés sous une tension de 1,1 fois la tension assignée, pendant 15 min;
- b) les transformateurs dont les enroulements sont destinés à être connectés à un réseau à neutre isolé ou à neutre relié à la terre au travers d'une impédance de forte valeur, doivent être soumis à un essai de tension induite pendant 3 périodes successives de 5 min. Pendant cet essai, chaque borne haute tension doit être successivement raccordée à la terre, et une tension égale à 1,1 fois la tension assignée doit être appliquée entre chaque autre borne haute tension et la terre. L'essai triphasé peut être remplacé par des essais monophasés, avec les deux autres bornes de phase non reliées à la terre connectées entre elles.

Il convient de préférence que cet essai soit réalisé dans l'enceinte d'essai.

Pendant l'application de la tension, aucun amorçage ne doit se produire, et un examen visuel ne doit révéler aucun cheminement important.

Si aucune information concernant la condition d'essai a) ou b) n'est disponible, il convient de réaliser l'essai b).

7.4.6 Essai de comportement au feu

La CEI 60076-11 doit s'appliquer aux transformateurs de type sec.

Les liquides pour les transformateurs immergés sont décrits dans la CEI 61100.

Annexe A (informative)

Méthode et tableaux de calcul

A.1 Refroidissement du transformateur dans une pièce à ventilation naturelle

A.1.1 Hypothèses

La pièce est refroidie par ventilation naturelle, par conséquent:

Q_{AF} est la dissipation thermique par ventilation forcée (kW)

$$Q_{AF} = 0 \quad (A.1)$$

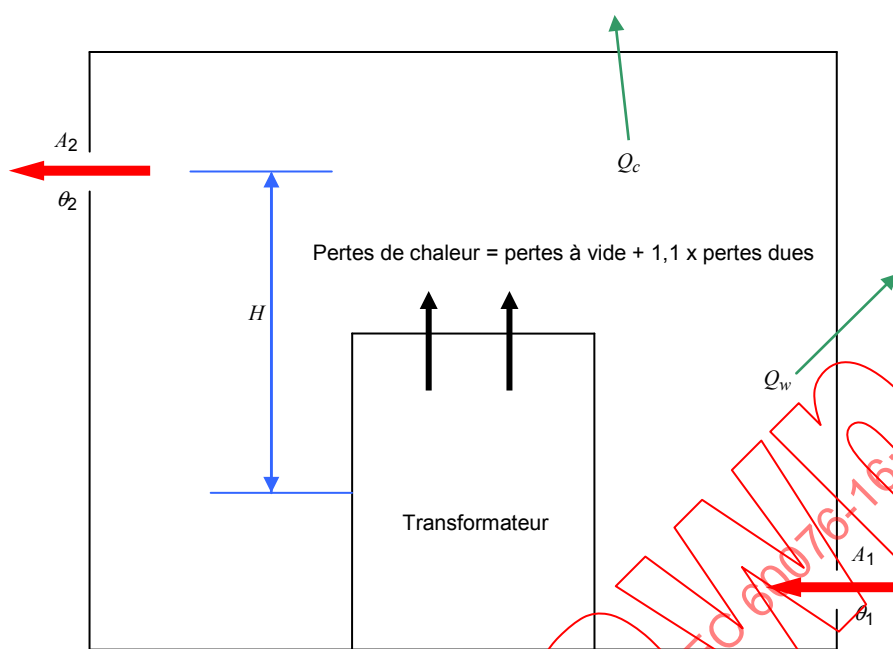
Q_c , Q_w sont les pertes dissipées respectivement à travers le plafond et les murs (kW)

$$Q_c = Q_w = 0 \quad (A.2)$$

En présence d'harmoniques dans le courant de charge, des dispositions particulières doivent être prises selon A.2 ou le transformateur doit être déclassé en puissance.

La dissipation thermique à travers le plafond et les murs est généralement faible. Cette grandeur dépend des coefficients de transfert de chaleur des matériaux des murs et du plafond, de la superficie du plafond et des murs, et de la différence entre les températures à l'intérieur et à l'extérieur.

