

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Railway applications – Traction transformers and inductors on board rolling stock

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



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED
Copyright © 2016 IEC, Geneva, Switzerland

All rights reserved. Unless otherwise specified, no part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester. If you have any questions about IEC copyright or have an enquiry about obtaining additional rights to this publication, please contact the address below or your local IEC member National Committee for further information.

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'IEC ou du Comité national de l'IEC du pays du demandeur. Si vous avez des questions sur le copyright de l'IEC ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de l'IEC de votre pays de résidence.

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

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

About the IEC

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

About IEC publications

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

IEC Catalogue - webstore.iec.ch/catalogue

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

IEC publications search - www.iec.ch/searchpub

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

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing 20 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in 15 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

IEC Glossary - std.iec.ch/glossary

65 000 electrotechnical terminology entries in English and French extracted from the Terms and Definitions clause of IEC publications issued since 2002. Some entries have been collected from earlier publications of IEC TC 37, 77, 86 and CISPR.

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

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

A propos de l'IEC

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

A propos des publications IEC

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

Catalogue IEC - webstore.iec.ch/catalogue

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

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

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

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne de termes électroniques et électriques. Il contient 20 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 15 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

Glossaire IEC - std.iec.ch/glossary

65 000 entrées terminologiques électrotechniques, en anglais et en français, extraites des articles Termes et Définitions des publications IEC parues depuis 2002. Plus certaines entrées antérieures extraites des publications des CE 37, 77, 86 et CISPR de l'IEC.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

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

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Railway applications – Traction transformers and inductors on board rolling stock

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

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 45.060

ISBN 978-2-8322-3107-4

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

CONTENTS

FOREWORD.....	6
1 Scope.....	8
2 Normative references.....	8
3 Terms and definitions	9
3.1 General definitions	10
3.2 Definitions for transformers	11
3.3 Definitions for inductors.....	11
4 Classification.....	12
4.1 Classification of transformers	12
4.2 Classification of inductors.....	12
5 Service conditions	12
6 Rated current and load profile.....	13
6.1 Load profile.....	13
6.2 Rated current.....	13
7 Rated voltage and power of transformer windings.....	13
7.1 Rated line-side voltage.....	13
7.2 Rated secondary voltage	13
7.3 Rated power of transformer	14
8 Transformer tapplings.....	14
9 Cooling.....	14
9.1 Identification of transformers and inductors according to cooling method.....	14
9.2 Arrangement of symbols.....	15
9.2.1 Enclosed transformers and inductors.....	15
9.2.2 Non-enclosed transformers and inductors	15
9.2.3 Air cooling	15
10 Temperature limits.....	15
10.1 Classification of insulating materials	15
10.2 Temperature limits of solid insulation.....	16
10.3 Temperature limits for liquid	16
10.4 Temperature limits for other parts.....	17
11 Mechanical design.....	17
12 Rating plates	17
13 Tests.....	18
13.1 Categories of tests	18
13.1.1 General	18
13.1.2 Type tests.....	18
13.1.3 Routine tests.....	18
13.1.4 Investigation tests	18
13.2 Tests on transformers	18
13.2.1 General – List of tests	18
13.2.2 Tolerances.....	20
13.2.3 Visual checks (type, routine test) and functional tests (optional type and routine test)	20
13.2.4 Mass (type and optional routine test).....	20
13.2.5 Measurement of winding resistance (type and routine tests).....	21

13.2.6	Measurement of voltage ratio, polarities and vector groups (type and routine tests).....	21
13.2.7	Measurement of no-load primary current and losses (type and routine tests)	22
13.2.8	Measurement of impedance voltages or short-circuit impedances (type and routine tests)	22
13.2.9	Measurement of fundamental load losses (type and routine tests)	23
13.2.10	Determination of total losses (type test)	24
13.2.11	Temperature-rise test (type test)	24
13.2.12	Insulation resistance test (optional type and routine test)	28
13.2.13	Dielectric tests (type and routine tests)	28
13.2.14	Partial discharge test (type or optional routine test for dry-type, investigation test for immersed type)	34
13.2.15	Short-circuit withstand test (optional type test).....	36
13.2.16	Shock and vibration test (optional type test).....	38
13.2.17	Voltage transmission ratio – VTR (optional type test)	40
13.2.18	Noise measurement (type test)	41
13.2.19	Leakage magnetic flux density measurement (optional type test).....	41
13.2.20	Electrical Frequency Response Analysis FRA (investigation test)	42
13.2.21	Inrush current measurement (optional type test)	42
13.3	Tests on inductors.....	43
13.3.1	List of tests	43
13.3.2	Tolerances.....	43
13.3.3	Visual checks (type and routine test)	44
13.3.4	Mass (type and optional routine test)	44
13.3.5	Measurement of winding resistance (type and routine test)	44
13.3.6	Determination of losses (type test)	44
13.3.7	Measurement of inductance (type and routine tests)	45
13.3.8	Temperature-rise test (type tests).....	48
13.3.9	Insulation resistance test (optional type and routine test)	48
13.3.10	Dielectric tests (type and routine tests).....	48
13.3.11	Partial discharge test (type or optional routine test for the dry-type)	49
13.3.12	Short-circuit withstand test (optional type test).....	49
13.3.13	Shock and vibration test (optional type test).....	50
13.3.14	Vibration test with current flowing (investigation test)	50
13.3.15	Noise measurement (type test).....	50
13.3.16	Leakage magnetic flux density measurement (optional type test).....	50
Annex A (informative)	List of items for which an agreement between purchaser and manufacturer is needed or for which further information or specifications shall be given by the purchaser or by the manufacturer	51
A.1	Items subject to agreement between purchaser and manufacturer.....	51
A.1.1	Transformer and inductors	51
A.1.2	Transformers	52
A.1.3	Inductors	53
A.2	Information to be given by purchaser to manufacturer	54
A.2.1	Transformers and inductors.....	54
A.2.2	Transformers	55
A.2.3	Inductors	55
A.3	Information to be given by manufacturer to purchaser	56
A.3.1	Transformers and inductors.....	56

A.3.2	Transformers	56
A.3.3	Inductors	56
Annex B (informative)	Thermal ageing and insulation life time.....	57
B.1	Insulation life time and thermal ageing.....	57
B.2	Definitions of thermal endurance	57
B.3	Thermal endurance calculations	58
B.4	Special considerations for thermal design and test.....	59
B.4.1	General	59
B.4.2	Cooling medium temperature at the external interface.....	59
B.4.3	Rated current.....	60
B.4.4	Temperature rise test of a dry-type transformer/inductor	60
B.5	Thermal conformity of the insulation system.....	60
B.6	End of life criterion	60
Annex C (informative)	Example of thermal endurance calculation to demonstrate the suitability of an insulation system for a specified application	61
C.1	Preliminary.....	61
C.2	Example 1 – Temperature limits for a dry-type transformer/inductor.....	61
C.3	Example 2 – Thermal endurance calculation	61
C.3.1	General	61
C.3.2	Operating conditions to be provided by the purchaser	62
C.3.3	Thermal endurance characteristics to be provided by the manufacturer	62
C.3.4	Temperature rise test results.....	62
C.3.5	Calculations.....	63
Annex D (informative)	Wet dielectric tests for dry-type transformers and inductors	65
D.1	General.....	65
D.2	Wet test 1 (optional type test or optional routine test): short soaking	65
D.3	Wet test 2 (investigation test or optional type test): misting	66
D.4	Wet test 3 (investigation test): thermal shock – long soaking – misting	66
D.4.1	General	66
D.4.2	Temperature conditioning.....	66
D.4.3	Thermal shock	66
D.4.4	Dielectric test.....	66
D.5	Common test procedure and criteria for wet dielectric tests	66
Annex E (informative)	Load profiles.....	68
Bibliography	69
Figure 1	– Examples of set up for induced voltage withstanding tests.....	31
Figure 2	– Examples of set up for separate source voltage withstanding tests	32
Figure 3	– Examples of impulse test connections for traction, inductor and auxiliary transformers	33
Figure 4	– Partial discharge test: voltage versus time	35
Figure 5	– Configurations for VTR test	41
Figure 6	– Example of test circuit	42
Table 1	– Letter symbols for cooling method.....	14
Table 2	– Order of symbols	15
Table 3	– Temperature limits of solid insulation	16

Table 4 – Temperature limits for liquid..... 16

Table 5 – List of checks and tests to be made on traction transformers 19

Table 6 – Tolerances 20

Table 7 – Reference temperatures 21

Table 8 – Dielectric test voltage 30

Table 9 – Partial discharge measurements 35

Table 10 – List of checks and tests to be made on inductors..... 43

Table 11 – Tolerances 44

Table 12 – Test method of voltage between terminals withstand test..... 49

Table C.1 – Temperature limits and expected lifetime for a dry-type transformer or inductor (examples) 61

Table C.2 – Load cycle histogram 62

Table C.3 – Temperature histogram 62

Table C.4 – Temperature rise test results 63

Table C.5 – Thermal endurance calculation 63

Table C.6 – Equivalent current and temperatures 64

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

RAILWAY APPLICATIONS – TRACTION TRANSFORMERS AND INDUCTORS ON BOARD ROLLING STOCK

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 60310 has been prepared by IEC technical committee 9: Electrical equipment and systems for railways.

This fourth edition cancels and replaces the third edition issued in 2004 and constitutes a technical revision.

This edition takes into account the new generic railway standards, more specifically general service conditions referring to IEC 62498-1 and shock and vibration considerations referring to IEC 61373. It also includes the following significant technical changes with regard to the previous edition:

- temperature limits;
- temperature-rise test;
- dielectric tests;
- partial discharge test;

- inductance measurement methods;
- voltage between terminals withstand test;
- thermal ageing and insulation lifetime (informative);
- examples of thermal endurance calculation (informative);
- wet dielectric tests (informative);
- load profiles (informative).

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

FDIS	Report on voting
9/2080/FDIS	9/2117/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.

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.

RAILWAY APPLICATIONS – TRACTION TRANSFORMERS AND INDUCTORS ON BOARD ROLLING STOCK

1 Scope

This International Standard applies to traction and auxiliary power transformers installed on board rolling stock and to the various types of power inductors inserted in the traction and auxiliary circuits of rolling stock, of dry or liquid-immersed design.