Voir la Figure A.1 ci-dessous:



IEC 2059/11

Légende

- A_1 Section transversale efficace de l'entrée d'air (m^2)
- A_2 Section transversale efficace de la sortie d'air (m^2)
- θ_1, θ_2 Températures de l'air de l'entrée et de la sortie ($^{\circ}C$)
- H Différence de hauteur entre le milieu de la surface de la sortie et la mi-hauteur du transformateur (m)
- Q_c, Q_w Pertes dissipées respectivement à travers le plafond et les murs (kW)

Figure A.1 – Dissipation thermique dans une pièce à ventilation naturelle

A.1.2 Données pour le calcul de la ventilation

Le transformateur produit des pertes qui sont dissipées dans la pièce. Le présent paragraphe indique le calcul de ces pertes.

$\Delta\theta_a$ est l'échauffement de l'air (K):

$$\Delta\theta_a = \theta_2 - \theta_1 \text{ valeur approximative} = 15 \text{ K} \quad (\text{A.3})$$

NLL sont les pertes à vide du transformateur (kW);

LL sont les pertes nominales dues à la charge du transformateur à la température de référence (kW);

HL sont les pertes de chaleur du transformateur dans la pièce (kW);

Pertes de chaleur = Pertes à vide + $1,1 \times$ Pertes dues à la charge:

$$HL = NLL + 1,1 \times LL \text{ (kW)} \quad (\text{A.4})$$

NOTE La valeur de 15 K indiquée ci-dessus correspond à la valeur empirique commune issue de l'expérience des fabricants.

A.1.3 Sortie

Il convient que les pertes produites par les transformateurs soient dissipées à l'extérieur de la pièce. La présente annexe permet de donner la surface de l'entrée d'air.

A_1 est la section transversale efficace de l'entrée d'air (m^2);

A_2 est la section transversale efficace de la sortie d'air (m^2):

$$A_2 / A_1 > 1,1 \text{ (minimum 10 \% de plus)} \quad (\text{A.5})$$

Q_{tot} est la dissipation thermique dans la pièce où se situe le transformateur (kW):

$$Q_{\text{tot}} = Q_{\text{nac}} + Q_{\text{wc}} + Q_{\text{AF}} \text{ (kW)} \quad (\text{A.6})$$

Q_{nac} est la dissipation par circulation naturelle d'air (kW):

$$Q_{\text{nac}} = 0,1 \times A_1 \times \sqrt{H \Delta\theta_a^3} \text{ (kW)} \quad (\text{A.7})$$

$\Delta\theta_a$ est l'échauffement de l'air (K);

Q_{wc} est la dissipation thermique à travers les murs et le plafond (kW):

$$Q_{\text{wc}} = Q_w + Q_c = 0 \text{ (voir hypothèse)} \quad (\text{A.8})$$

Q_{AF} est la dissipation thermique par ventilation forcée (kW);

$Q_{\text{AF}} = 0$ (voir hypothèse).

Afin de garantir une bonne ventilation de la pièce:

$$HL = Q_{\text{nac}} + Q_{\text{wc}} \text{ (kW)} \quad (\text{A.9})$$

La section transversale de l'entrée requise A_1 est alors donnée par:

$$A_1 = \frac{HL}{0,1 \sqrt{H \Delta\theta_a^3}} \text{ (m}^2\text{)} \quad (\text{A.10})$$

Calcul de la section de sortie d'air A_2 :

Voir formule (A.5).

A.1.4 Application numérique pour un transformateur de 1 000 kVA

Dans cet exemple, les harmoniques ne sont pas pris en compte.

$$NLL = 2,3 \text{ kW}$$

$$LL = 11 \text{ kW}$$

Les pertes de chaleur HL dans la pièce sont:

$$HL = NLL + 1,1 \times LL = 2,3 + 1,1 \times 11 = 14,4 \text{ kW}$$

$$H = 4,6 \text{ m}$$

Enfin:

$$A_1 = \frac{14,4}{0,1 \times \sqrt{4,6 \times 15^3}} = 1,155 \text{ m}^2$$

La section transversale efficace de l'entrée d'air doit être d'au moins 1,155 m², afin de garantir un refroidissement correct du transformateur dans sa pièce à ventilation naturelle.

Calcul de la section de sortie d'air A_2 :

$$A_2 \text{ minimum} = 1,1 \times 1,155 = 1,271 \text{ (m}^2\text{)}$$

L'installation du transformateur dans une pièce à ventilation naturelle a pour effet d'augmenter les échauffements du transformateur d'environ la moitié de l'augmentation de la température d'air ambiante entre l'entrée et la sortie (CEI 62271-202).

A.2 Détermination de la puissance assignée d'un transformateur chargé de courants non sinusoïdaux

A.2.1 Pertes dues à la charge du transformateur

Les pertes du transformateur sont de deux types:

- pertes directes (pertes par effet Joule) = $I^2 \times R$ (W); (A.10)
- les pertes supplémentaires ν sont égales aux pertes par courants de Foucault + pertes parasites.

Les définitions des pertes parasites et des pertes par courants de Foucault sont telles que données dans la CEI 60076-8 et la CEI 61378-1. La méthode des deux fréquences pour séparer les pertes parasites et les pertes par courants de Foucault par des mesures est définie dans la CEI 61378-3.

A.2.2 Pertes par courants de Foucault (e_f)

Pertes dues au flux électromagnétique dans l'enroulement.

e_f sont les pertes par courants de Foucault par unité pour l'enroulement considéré.

A.2.3 Pertes dues à la charge (Ll)

Pertes dues à la charge (Ll) pour un enroulement considéré, à la température de référence.

$$Ll = R \times I^2 \times (1 + e_1) \text{ (W)} \quad (\text{A.11})$$

A.2.4 Pertes parasites (s_i)

Pertes dues au flux électromagnétique dans les fixations, le couvercle, la cuve et autres parties métalliques.

A.2.5 Pertes totales dues à la charge (Tl)

Les pertes totales dues à la charge Tl du transformateur sont données par:

$$Tl = R_1 \times I_1^2 \times (1 + e_1) + R_2 \times I_2^2 \times (1 + e_2) + S_i \text{ (W)} \quad (\text{A.12})$$

A.2.6 Harmoniques

Les pertes d'un transformateur chargé de courants non sinusoïdaux dépendent de la fréquence de chaque harmonique présent dans le courant et de sa valeur efficace.

Les pertes totales du transformateur au courant assigné varient lorsque le courant comporte un contenu harmonique au lieu d'une forme sinusoïdale simple.

Un transformateur conçu sans avoir porté une attention particulière au contenu harmonique de son courant, doit être déclassé en puissance.

Les composantes harmoniques sont représentées par une onde périodique ayant une fréquence qui est un multiple entier de la fréquence fondamentale.

Les harmoniques sont désignées par leur rang ou par un multiple de la fréquence fondamentale.

Un harmonique avec une fréquence de 250 Hz est appelé le 5^{ème} harmonique (5 fois l'harmonique fondamental) avec une fréquence fondamentale de 50 Hz, par exemple.

Les harmoniques se superposent sur la forme d'onde fondamentale, la déformant et modifiant son amplitude.

Les courants harmoniques sont générés lorsqu'une charge non linéaire est reliée au secondaire du transformateur (exemples: convertisseurs, matériel électronique).

Les problèmes causés par les courants harmoniques sont les suivants: augmentation des pertes et surchauffe dans le transformateur, les pertes par courants de Foucault sont plus importantes et les pertes parasites sont moins importantes, lorsque les courants harmoniques sont présents.

Les pertes par courants de Foucault augmentent avec le carré de la fréquence.

A cause de ces raisons physiques (augmentation des pertes et surchauffe), le spectre harmonique doit être connu avant la conception ou envoyé au fabricant du transformateur, pour déterminer l'aptitude à supporter à de tels harmoniques.