NOTE The requirements of IEC 60076 (all parts) are applicable to transformers and inductors where they do not conflict with this standard, or with the specialized IEC publications dealing with traction applications.

This standard can also be applied, after agreement between purchaser and manufacturer, to the traction transformers of three-phase a.c. line-side powered vehicles and to the transformers inserted in the single-phase or poly-phase auxiliary circuits of vehicles, except instrument transformers and transformers of a rated output below 1 kVA single-phase or 5 kVA poly-phase.

This standard does not cover accessories such as tap changers, resistors, heat exchangers, fans, etc., intended for mounting on the transformers or inductors, which are tested separately according to relevant rules.

2 Normative references

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

IEC 60050-811, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 811: Electric traction*

IEC 60060-1, *High-voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements*

IEC 60060-2, *High-voltage test techniques – Part 2: Measuring systems*

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

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

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

IEC 60076-4, *Power transformers – Part 4: Guide to the lightning impulse and switching impulse testing – Power transformers and reactors*

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

IEC 60076-6:2007, *Power transformers – Part 6: Reactors*

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

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

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

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

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

IEC 60076-18, *Power transformers – Part 18: Measurement of frequency response*

IEC 60077-1, *Railway applications – Electric equipment for rolling stock – Part 1: General service conditions and general rules*

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

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

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

IEC 60836, *Specifications for unused silicone insulating liquids for electrotechnical purposes*

IEC 60850, *Railway applications – Supply voltage of traction systems*

IEC 61039, *Classification of insulating liquids*

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

IEC 61373:2010, *Railway applications – Rolling stock equipment – Shock and vibration tests*

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

IEC 62497-1, *Railway applications – Insulation coordination – Part 1: Basic requirements – Clearances and creepage distances for all electrical and electronic equipment*

IEC 62498-1, *Railway applications – Environmental conditions for equipment – Part 1: Equipment on board rolling stock*

ISO 3746, *Acoustics – Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure – Survey method using an enveloping measurement surface over a reflecting plane*

ISO 9614-1, *Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity – Part 1: Measurement at discrete points*

ISO 9614-2, *Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity – Part 2: Measurement by scanning*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC 60076-1 and IEC 60050-811 together with the following apply.

NOTE When the term “transformer” is used alone, it applies to both traction and auxiliary transformers.

The term “transformer(s)/inductor(s)” appears in clauses applicable to both transformers and inductors to avoid duplication of text.

The term “inductor” is used in this standard with the same meaning as the term “reactor” mentioned in IEC 60050-421, IEC 60050-811 and IEC 60076-6.

3.1 General definitions

3.1.1

load profile

current/power versus time under specified conditions including voltage

3.1.2

cooling medium

cooling medium used to extract the heat out of the transformer/inductor e.g. air, water, oil, heat sink, etc.

3.1.3

rated insulation voltage

U_{Nm}

r.m.s. withstand voltage value assigned by the manufacturer to the equipment or a part of it, characterising the specified permanent (over 5 min) withstand capability of its insulation

Note 1 to entry: U_{Nm} is a voltage between a live part of equipment and earth or another live part. For rolling stock, earth refers to the car body.

Note 2 to entry: For circuits, systems and sub-systems in railway applications this definition is preferred to “highest voltage for equipment” which is widely used in international standards.

Note 3 to entry: U_{Nm} is higher than or equal to the working voltage. As a consequence, for circuits directly connected to the contact line, U_{Nm} is equal to or higher than U_{max1} as specified in IEC 60850. For circuits connected to electronic converter U_{Nm} is higher than or equal to the d.c. link voltage.

Note 4 to entry: U_{Nm} is not necessarily equal to the rated voltage which is primarily related to functional performance.

3.1.4

nominal voltage

U_n

suitable approximate voltage used to designate or identify a given supply system

3.1.5

rated voltage

U_r

value of voltage assigned for a specific operating condition

3.1.6

rated impulse voltage

U_{Ni}

impulse voltage value, characterizing the specified withstand capability of its insulation against transient over-voltages

3.1.7

test voltage

 U_a

r.m.s. value derived from U_{Nm} used for separate source voltage, induced voltage, voltage between terminals withstand, depending on test carried out

3.1.8

recurring peak voltage

 U_{mT}, U_{mG}

maximum peak value of periodic excursions of the voltage waveform between terminals (U_{mT}) or between terminals and ground (U_{mG})

3.2 Definitions for transformers

3.2.1

voltage transmission ratio

VTR

ratio between the secondary voltage and the primary voltage when a specified impulse or a.c. square voltage is applied on the primary.

The VTR is expressed as a percentage of this applied voltage.

3.2.2

impedance voltage

voltage applied to reach the rated current in short-circuit.

This is expressed as a percentage of this applied voltage to the rated voltage at reference temperature.

Note 1 to entry: When expressed as a percentage or per unit, this is equal to the short circuit impedance referred in IEC 60076-1:2011, 3.7.

3.2.3

tolerance

permitted deviation between the declared value of a quantity and the measured value

[SOURCE: IEC 60050-411:2007, 411-36-19]

3.3 Definitions for inductors

Values of inductance for inductors are related to the different classes of utilisation and are defined as follows, with the understanding that they include an indication of the nature and value of the current used in their measurement.

3.3.1

a.c. inductance

inductance derived from the measurement of the alternating current carried by the inductor when it is supplied by a sinusoidal alternating voltage of specified value and frequency

3.3.2

differential inductance

inductance defined from the derivative of the linked flux as a function of current (equal to the slope of the magnetic characteristic)

Note 1 to entry: It is derived from the transient record of instantaneous voltage and current in the inductor or from the measurement of the variation of magnetic flux.

3.3.3

incremental inductance

inductance seen by the a.c. current of a particular value and frequency superimposed on a direct current through the inductor

Note 1 to entry: It should be mentioned that the ripple factor of a pulsating current, expressed as a percentage, is conventionally defined by the formula:

$$\frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \times 100$$

where I_{\max} and I_{\min} respectively represent the maximum and minimum values of the current wave.

Note 2 to entry: It is derived from a record of the terminal voltage.

4 Classification

4.1 Classification of transformers

The transformers mentioned above may be:

- traction transformers to supply the propulsion circuits, and optionally also other equipment;
- auxiliary transformers to supply electrical equipment except propulsion circuits.

Windings mentioned in the standard may be:

- line side windings which are directly connected to the power supply line;
- traction windings which supply the propulsion circuits;
- auxiliary windings which are used for other purposes.

4.2 Classification of inductors

According to their use, inductors can be classified as follows:

- inductors for alternating current:
inductors that carry alternating current, such as transition inductors used for transition between tappings of tap changers, inductors for a.c. commutator motor braking circuits, interference suppression inductors, tuned filter inductors, etc.;
- inductors for direct current:
inductors that carry direct current with small or negligible a.c. components, such as d.c. line filter inductors, inductive shunts for traction motors, inductors for d.c. motor braking circuits, etc.;
- inductors for pulsating current:
inductors that carry direct or alternating current with a significant periodic ripple, such as smoothing inductors for traction motors, sinusoidal filter inductors in auxiliary converters, etc.

5 Service conditions

The normal service conditions for transformers and inductors shall be in accordance to IEC 62498-1. Special service conditions shall be agreed between the purchaser and manufacturer.

6 Rated current and load profile

6.1 Load profile

A transformer/inductor is designed to operate on the train in steady-state and transient (surge) conditions, both in normal and overload conditions.

The purchaser should specify the load profile according to Annex E (informative). The current frequency spectrum shall be specified by the responsible party.

6.2 Rated current

The rated current of a winding is the current this winding can sustain permanently at the reference temperature for continuous load.

The rated current shall be calculated according to either of following methods:

- a) r.m.s. current derived from the load profiles;
- b) considering thermal ageing of insulating materials according to Annex B (informative).

Special attention should be paid to varying cooling modes and to the averaging time window.

The reference temperature for continuous load is the cooling medium temperature at the external interface of the transformer/inductor. It shall:

- c) either be directly specified by the purchaser;
Specified values should be based on the air temperature external to vehicle as defined in IEC 62498-1.
- d) or calculated by the manufacturer based on the temperature histogram provided by the purchaser and the method of Annex B (informative): see cooling medium reference temperature for lifetime calculation in B.4.2.

For a traction winding, the rated current shall correspond to the principal tapping. This definition of rated current applies when other windings, which are normally on load, deliver their rated loads.

7 Rated voltage and power of transformer windings

7.1 Rated line-side voltage

The rated line-side voltage is the r.m.s. voltage applicable in normal operating conditions to the line-side winding group. If this winding has tappings, the rated voltage shall be referred to the principal tapping.

Unless otherwise agreed between purchaser and manufacturer, the rated line-side voltage is specified as being equal to the nominal voltage of the traction system.

NOTE IEC 60850 gives the list of the nominal voltages of traction systems.

7.2 Rated secondary voltage

The rated voltage of a secondary winding of a transformer is the r.m.s. no-load voltage at the terminals of the winding when the principal tapping of the line-side winding of the transformer is fed at its rated voltage and frequency.

7.3 Rated power of transformer

The rated power of a transformer winding is defined as the product of the rated voltage of this winding and its rated current.

NOTE Transformers usually have several secondary windings (e.g. traction, auxiliaries, train heating). The rated power of the line-side winding of a transformer can be less than the sum of the rated powers of its various secondary windings.

8 Transformer tapings

In order to permit variation of the voltage ratio of the transformer, one or more of its windings may be equipped with intermediate tapings, which shall be indicated on the diagram and in the specification, with a statement of their maximum operating characteristics.

The principal tapping is that which enables the rated traction motor voltage to be obtained at the terminals of the motors when they are taking their rated current, the transformer line-side winding being supplied at rated voltage and frequency.

When both line-side windings and traction windings have intermediate tapings, the principal tapings shall be indicated.

For multi-system vehicles, the principal tapings may be different for each system.

The no-load voltage ratio shall be defined for the principal tapping and for other tapings.

9 Cooling

9.1 Identification of transformers and inductors according to cooling method

Transformers and inductors shall be identified according to the cooling method employed. Letter symbols for use in connection with each cooling method shall be as given in Table 1.

Table 1 – Letter symbols for cooling method

Type of cooling medium	Symbol
Mineral oil or other insulating liquid with fire-point ≤ 300 °C	O
Insulating liquid with fire-point > 300 °C	K
Insulating liquid having a fire-point greater than its boiling-point	L
Gas	G
Water	W
Air	A
Type of circulation	Symbol
Natural	N
Forced non-directed	F
Forced-directed	D

In transformers and inductors with forced-directed circulation, a certain portion of the forced flow is channelled so as to pass through the windings. Some windings, however, may have a non-directed flow, for instance separate tapping windings, auxiliary windings and stabilizing windings.

The type of coolant shall be subject to approval by the purchaser.

9.2 Arrangement of symbols

9.2.1 Enclosed transformers and inductors

Transformers and inductors shall be identified by symbols of four letters for each cooling method for which a rating is specified by the manufacturer.

The order in which the symbols shall be used is given in Table 2. Oblique strokes shall be used to separate the group symbols for different cooling methods.

Table 2 – Order of symbols

1 st letter	2 nd letter	3 rd letter	4 th letter
Indicating the cooling medium that is in contact with the winding		Indicating the cooling medium that is in contact with the external cooling system	
Type of cooling medium	Type of circulation	Type of cooling medium	Type of circulation

Example: a liquid-immersed transformer with forced-directed liquid circulation and forced-air circulation would be designated by ODAF or KDAF.

For oil-immersed transformers in which the alternatives of natural or forced cooling with non-directed oil flow are possible, typical designations are: ONAN/ONAF, ONAN/OFAF.

For a dry-type transformer in a non-ventilated protective enclosure with natural air cooling inside and outside the enclosure, the designation is: ANAN.

9.2.2 Non-enclosed transformers and inductors

Dry-type transformers and inductors without protective enclosures are identified by two symbols only for the cooling medium that is in contact with the windings or the surface coating of windings with an overall coating (e.g. epoxy resin).

The cooling method of a dry-type transformer without a protective enclosure or with a ventilated enclosure and with natural air cooling is designated by: AN.

9.2.3 Air cooling

When transformers or inductors are cooled by the draught of air caused by the motion of the vehicle or by a forced-air cooling system which is not tested with the transformer or inductor, the air flow (or velocity) on which the rated power of the equipment is based shall be indicated by the purchaser.

10 Temperature limits

10.1 Classification of insulating materials

The different classes of solid materials (EIM – Electrical Insulating Material) and systems (EIS – Electrical Insulating System) used at present for the insulation of the windings of transformers and inductors to which this standard applies are defined in IEC 60085 and listed in Table 3.

For a given solid insulation material the thermal class may be different depending on the surrounding medium (air, mineral oil, ester fluids, etc.).

The thermal class of the solid materials used for the insulation of the windings shall be indicated by the manufacturer.

10.2 Temperature limits of solid insulation

The maximum temperature of the transformer and inductor components shall not exceed the limits given in Table 3.

Temperature limits apply to short time maximum temperature considering hot spot.

These absolute temperatures are related to the worst case specified operating conditions.

For the long time operation temperature limits refer to 13.2.11.6

Table 3 – Temperature limits of solid insulation

RTE (Relative Thermal Endurance) or ATE (Assessed Thermal Endurance)	Thermal class	Maximum temperature Immersed type °C a)	Maximum temperature Dry-type °C b)
RTE or ATE < 90	70	No guidance	No guidance
90 ≤ RTE or ATE < 105	90 (Y)	No guidance	No guidance
105 ≤ RTE or ATE < 120	105 (A)	120	130
120 ≤ RTE or ATE < 130	120 (E)	135	145
130 ≤ RTE or ATE < 155	130 (B)	170	155
155 ≤ RTE or ATE < 180	155 (F)	195	180
180 ≤ RTE or ATE < 200	180 (H)	220	205
200 ≤ RTE or ATE < 220	200 (N)	240	225
220 ≤ RTE or ATE < 250	220 (R)	260	245
250 ≤ RTE or ATE	250	No guidance	No guidance
<p>a) For immersed type insulation systems, temperature limits are higher than for dry-type because of reduced oxidation of insulation materials. The exceptions are insulation systems based on cellulose (105 and 120 class), for which the temperature limits are based on IEC 60076-7.</p> <p>b) Dry-type limits are according to IEC 60076-12:2008, Table 2.</p>			

Other limits may be adopted by agreement between purchaser and manufacturer when certain combinations of insulating materials are used. It becomes especially important when materials of different thermal classes are combined within one insulation system. Then, thorough evaluation of the thermal capacity of such created system is necessary.

To estimate life time refer to Annex B (informative) and Annex C (informative).

10.3 Temperature limits for liquid

The temperature of the liquid shall not exceed the limits of Table 4.

Table 4 – Temperature limits for liquid

	Mineral oil (IEC 60296)	Synthetic ester fluid (IEC 61099)	Silicon fluid (IEC 60836)
Fire point class (IEC 61039)	O	K	K
Maximum temperature for long term load, bulk fluid breathing or sealed °C	105	130	155

The values of temperature are based on IEC 60076-14. The recommended temperature limits are valid for the specific environment for insulation systems. Sealed systems limit the impact of oxygen and moisture as typical aging factors. For the free breathing system, maintenance has to be adapted.

10.4 Temperature limits for other parts

Tank surface maximum temperature shall be agreed between purchaser and manufacturer.

The temperature of the cores and other parts of the transformer or inductor shall in no case reach a value which will cause damage to these parts or adjacent ones, or undue ageing of the insulating liquid.

11 Mechanical design

The mechanical behaviour can be proved by Finite Element Analysis (FEA) calculation (method, model calibration and fatigue limits) to be agreed between the purchaser and manufacturer, or by the shock and vibration test. If the FEA method is chosen it should at least include the static load cases, the modal analysis up to 60 Hz and a relevant fatigue analysis that is based on the spectral power density defined by the IEC 61373 test conditions as input signal. A relevant damage evaluation shall be made with a recognized standard method (e.g. Single moment, Rayleigh, etc.). The material data have to be taken in accordance with this standard. The calculation shall take the welds into account and safety coefficient applied in accordance with the relevant standard agreed with the purchaser shall be used. The liquid has to be taken into account and the way it has been simulated has to be demonstrated.

12 Rating plates

Each unit that can be handled independently shall be provided with its own rating plate showing at least the items indicated below, unless otherwise agreed between purchaser and manufacturer:

- manufacturer's name;
- manufacturer's type designation or number;
- manufacturer's serial number;
- date and place of manufacturing;
- connection diagram;
- tappings;
- rated power, voltage and frequency of each winding;
- rated current (r.m.s. value, or mean direct current);
- value of the inductance (at one or more specified reference current values);
- volume of cooling medium and type (only for the liquid filled);
- name of cooling fluid (only for the liquid filled);
- identification of cooling method;
- total mass.

The identification plate shall be placed in such a way that it will be easily inspected and cleaned in normal maintenance operations once the transformer is installed in the final application.

13 Tests

13.1 Categories of tests

13.1.1 General

There are three categories of tests:

- type tests;
- routine tests;
- investigation tests.

Descriptions of the different tests belonging to each category are given below.

13.1.2 Type tests

Type tests are carried out on a single piece of equipment of a given design. The test shall be carried out on one unit chosen among the first batch produced.

Bulk production equipment shall be deemed to have passed the type tests and shall be exempted from them if the manufacturer produces duly signed certificates of type tests already carried out on identical equipment constructed on a previous occasion.

Optional type tests are to be carried out only if they have been expressly specified in the order.

13.1.3 Routine tests

Routine tests are carried out on all equipment of the same order. For certain equipment, after agreement between purchaser and manufacturer, the routine tests may be replaced by tests carried out on a few items of equipment taken at random from the order.

13.1.4 Investigation tests

Investigation tests are special tests of an optional character carried out on a single equipment in order to obtain additional information on its performance; they are only to be carried out if they have been expressly specified in the order.

The results of these tests shall not influence the acceptance of the equipment unless agreement to the contrary has been specified in the order.

13.2 Tests on transformers

13.2.1 General – List of tests

The checks, measurements and tests to be made on traction and auxiliary transformers are indicated in Table 5, which also stipulates the category of the test and the clauses to which reference should be made.

As far as practicable, the tests on differential inductors which cannot be dissociated from the transformer shall be carried out together with the tests on the latter. Purchaser and manufacturer shall agree on the tests to be made, if necessary, on these inductors as separate equipment, so as to ensure that they fulfil all requirements of this standard.

When tap changers are an integral part of the transformers, they cannot be separated while the latter are tested.

Table 5 – List of checks and tests to be made on traction transformers

Nature of test	Clause or Subclause		
	Type	Routine	Investigation
Visual checks	13.2.3	13.2.3	-
Functional tests	13.2.3 (optional)	13.2.3 (optional)	-
Mass	13.2.4	13.2.4 (optional)	-
Measurement of winding resistance	13.2.5	13.2.5	-
Measurement of voltage ratios, polarities and vector groups	13.2.6	13.2.6	-
Measurement of no-load primary current and losses	13.2.7.2	13.2.7.3	-
Measurement of impedance voltage or short-circuit impedances	13.2.8	13.2.8	-
Measurement of load losses	13.2.9.2	13.2.9.3	-
Determination of total losses	13.2.10	-	-
Temperature-rise test	13.2.11	-	-
Insulation resistance test	13.2.12 (optional)	13.2.12 (optional)	-
Wet dielectric tests	13.2.13.1 dry-type only (optional)	13.2.13.1 dry-type only (optional)	13.2.13.1 dry-type only (optional)
Induced voltage withstand test	13.2.13.2	13.2.13.2	-
Separate source voltage withstand test	13.2.13.3	13.2.13.3	-
Lightning impulse voltage withstand test	13.2.13.4	-	-
Voltage between terminals withstand test	13.2.13.5 (optional)	-	-
Cabling dielectric test	13.2.13.6	13.2.13.6	-
Partial discharge test	13.2.14 dry-type only	13.2.14 dry-type only (optional)	13.2.14 liquid-immersed type only
Short-circuit withstand test	13.2.15 (optional)	-	-
Shock and vibration test	13.2.16 (optional)	-	-
Voltage Transmission Ratio – VTR	13.2.17 (optional)	-	-
Noise measurement	13.2.18	-	-
Leakage magnetic flux density measurement	13.2.19 (optional)	-	-
Electrical frequency response analysis FRA	-	-	13.2.20
Inrush current measurement	13.2.21 (optional)	-	-

13.2.2 Tolerances

Table 6 gives tolerances applicable to certain rated quantities and to other quantities when they are the subject of manufacturer's guarantees referring to this standard.