A.2.7 Pertes par courants de Foucault dues aux courants harmoniques

A.2.7.1 Calcul du courant efficace: I_{rms}

La valeur efficace (rms) du courant I_{rms} alimentant une charge non sinusoïdale est:

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h=n} I_h^2} \text{ (A)} \quad (\text{A.13})$$

où

h est le rang d'harmonique de courant;

I_h est l'amplitude de l'harmonique h (A).

A.2.7.2 Calcul des pertes par courants de Foucault

Les pertes par courants de Foucault pour un harmonique particulier sont données par:

$$P_h = P_f \times r_h^2 \times h^2 \text{ (W)} \quad (\text{A.14})$$

où

P_f sont les pertes par courants de Foucault à la fréquence fondamentale f avec le même courant assigné efficace I_f (W);

P_h sont les pertes par courants de Foucault à l'harmonique h (W);

r_h est le rapport de l'amplitude du courant de l'harmonique de rang h au courant fondamental:

$$r_h = \frac{I_h}{I_1} \quad (\text{A.15})$$

Les pertes totales par courants de Foucault (P_{EL}) sont données par la somme des pertes par courants de Foucault pour chaque harmonique individuel.

$$P_{\text{EL}} = P_f \sum_{h=1}^{h=n} r_h^2 \times h^2 \text{ (W)} \quad (\text{A.16})$$

A.2.7.3 Pertes parasites

Les pertes parasites à un harmonique particulier h varient conformément au 6.2 de la CEI 61378-1:2011 et à l'Annexe A.

$$SL_{ih} = r_h^2 \times h^{0,8}$$

où

r_h est le rapport de l'amplitude du courant de l'harmonique de rang h au courant fondamental.

Exemple:

Harmonique $h = 5$

Amplitude = 25,8 %

$$SL_{i5} = 0,258^2 \times 5^{0,8} = 0,2412$$

A.2.8 Facteur des pertes par courants de Foucault des harmoniques: facteur K

Le facteur K est le rapport entre les pertes totales par courants de Foucault dues à tous les courants harmoniques et les pertes par courants de Foucault au courant fondamental I_1 .

Les pertes par courants de Foucault augmentent de K fois leur valeur sinusoïdale lorsque le transformateur est chargé de courants non sinusoïdaux.

$$\text{facteur } K = \frac{P_{EL}}{P_f} \quad (\text{A.17})$$

A.2.9 Pertes totales du transformateur $Ttl s$ en service avec un courant non sinusoïdal

$Ttl s$ = pertes à vide (Nll) + pertes totales dues à la charge avec un courant non sinusoïdal (Lls)

$$Ttl s = Nll + \left[(I_{h1}^2 \times R_1 \times I_1^2) \times (k_1 \times (1 + e_1)) \right] + \left[(I_{h2}^2 \times R_2 \times I_2^2) \times (k_2 \times (1 + e_2)) \right] + S_i \quad (\text{A.18})$$

A.2.10 Échauffement de l'huile sur la partie supérieure avec des courants non sinusoïdaux (TO_i) pour les transformateurs immergés dans un liquide

Voir la CEI 60076-7 pour le calcul de l'échauffement de l'huile sur la partie supérieure

$$TO_i = TO_{rx} (Ttl s / Ttl)^{0,8} \quad (\text{A.19})$$

où

TO_i est l'échauffement de l'huile sur la partie supérieure avec des courants non sinusoïdaux;

TO_r est l'échauffement de l'huile sur la partie supérieure au courant assigné.

A.2.11 Le déclassement en puissance du transformateur

Le déclassement en puissance du transformateur doit être approximativement comme suit:

SrE = charge admissible pour le transformateur:

$$SrE = Sr \times (Ttl / Ttl s)^{0,5} \quad (\text{A.20})$$

Sr est la charge nominale du transformateur (kVA).

Le facteur de déclassement en puissance du transformateur est $(Ttl / Ttl s)^{0,5}$.