When a tolerance in one direction is omitted, there is no limit on the value in that direction.

Table 6 – Tolerances

Quantity	Subclause	Tolerances
1. Winding resistance	13.2.5	≤10 % ^{a)}
2. a) Total losses b) Component losses	13.2.7, 13.2.9, 13.2.10	+10 % of the total losses. +15 % of each component loss provided that the tolerance on total losses is not exceeded
3. Voltage ratio at no-load on the principal tapping. Rated voltage ratio	13.2.6	±0,5 % of the ratio declared on the rating plate, or a percentage of the declared ratio equal to 1/10 of the actual percentage impedance voltage at rated load, whichever is the lesser value
4. Impedance voltage for principal tapping	13.2.8	±10 % of the declared impedance voltage for that tapping. Individual winding shall not deviate more than 3 % from the average value of identical windings inside the same transformer; unless otherwise agreed between purchaser and manufacturer ^{b)}
5. No-load current	13.2.7	+30 % of the declared no-load current
6. Total mass	13.2.4	Type test: ±10 % (total mass < 100 kg) ±5 % (1 000 kg > total mass ≥ 100 kg) ±3 % (total mass ≥ 1 000 kg) Series production: ±3 %
^{a)} For series production a lower tolerance is expected and shall be provided by the manufacturer depending on wire size and winding tolerances. ^{b)} Smaller tolerance shall be subject to agreement between purchaser and manufacturer.		

13.2.3 Visual checks (type, routine test) and functional tests (optional type and routine test)

Visual checks: mechanical interfaces (dimensions, markings, etc.), configuration level and rating plate.

Functional tests: on all auxiliaries (for example: oil flow indicator, voltage and current measurement devices, cooling system, etc.).

Upon agreement between the purchaser and manufacturer, additional type tests could be carried out.

13.2.4 Mass (type and optional routine test)

The transformer shall be weighed with all accessories included in the scope of supply.

If it is not possible to measure mass with the above mentioned parts combined, the parts shall be measured individually.

13.2.5 Measurement of winding resistance (type and routine tests)

The resistance of each winding between accessible terminals shall be measured when cold with direct current. Reference should be made to IEC 60076-1 for the precautions to be taken for the minimization of self-inductive effects and the proper determination of the temperature of the windings. The temperature at which the measurement is taken shall also be recorded.

Resistance of winding shall be corrected to reference temperatures from Table 7 according to IEC 60076-1:2011, Annex E.

Table 7 – Reference temperatures

Thermal class of insulation system	Reference temperature °C
105(A) 120(E)	85
130(B)	130
155(F) 180(H) 200 220	150

Other values of reference temperature can be found in IEC 60076-1 and IEC 60076-11 and can be used for transformers/inductors by agreement between purchaser and manufacturer.

For type tests:

- a) if a winding is provided with tapplings for the regulation of the voltage of the traction circuit, the total resistance of the live portion of the said winding shall be measured for each tapping;
- b) if certain auxiliary windings have several sections, the resistance of each shall be measured.

For routine tests:

- c) measurement a) may be limited to the principal tapping of the winding;
- d) measurement b) may only be carried out on the whole of the auxiliary winding.

13.2.6 Measurement of voltage ratio, polarities and vector groups (type and routine tests)

The various voltage ratios between pairs of windings shall be measured for all accessible tapplings of these windings.

If a transformer with a high-voltage control has several traction secondary windings and if correct voltage ratios have been recorded during measurement made between these secondary windings, it will be sufficient to measure the voltage ratio between one of these secondary windings and the line-side winding for all the tapplings of the latter.

The measurement of the voltage ratio of a fixed ratio traction transformer forming a part of a transformer with high-voltage control is a type test.

Together with the voltage ratio measurement, the polarities and vector groups shall be checked according to IEC 60076-1.

13.2.7 Measurement of no-load primary current and losses (type and routine tests)

13.2.7.1 General

Measurement shall be made at rated frequency, the waveform of the applied voltage being sinusoidal.

In case of a non-sinusoidal test voltage, reference should be made to IEC 60076-1 for the method of correction which may be used. The voltage shall be applied to a suitable winding of the transformer; if the transformer has high-voltage control, the tap changer and the primary of the fixed ratio traction transformer shall remain in circuit but, in any case, all other windings shall be open-circuited.

Current measurement shall include mean and total r.m.s. values.

13.2.7.2 Type test

The measurement of the no-load current and losses shall be made for line-side voltages of $U_{\min 2}$, $U_{\min 1}$, U_n , $U_{\max 1}$ and $U_{\max 2}$ (IEC 60850). Other values may be considered if agreed between manufacturer and purchaser.

For an auxiliary transformer, the peak no load current shall be measured at U_r , and if required at 1,1 U_r and 1,2 U_r .

If the transformer has tapplings or is specified for multi-voltage operation, the measurements shall be made for specified tapplings or voltages, one of them corresponding to the principal tapping.

The purchaser may require the voltage and current waveforms and harmonic analysis.

13.2.7.3 Routine test

The measurements shall be made as in 13.2.7.2 but only for rated voltage U_r and for the principal tapping.

13.2.8 Measurement of impedance voltages or short-circuit impedances (type and routine tests)

13.2.8.1 General

Due to the diversity of winding arrangements of traction and auxiliary transformers, all the combinations in pairs of windings on which impedance voltages are to be measured shall be fixed by agreement between purchaser and manufacturer. The type tests should provide sufficient data to allow plotting of the on-load characteristics of the transformer on all positions of the tap changing equipment as well as for calculating the fault currents.

Impedance voltages shall be measured according to the procedure in IEC 60076-1 for the following combinations of windings:

- a) line-side winding to all traction windings in common (type and routine tests);
- b) line-side winding to each group of windings commutating at, or almost, the same time (type test);
- c) line-side winding to each independent traction winding separately (type and routine tests);
- d) line-side winding to each auxiliary winding separately (type test).

In type tests a), b) and c), measurements shall be taken on all tapplings, while for type test d) and for the routine tests measurements need only be taken on the principal tapping for the line-side winding and on a specified tapping for the auxiliary windings.

If additional measurements on other windings or in other combinations of windings are required, these shall be agreed between purchaser and manufacturer. The impedance voltage shall be measured at rated frequency using an approximately sinusoidal voltage supply. The measurements may be made at any current between 25 % and 100 % of the rated current. The voltage applied to any winding should not exceed 50 % of the rated voltage of the said winding and the current through it should not exceed its rated value.

The measured value shall be corrected by increasing it in the ratio of rated current to test current. The values so derived shall be corrected to the appropriate reference temperature indicated in Table 7.

The short circuit impedance shall be derived from the impedance voltage and split into short-circuit resistance and inductance (see IEC 60076-1:2011, 3.7).

13.2.8.2 Measurement of differential inductance (type test)

If required, for non-linear short-circuit inductance characteristics, the differential inductance shall be measured according to 13.3.7.4.

The purchaser may require to measure the variation of impedance (resistance and inductance) with frequency.

13.2.9 Measurement of fundamental load losses (type and routine tests)

13.2.9.1 General

Fundamental load losses shall be recorded during the impedance voltage type and routine tests (see 13.2.8) and the values so obtained shall be corrected by multiplying them by the square of the ratio of rated current to test current.

The fundamental load losses so derived shall be corrected to the appropriate reference temperature given in 13.2.8.1, taking the I^2R (R = d.c. resistance) as varying directly with resistance and all the other losses varying inversely with resistance. Resistance shall be determined as specified in 13.2.5.

Fundamental load losses shall be determined for the following combinations in pairs of windings:

- a) Line-side winding/all traction secondary windings in parallel or in series, as appropriate.
- b) Line-side winding/each one of the auxiliary secondary windings.

Fundamental load losses shall be corrected to reference temperatures from Table 7 according to IEC 60076-1:2011, Annex E.

NOTE 1 The total losses for all circuits cannot be obtained by simple arithmetic addition of the losses measured on pairs of windings as prescribed above.

NOTE 2 They may in some cases be calculated from the d.c. resistance of each winding and the appropriate current, adding the additional losses derived from the tests.

13.2.9.2 Type test

Fundamental load losses shall be determined for combinations a) and b) defined in 13.2.9.1. For combination a), the determination shall be made for three positions of the tap changing equipment corresponding respectively:

- to the principal tapping;
- to the tapping giving the highest load losses in the traction windings;
- to another tapping.

13.2.9.3 Routine test

Fundamental load losses shall be determined for combination a) of 13.2.9.1 only and limited to the principal tapping.

13.2.10 Determination of total losses (type test)

The total losses are the sum of the no-load losses (13.2.7), and the load losses (13.2.9 fundamental and harmonics) after correction of the latter to the appropriate reference temperature of the windings, which is given in Table 7. Harmonic losses induced by converter operation shall be calculated according to IEC 61378-1:2011, Annex A, or any other method to be agreed between purchaser and manufacturer, and will be added to the losses measured at fundamental frequency.

The total losses for the traction circuits of a traction transformer are calculated for the principal tapping and for the tapping giving the highest traction load losses.

The total losses for the traction transformers are calculated for the combination of rated traction load and rated auxiliary circuit loads. Subject to agreement between purchaser and manufacturer, the losses associated with the train heating load are usually included in this calculation. The power consumption of the transformer auxiliary equipment (oil pump, fan, etc.) is not included in its total losses.

Unless otherwise specified, for transformers other than traction transformers, the total losses are calculated for rated load in all windings simultaneously.

13.2.11 Temperature-rise test (type test)

13.2.11.1 General

The details of the temperature-rise test conditions are subject to agreement between purchaser and manufacturer.

The temperature-rise test shall be performed:

- a) at the rated power/current of the transformer/inductor (see Clause 6) in order to determine the thermal parameters for inclusion in the conformity assessment report;
- b) and, unless otherwise agreed, in the overload conditions; in order to verify that the maximum short time temperatures will not exceed the limits of Tables 3 and 4;

and in two steps:

- step 1 – A temperature-rise test shall be performed in the factory of the manufacturer, at rated current/power with constant a.c. or d.c. current, unless the manufacturer is able to reproduce the specified waveforms;
- step 2 – If step 1 has not been performed with the specified waveforms, an additional test shall be performed on a test bench with the associated converter.

NOTE 1 For a dry-type transformer/inductor mounted inside a cubicle, step 2 using equivalent load connected to the converter is also used to validate the impact of the installation on the temperature-rises.

NOTE 2 For a liquid immersed transformer/inductor the purpose of step 2 is to measure the harmonic losses.

Tapped windings shall be tested at their maximum losses tap or other specified tapping.

During the test, all accessories for circulation and cooling of the cooling medium are arranged in conditions equivalent to those obtained on the vehicle (e.g. specified clogging of heat exchanger and external pressure drop, etc.).

The temperature of oil pump, fan motors and heat exchanger mounted on the transformer/inductor shall be measured and checked against their operating temperature range.

Specific temperature tests may be agreed between the purchaser and the manufacturer to validate the different modes of the cooling system (e.g. operation with motor fans at reduced speed or with only one pump).

For transformers/inductors with forced-air cooling, or similar type of cooling as covered in 9.2.3, the test shall be carried out with the specified air flow or velocity, or with the calculated air flow taking into account the additional external pressure drop resulting from transformers/inductors integrated on the vehicle.

The purchaser shall define the temperature of the cooling medium at the external interface of the transformer/inductor.

13.2.11.2 Temperature determination methods

Three methods shall be used to determine temperature, depending on the test performed:

a) direct temperature measurement:

the temperature is measured directly with a temperature sensor (resistive thermometer, thermocouple, optical fiber, temperature sensitive sticker, infrared camera, etc.);

b) indirect temperature measurement:

the temperature is derived from the measurements of other physical parameters such as voltage, current, resistance, etc. For instance, the average temperature of a winding can be determined from the variation of the d.c. resistance;

c) temperature calculation method:

sometimes the zone where maximum temperature may exist is not easily accessible for direct measurement of the temperature. In such cases, the temperature is directly measured at a point close to the critical zone. The temperature-rise from this point to the critical zone of maximum temperature shall then be calculated. The manufacturer shall be able to provide information about the calculation method and the results of tests on a similar transformer/inductor used as reference.

13.2.11.3 Temperature-rise test of liquid-immersed type transformers/inductors

For liquid-immersed transformers and inductors, it is not always practical to measure directly hot-spot temperatures.

The hot-spot winding temperatures can be determined by direct measurement as a special test by agreement between manufacturer and purchaser.

Otherwise, the hot-spot winding temperature-rise shall be determined through calculation based on the result of a temperature-rise test as follows:

- the average temperature of the winding shall be measured (indirect temperature measurement by variation of d.c. resistance);
- the manufacturer shall submit to the purchaser the results of a study concerning the location of the hot-spots, and the relation between the hot-spot temperature and the winding average temperature.

The study should be based on:

- the leakage flux field and the distribution of additional losses;
- the circulation pattern of the insulating liquid inside the windings in the areas where the additional losses are higher.

In the factory of the manufacturer, temperature-rises shall be established in three steps:

– step 1 – liquid temperature-rise test:

This test shall be carried out by injecting a test current in the windings which will generate the total losses of the transformer/inductor according to 13.2.10 and the total losses of other components inside the same tank.

If agreed between purchaser and manufacturer the test can be carried out with lower losses, but not less than 80 % of total losses, and extrapolated to total losses according to 13.2.10.

For a multiple voltage transformer/inductor the voltage system generating the highest losses shall be considered.

The following data shall be measured:

- liquid temperature at heat exchanger inlet and outlet;
- cooling medium temperature at the external interface and flow rate.

– step 2 – Winding temperature-rise tests:

This test shall be carried out with the rated current injection method according to IEC 60076-2 for each line voltage system.

If agreed, this test shall also be performed in specified overload conditions.

– step 3 – Test consolidation:

After the temperature-rise tests the manufacturer shall consolidate the results and calculate oil and winding temperatures for the specified conditions (including the installation constraints) and shall submit the conformity assessment report to the purchaser.

At this stage the calculation shall include all current components affecting the core and winding temperatures during normal equipment operation which were not possible to reproduce during the previous steps 1 and 2. (e.g. harmonic losses).

Load profile temperatures shall be calculated based on the test results.

The standard method for the determination of the winding temperature-rise is current injection. For transformers current injection is achieved by the short-circuit method according to IEC 60076-2.

In special cases, if agreed, the test can be performed applying rated voltage and current by connection to a suitable load. This is mainly applicable to transformers with low rated power.

A back-to-back method may also be agreed. In this method, two transformers, one of which is the transformer under test, are connected in parallel and excited at the rated voltage of the transformer under test. By means of different voltage ratios or an injected voltage, rated current is made to flow in the windings of the transformer under test.

Some guidance can be found in IEC 60076-2 for:

- a) terms and definitions;
- b) the measurement of various temperatures;
- c) the duration of tests;
- d) the determination of liquid and winding temperatures;
- e) necessary corrections of measurements.

13.2.11.4 Temperature-rise test of dry-type transformers/inductors

In dry-type transformers/inductors:

- the temperature gradient between the hot-spot and the average temperature of the winding, or the surface temperature of the winding, may be significantly high;
- thermal coupling between core(s) and windings may be strong;
- temperature sensors are easier to fit.

For direct measurement of the temperature, temperature sensors shall be fitted in positions, to be agreed between manufacturer and purchaser.

In addition, the average temperature of the windings shall be measured indirectly by the variation of their d.c. resistance.

The gradient between sensor readings and the average temperature of the windings shall be examined to help confirm that the hotspot of each winding has been measured.

In the factory of the manufacturer, temperature-rises shall be established in three steps, unless otherwise agreed:

- step 1 – Current injection test:

A test current shall be injected in the windings which will generate the total losses of the transformer/inductor according to 13.2.10, until the steady state condition of the windings and magnetic core are reached.

For transformers current injection is achieved by the short-circuit method.

The ultimate temperature-rise is reached when the temperature-rise becomes constant; this is considered to have been achieved when the temperature-rise does not vary by more than 2 K per hour in the windings and the magnetic core(s). The winding temperatures shall then be measured.

If agreed between purchaser and manufacturer the test can be carried out with lower losses, not less than 80 % of the total losses, and extrapolated to total losses according to 13.2.10.

- step 2 – Open-circuit test (for transformer only):

The open-circuit test, at rated voltage and rated frequency, shall be continued until steady state condition of the winding(s) and magnetic core(s) is obtained. The individual winding temperature-rises shall then be measured.

The open-circuit test can be carried out before or after the current injection test.

- step 3 – Test consolidation:

The total winding temperature-rise of each winding, with losses in the winding(s) and normal excitation of the core(s), shall be calculated by the manufacturer who shall submit a conformity assessment report to the purchaser.

This calculation shall include all current components affecting the core and winding temperatures during actual equipment operation but which were not possible to reproduce during step 1 and 2.

For example, core and winding losses related to harmonics are included at this stage. If applicable, special attention is paid to the contribution of harmonic losses generated in a core (e.g. in the shunt core of a transformer with integrated inductor).

The core contribution to winding hot-spot temperature-rise at no load should be the value given below or the value measured by the manufacturer during the temperature-rise test on the transformer/inductor:

- 5 K for outer winding;
- 25 K for inner winding.

Load profile temperatures shall be calculated based on the test results.

In special cases, if agreed, the test can be performed applying rated voltage and current by connection to a suitable load. This is mainly applicable to transformers with low rated power.

A back-to-back method may also be agreed.

13.2.11.5 Correction of temperature determinations

Temperature measurements may need to be corrected before being checked against the criteria:

- when the average temperature of a winding is determined from the variation of the d.c. resistance, it shall be extrapolated at the instant of shutdown according to IEC 60076-2;
- if the specified values of injected power or current have not been obtained during the temperature-rise test, the results shall be corrected according to IEC 60076-2 for immersed-type transformers/inductors and IEC 60076-12 for dry-types. This correction shall include the effect of temperature on the d.c. resistance and consequently on the losses (this is an iterative calculation process);
- if the temperature-rise test has not been performed at the specified cooling medium temperature, the results shall be corrected to take into account the effect of temperature on the d.c. resistance and consequently on the losses (this is an iterative calculation process): see 13.2.9.1 for guidance.

13.2.11.6 Temperature-rise test criteria

The test is declared successful if, for any component of the transformer/inductor:

- The consolidated hot-spot temperature, at rated power/current (see 6.2 and 7.3) and reference cooling medium temperature:
 - either, does not exceed the temperature limit agreed between purchaser and manufacturer;
 - or, is compatible with the specified lifetime; a method and an example to evaluate lifetime is given in Annex B (informative) and Annex C (informative);
- The consolidated hot-spot temperature, in the worst case conditions does not exceed the temperature of Tables 3 and 4.

13.2.12 Insulation resistance test (optional type and routine test)

Before starting the dielectric tests, the insulation resistance shall be measured by a megohmmeter applying at least 1 000 V d.c. between windings and between winding and the earth. Oil temperature at test shall be recorded. If required the insulation resistance measurement shall be repeated after test completion.

The insulation resistance shall be higher than the value agreed between purchaser and manufacturer.

13.2.13 Dielectric tests (type and routine tests)

13.2.13.1 General

The dielectric tests on new transformers/inductors are carried out in the manufacturer's workshop with the transformer/inductor at room temperature and equipped with those accessories which could influence the tests.

The relevant standards are IEC 60076-3 and IEC 60060-1 and IEC 60060-2.

The clearance and creepage distances should be checked following IEC 62497-1 for all the parts that are not immersed in the dielectric fluid.

In view of the number of likely variations, the arrangement of connections to be adopted for these tests shall be defined in each particular case.

However:

- the earth connection shall be retained on those points of the windings which are so connected in service;
- all non-tested conductive parts such as core, frame, tank or casing of the transformer/inductor, temperature sensors, dielectric screens, shall be connected to earth;
- for traction transformers with high-tension control, the tap changer shall be connected to the principal tapping.

Dielectric tests include:

- induced voltage withstand tests (see 13.2.13.2);
- separate source voltage withstand tests at industrial frequency (see 13.2.13.3);
- in addition, for dry-type transformers/inductors, wet dielectric tests may be required by the purchaser according to Annex D (informative);
- lightning impulse voltage withstand test (see 13.2.13.4);
- voltage between terminals withstand test (see 13.2.13.5);
- partial discharge measurement (see 13.3.11).

For induced and separate source voltage tests, the test voltages to be used are given as r.m.s. values in Table 8. The direct measurement of r.m.s. voltage may be replaced by the measurement of the voltage peak value; this peak value divided by square root of two should be equal to the r.m.s. value given in the Table 8.

The dielectric test voltages of Table 8 are defined for a basic insulation of the transformer/inductor.

For all windings connected to a power converter generating steep voltage waves:

- the purchaser shall specify the recurring peak voltage amplitudes (U_{mT} and U_{mG}), the d.c. link voltage, the voltage rise rate and the repetition frequency;
- a detailed design review should be carried out to ensure that the insulation concept has taken into account recurring dielectric stresses induced by the high dv/dt and the associated voltage overshoot.

Table 8 – Dielectric test voltage

Nominal voltage U_n [V]	Rated insulation voltage U_{Nm} (up to and excluding) [V] ^{a)}	Winding directly connected to the contact line or protected according to OV3 U_a/U_{Ni} [kVr.m.s./kVpeak]	Winding protected according to OV2 U_a/U_{Ni} [kVr.m.s./kVpeak]
600	720	3,3 / 5	2,8 / 4
750	900	4,0 / 6	3,4 / 5
1 500	1 800	6,0 / 12	5,6 / 10
-	2 300 ^{b)}	7 / 15,5	6,6 / 12
3000	3 700	11,5 / 25	10 / 18
-	4 800 ^{b)}	13 / 25	11,6 / 18
-	6 500 ^{b)}	17 / 30	15 / 25
11 000	17 250	38 / 95	N.A.
12 000	17 250	38 / 95	N.A.
12 500	17 250	38 / 95	N.A.
15 000	17 250	38 / 95	N.A.
20 000	24 000	44 / 125	N.A.
25 000	27 500 ^{c)}	60 / 150	N.A.
50 000	60 000	120 / 300	N.A.

NOTE The windings directly connected to the contact line shall be protected by an overvoltage protection. OV3 and OV2 only are considered.

a) For lower voltages refer to IEC 60077-1.

b) This voltage is used for intermediate d.c. link voltages.

c) For higher U_{Nm} , test voltages shall be agreed between purchaser and manufacturer.

13.2.13.2 Induced voltage withstand test (type and routine test)

The main purpose of this test is to check insulation between turns, coils and tapings of all the windings concerned.

For all windings which have one extremity or one tapping permanently earthed, this test constitutes simultaneously a separate source voltage withstand test for the non-earthed extremity of the winding.

During the test, one end of the coupled windings other than the one used for the supply, shall be connected to earth by one of their terminals.

The test voltages U_a shall be according to Table 8 unless otherwise agreed.

An alternating voltage shall be applied to the terminals of one winding of the transformer. The form of the voltage shall be as nearly as possible sinusoidal and its frequency shall be sufficiently above the rated frequency to avoid excessive magnetizing current during the test.

The peak value of the induced test voltage shall be measured. The peak value divided by square root of two shall be equal to the test value.

The test shall be commenced at a voltage not greater than one-third of the test value and the voltage shall be increased to the test value as rapidly as is consistent with measurement. At

the end of the test, the voltage shall be reduced rapidly to less than one-third of the test value before switching off.

The test time at full test voltage shall be 60 s for any test frequency up to and including twice the rated frequency, unless otherwise specified. When the test frequency exceeds twice the rated frequency, the test time in s of test shall be:

$$120 \times (\text{assigned frequency} / \text{test frequency}) \text{ but not less than 15 s.}$$

During the induced voltage test on a winding, care should be taken that the voltages induced in the various windings on the same magnetic circuit do not exceed the maximum test values.

For auxiliary transformers, unless otherwise specified, the induced voltage will be $2 \times U_r$ (rated voltage). See IEC 60076-3.

For traction transformers primary winding, the test voltages listed in Table 8 will apply.

For auxiliary transformers, the induced voltage test also realizes a phase-to-phase voltage test.

The induced test set up for traction transformer and for auxiliary transformer is shown in Figure 1. Note that the supply can be made from primary or secondary side for the auxiliary transformers.

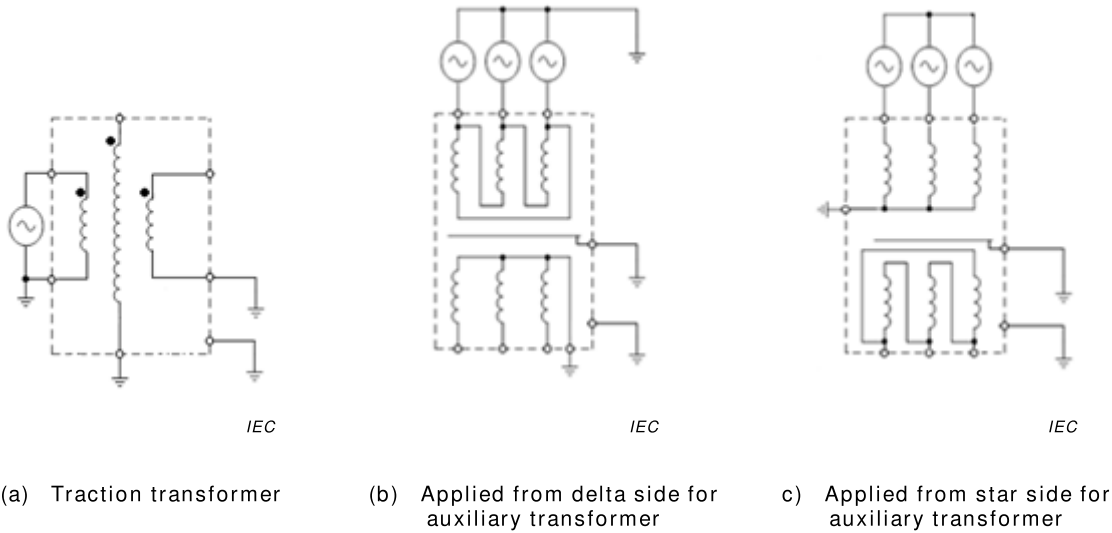


Figure 1 – Examples of set up for induced voltage withstanding tests

The test is successful if voltage and current remain stable during the test.

13.2.13.3 Separate source voltage withstand test (type and routine test)

The purpose of this test is to check the insulation between groups of windings, windings and to earth. See Figure 2.

This test is applicable to all windings of transformers. The separate source voltage test shall be made by using a separate source, supplying an alternative single-phase voltage, which shall be applied in turn between each of the windings to be tested and all terminals of the remaining windings, connected together to earth. For the waveshape of the test voltage, the

minimum frequency, the details for applying the voltage of test, reference should be made to IEC 60076-3.

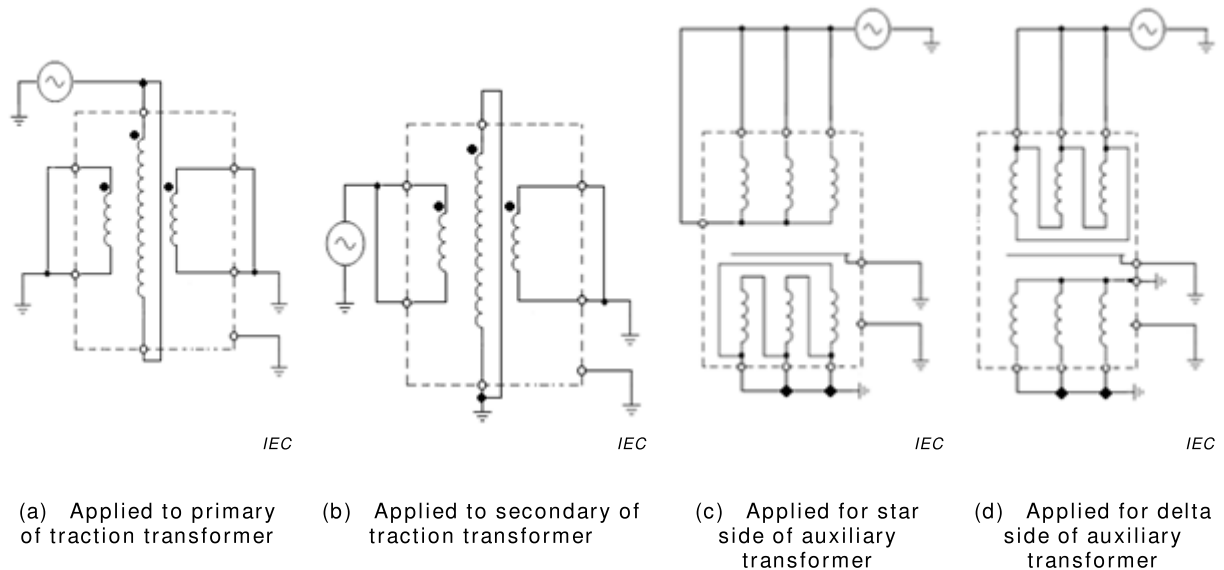


Figure 2 – Examples of set up for separate source voltage withstanding tests

The test voltage shall be according to U_a in Table 8, and the full test voltage shall be applied for 60 s.

Windings connected to the contact line with non-uniform insulation and not permanently earthed in the transformer shall be subjected to a separate source voltage withstand test at a voltage value to be agreed between purchaser and manufacturer.

The test is successful if voltage and current remain stable during the test.

13.2.13.4 Lightning impulse voltage withstand test (type test)

13.2.13.4.1 General

The purpose of this test is to check the winding internal, coil to coil and coil to earth insulations against lightning overvoltage and fast transients. This test is mandatory for traction and auxiliary transformer windings directly supplied from the contact line.

During the test:

- all non-tested accessible terminals shall be directly earthed (see Figure 3);
- the earthed end of the line-side winding shall be earthed either directly or through an impedance of low value;
- any overvoltage protective devices associated with the line-side terminal in service shall be removed or disconnected;
- if high-tension control is used, the tap changer shall be connected to the principal tapping.

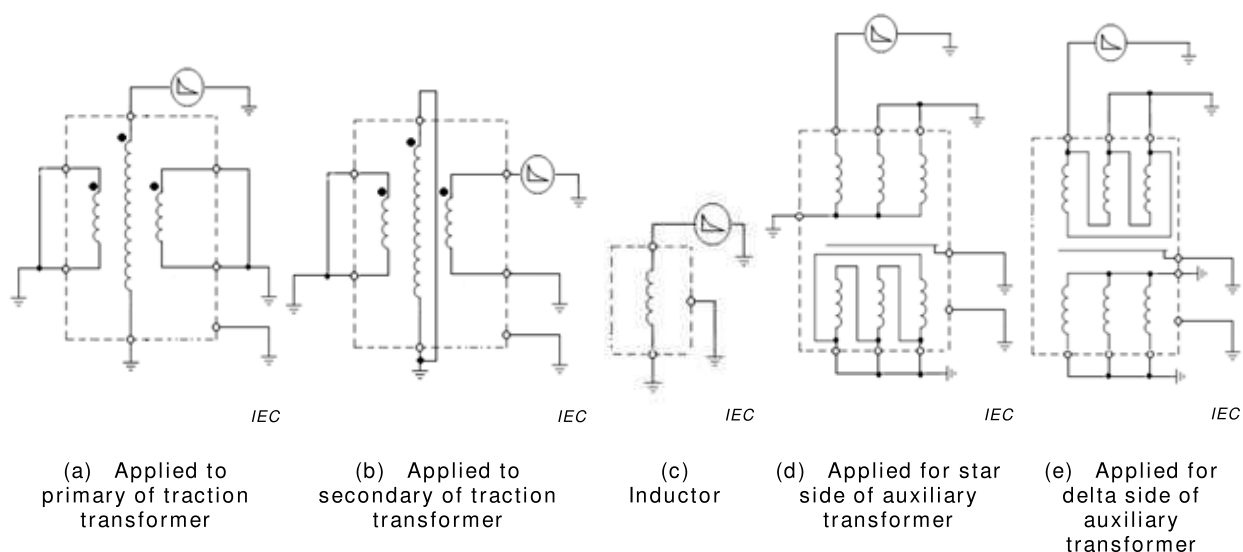


Figure 3 – Examples of impulse test connections for traction, inductor and auxiliary transformers

The test impulse shall be a full standard lightning impulse: $1,2 \mu\text{s} (\pm 30 \%) / 50 \mu\text{s} (\pm 20 \%)$.

Unless otherwise agreed, the peak value of the applied voltage shall be U_{Ni} according to Table 8.

There are cases, however, where this standard impulse shape cannot reasonably be obtained, because of low winding inductance or high capacitance to earth. The resulting impulse shape is then often oscillatory. Wider tolerances may, in such cases, be accepted by agreement between purchaser and manufacturer. See IEC 60076-4.

When the low-voltage winding cannot be subjected to lightning overvoltages from the low voltage system, this winding may, by agreement between manufacturer and purchaser, be impulse tested with surges transferred from the high-voltage winding. The method is described in IEC 60076-3.

When the neutral terminal is connected to the earth, impulse voltage withstand test for the neutral terminal is not required.

When the neutral terminal of a winding has a specified impulse withstand voltage, the test is carried out according to IEC 60076-3.

13.2.13.4.2 Test sequence

The test sequence shall consist of one impulse of a voltage between 50 % and 75 % of the full test voltage, and three subsequent impulses at full voltage. If, during any of these applications, an external flashover in the circuit or across a bushing spark gap should occur, or if the oscillographic recording should fail on any of the specified measuring channels, that application shall be disregarded and a further application made.

13.2.13.4.3 Test criteria

The absence of significant differences between voltage and current transients recorded at reduced voltage and those recorded at full test voltage constitutes evidence that the insulation has withstood the test. The detailed interpretation of the oscillographic or digital test records and discrimination of marginal disturbances from true records of failure require a

great deal of skill and experience. Further information is given in IEC 60076-4. If there is doubt about the interpretation of possible discrepancies between transient records, three subsequent impulses at full voltage shall be applied, or the whole impulse test on the terminal shall be repeated.

The test shall be considered successfully passed if no further and progressive deviations are observed. Additional observations during the test (abnormal sound effects, etc.) may be used to confirm the interpretation of the transient records, but they do not constitute evidence in themselves. Any difference in the wave shape between the reduced full wave and final full wave detected by comparison of the two current transient records may be an indication of failure or deviations due to non-injurious causes. They should be fully investigated and explained by a new reduced wave and full-wave test. Examples of possible causes of different wave shapes are operation of protective devices, core saturation, or conditions in the test circuit external to the transformer.

13.2.13.5 Voltage between terminals withstand test (optional type test)

The voltage between terminals withstand test shall be carried out according to 13.3.10.4.

This test is only applicable to transformer windings repeatedly subjected to steep front voltage waveforms.

NOTE For example this test is not applicable to the line side winding of a traction transformer or to the windings of 3ph transformer supplied through a sinusoidal filter, etc.

13.2.13.6 Cabling dielectric test (type and routine test)

The low voltage cabling (auxiliary) shall be tested with voltage level according to IEC 62497-1.

This subclause applies only to galvanic insulated conductors used for low voltage circuits and auxiliary components supply (ex: thermal sensor, pump, etc.).

13.2.14 Partial discharge test (type or optional routine test for dry-type, investigation test for immersed type)

The purpose of this test is to evaluate the ability of the insulation system to perform over lifetime. The principle is to perform partial discharge measurements to verify that the transformer/inductor will operate safely under normal conditions. For immersed type transformers/inductors partial discharge investigation tests may be agreed between purchaser and manufacturer referring to IEC 60076-3 for the induced voltage test. In case of plug-in bushing transformers/inductors, an appropriate method shall be adopted to avoid partial discharge within the bushing.

Further information about partial discharge measurements may be obtained in IEC 60270.

For dry-type transformers/inductors this is a type test. This test may be required by the purchaser as a routine test. The test shall be performed as follows. The level of apparent charge Q and the voltage are measured when a r.m.s. a.c. voltage (50 Hz or 60 Hz) is applied (separate source voltage) in turn between each of the windings to be tested and all terminals of the remaining windings connected to earth.

Up to six values shall be recorded during the test, according to Figure 4 and Table 9.

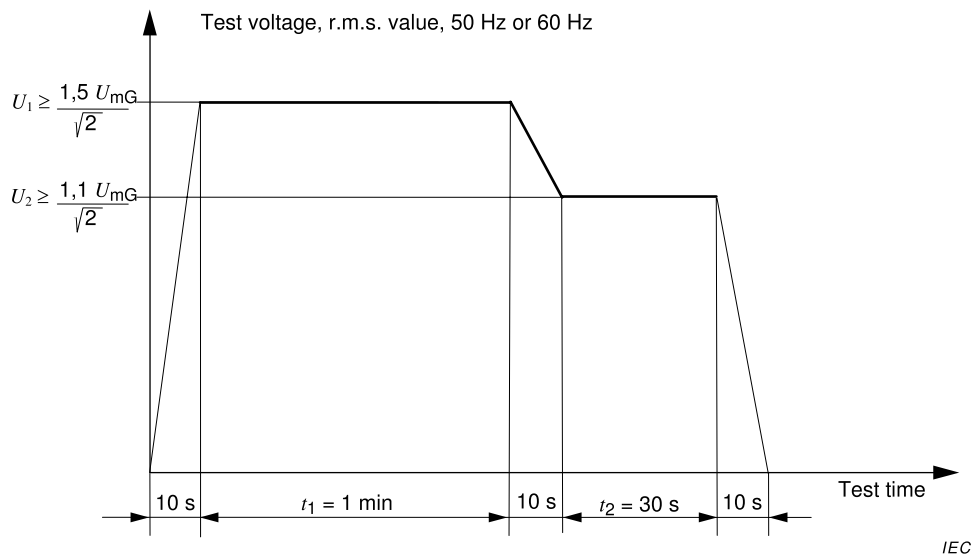


Figure 4 – Partial discharge test: voltage versus time

Table 9 – Partial discharge measurements

	Measure	Condition	Comment	Type or investigation test	Routine test
1	Q_{BG}	-	$Q_{BG} \ll Q_{MAX}$	X	X
2	U_i	at Q_{MAX}	$> U_2$	X	
3	Q_1	at U_1	-	X	X
4	U_e	at Q_{MAX}	$\geq U_2$	X	
5	Q_2	at U_2	$\leq Q_{MAX}$ and no continuing rising tendency during t_2 .	X	X
6	U_{e-tot}	at Q_{BG}	-	X	

he sequence is as follows:

- a) Before starting the test, the partial discharge background noise Q_{BG} is measured. The background noise should be considerably lower than the criterion Q_{MAX} in order to permit a sufficiently sensitive and accurate measurement of the inception and extinction voltage levels, and of the maximum permissible partial discharge magnitude Q_{MAX} .

The voltage is ramped up to U_1 in 10 s and is maintained for $t_1 = 1$ min (see Figure 4). During this time t_1 , some partial discharges may be observed.

U_1 shall be taken equal to $1,5 U_{mG} / \sqrt{2}$ minimum wherein U_{mG} is the highest recurring peak voltage across the insulation being tested.

- b) When raising the voltage:

- the inception voltage (U_i at which Q reaches or exceeds Q_{MAX}) shall be recorded;
- the discharge level Q_1 at U_1 shall be recorded.

- c) After t_1 , the voltage is decreased to U_2 in 10 s and maintained for $t_2 = 30$ s. During the last 5 s of t_2 , the level of partial discharge Q_2 is measured.

U_2 shall be taken equal to $1,1 U_{mG} / \sqrt{2}$ minimum.

- d) When decreasing the voltage:

- the extinction voltage (U_e at which Q drops below Q_{MAX}) shall be recorded;
- the discharge level Q_2 at U_2 shall be recorded.

If significant discharges are still observed at U_2 , the test voltage shall be further decreased until U_{e-tot} when discharges disappear (down to background noise Q_{BG}).

Acceptance criteria – The test is successful if:

- no collapse of the test voltage occurs;
- the partial discharge behaviour at U_2 does not show a continuing rising tendency;
- the continuous level of apparent charge Q at U_2 during the last 5 s does not exceed the permissible level Q_{MAX} , to be agreed between purchaser and manufacturer.

For example for dry-type components, Q_{MAX} is usually chosen between 10 pC and 50 pC. The value of Q_{MAX} is less important if the extinction is sharp.

For type or investigation test, if no significant discharges are observed at U_1 , the test voltage shall be increased until either discharges reach the discharge limit Q_{MAX} or until the voltage reaches the separate source withstand test voltage or the induced test voltage.

The type test should be carried out both in hot (e.g. see D.4.1) and cold (e.g. ambient temperature) conditions.

It may happen that partial discharge inception and extinction voltages are lower in hot conditions. If the routine test is carried out in cold conditions, the upper and lower test voltages (U_1 , U_2) shall be agreed between purchaser and manufacturer (however, U_1 shall never exceed U_a).

13.2.15 Short-circuit withstand test (optional type test)

13.2.15.1 General

When required by the purchaser, this test shall be requested in the tender specifications and agreed between purchaser and manufacturer upon order and shall be in accordance with IEC 60076-5.

The transformer/inductor together with all equipment and accessories shall be designed and constructed to withstand without damage the thermal and dynamic effects of external short circuits. The presence of an impedance and/or of protective devices (fuses, switches, etc.) in the corresponding circuits shall be taken into account. The short-circuit apparent power of the system at the transformer/inductor location shall be specified by the purchaser in his enquiry in order to obtain the short-circuit current to be used for the design and tests.

The thermal design shall be in accordance with IEC 60076-5.

The maximum value of short-circuit power available at the vehicle input shall be specified by the purchaser to the manufacturer.

The voltage to be taken into account is the maximum (U_{max1}) value of the traction system, as specified in IEC 60850.

For transformers, the test current peak value and the value of the symmetrical short-circuit current shall be calculated according IEC 60076-5.

Short-circuit currents for inductors shall be defined by the purchaser.

Unless otherwise agreed, the tests shall be carried out with protection accessories (pressure-relief device, etc.).

If the windings are provided with tappings, the reactance/inductance and, if required, also the resistance shall be measured for the tapping positions at which short-circuit tests will be carried out.

All the reactance/inductance measurements shall be to a repeatability of better than $\pm 0,2$ %. A report containing the result of the routine tests shall be available at the beginning of short-circuit tests.

13.2.15.2 Testing

To obtain the initial peak value of the current in the phase winding under test, the moment of switching on shall be adjusted by means of a synchronous switch. In order to check the values of the test currents, oscillographic records shall always be taken. In order to obtain the maximum asymmetry of the current in the phase winding, the switching-on shall occur at the moment the voltage applied to this winding passes through zero.

For single-phase transformers/inductors the number of tests shall be three, for three-phase transformers/inductors the number of tests shall be nine.

The duration of each test shall be 0,25 s with a tolerance of ± 10 %.

During each test, oscillographic recordings shall be taken of the applied voltages and the currents.

After each test, the oscillograms taken during test shall be checked.

13.2.15.3 Detection of faults and evaluation of test results

After completion the test, the external parts of the transformer/inductor shall be inspected. The results of the short-circuit reactance/inductance measurements and the oscillograms taken during the different stages of the tests shall be examined for any indication of possible anomalies during the tests, especially any indications of change in the short-circuit reactance/inductance.

Different procedures are followed at this stage for transformers/inductors. Unless otherwise agreed, the active part shall be removed from the tank (liquid immersed transformers/inductors only) for inspection of the core and windings and compared with its state before the test, in order to reveal possible apparent defects such as changes in lead position, displacements, etc., which, in spite of successful routine tests, might endanger the safe operation of the transformer/inductor.

Visual inspection of the supporting structure shall give no indication that there has been any change in mechanical condition that will impair the function of the transformer/inductor. If after the short-circuit test program the winding clamping system has deteriorated, or surface cracks have increased significantly in number or dimension, the transformer/inductor is considered to have failed the short-circuit test. In case of doubt, up to three more short-circuit tests with fully offset current shall be applied to verify that the monitored condition has stabilized. If the deterioration continues, the transformer/inductor shall be considered to have failed the test. If conditions stabilize after one or two extra short-circuit test and coupled with successful routine tests after short-circuit tests, the transformer/inductor shall be considered to have passed the short-circuit test.

All the routine tests, including dielectric tests at 80 % of the prescribed test value shall be repeated. If a lightning impulse test is specified, it shall be performed at this stage.

In order to consider the transformer/inductor as having passed the short-circuit test, the following conditions shall be fulfilled:

- the results of the short-circuit tests and the measurements and checks performed during tests do not reveal any conditions of faults;
- the routine tests have been successfully repeated, the lightning impulse test, if specified, and the wet dielectric tests for dry-type transformers/inductors, if specified successfully performed;
- if frequency response analysis (FRA) is required to evaluate the mechanical state of the windings, the results of measurements before and after short-circuit test shall be discussed between the manufacturer and purchaser. The method shall be according to IEC 60076-18 or the one defined in 13.2.20;
- the out-of-tank inspection does not reveal any defects such as displacements, shift of laminations, deformation of windings, connections of supporting structures, so significant that they might endanger the safe operation of the transformer/inductor;
- no traces of internal electrical discharge are found;
- the short-circuit reactance values, in ohms or the inductance in mH evaluated for each phase at the end of the tests, do not differ from the original values by more than:
 - 2 % for transformers/inductors with circular concentric coils and sandwich non-circular coils;
 - 7,5 % for transformers/inductors with non-circular concentric coils having a short-circuit impedance of 3 % or more. The value of 7,5 % may be reduced by agreement between manufacturer and purchaser but not below 4 %.

In addition, for dry-type transformers, wet dielectric tests may be required according to Annex D (informative).

13.2.16 Shock and vibration test (optional type test)

13.2.16.1 General

When required by the purchaser, this test shall be requested in tender specifications and agreed between purchaser and manufacturer upon order and shall be in accordance with IEC 61373.

The test is intended to highlight any weakness/error which may result in problems as a consequence of operation under environments where vibrations and shocks are known to occur in service of a railway vehicle. This is not intended to represent a full life test. However, the test conditions are sufficient to provide some reasonable degree of confidence that the equipment will survive the specified life under service conditions. The following tests are mandatory for compliance with standard IEC 61373:

- functional random test:
not required for transformer and inductor;
- simulated long-life test:
this test is aimed at establishing the mechanical integrity of the equipment at increased service levels. It is not necessary to demonstrate ability to function under these conditions;
- shock testing:
shock testing is aimed at simulating rare service events. It is not necessary to demonstrate functionality during this test. It will be however be necessary to demonstrate that no change in operational state occurs, that there is no visual deformation and that mechanical integrity has not changed. These points shall be clearly demonstrated in the final test report.

Before and after the test, the mechanical transfer function shall be established in order to verify the mechanical integrity and the resonance modes.

13.2.16.2 Testing

13.2.16.2.1 Simulated long-life testing at increased random vibration levels

Equipment shall be subjected to a total conditioning time of 15 h. This shall be normally divided into periods of 5 h conditioning in each of three mutually perpendicular axes.

If multi-axis testing is used, total duration is 5 h.

It is recommended to perform the test without resilient transformer/inductor fixation.

If during the course of testing overheating of equipment is felt to be a problem, it is possible to stop the test for a period of time in order to allow the equipment to recover. However, the total duration of 5 h vibration shall be achieved. If tests are stopped this fact shall be stated in the report. Tests shall be carried out during the long-life tests according to IEC 61373:2010 for category 1 class A or B to be specified by the purchaser.

13.2.16.2.2 Shock test

Equipment under test shall be subjected to a sequence of single half sine pulses tests according to IEC 61373:2010 for category 1 class A or B to be specified by the purchaser.

If for practical reasons the 5 g cannot be met it is allowed to reduce the value but not less than 3 g provided that the velocity change rate is respected.

13.2.16.2.3 Detection of faults and evaluation of test results

A visual inspection of the transformer/inductor shall give no indication that there has been any damage. Tightening torques shall be checked for mechanical and electrical fastenings. For a liquid type transformer/inductor the active parts shall be visually inspected. Any movable parts (paddles, oil level sensors, pump, fans, etc.) associated with the transformer/inductor shall be functionally tested.

The performance tests to be repeated after the shock and vibration tests, unless otherwise agreed between purchaser and manufacturer shall be:

For transformers:

- a) measurement of winding resistance;
- b) measurement of no-load current and losses;
- c) measurement of impedance voltage;
- d) induced voltage and/or separate source voltage withstand test;
- e) in addition, for dry-type transformers, wet dielectric tests may be required by the purchaser according to Annex D (informative).

For inductors:

- f) measurement of winding resistance;
- g) measurement of inductance;
- h) measurement of losses;
- i) separate source voltage withstand test;
- j) in addition, for dry-type inductors, wet dielectric tests may be required by the purchaser according to Annex D (informative).

If the results of the tests in items a) b) c) and/or f) g) h) in 13.2.16.2.3 show a difference of less than 2 % in respect to the values measured during original tests, the transformer/inductor is considered to have been satisfactorily tested for shock and vibration withstand. For the test

in items d), e), i) and j) the test voltage shall be 80 % of the values used for the original test. If a frequency response analysis is required to evaluate the mechanical state of the windings, the results of measurements before and after shock and vibration test shall be discussed between the manufacturer and purchaser. The method shall be according to IEC 60076-18 or the one defined in 13.2.20.

13.2.17 Voltage transmission ratio – VTR (optional type test)

The purpose of this test is to evaluate the highest capacitively transmitted voltage between primary and adjacent windings and to check if those windings are in the correct rated insulation voltage (U_{Nm}) class. Information about transmitted voltages can be found in IEC 60076-3.

An impulse or a.c. square wave low voltage source (e.g. 10 V; 1 A) and a maximum rise time of maximum 1,5 μ s is applied to the primary between the HV terminal and the other terminal connected to ground.

The relevant configuration (I, II, III) is chosen according to purchaser's connections scheme and the relevant secondary winding voltages are measured.

The first peak voltage extrapolated by the VTR factor to U_{Ni} for the primary should be lower than rated impulse voltage (U_{Ni}) of the secondary or the value specified by the purchaser.

The typical winding terminal configurations and the VTR test (grounded, capacitively maintained or highly resistive grounded) are summarized in Figure 5:

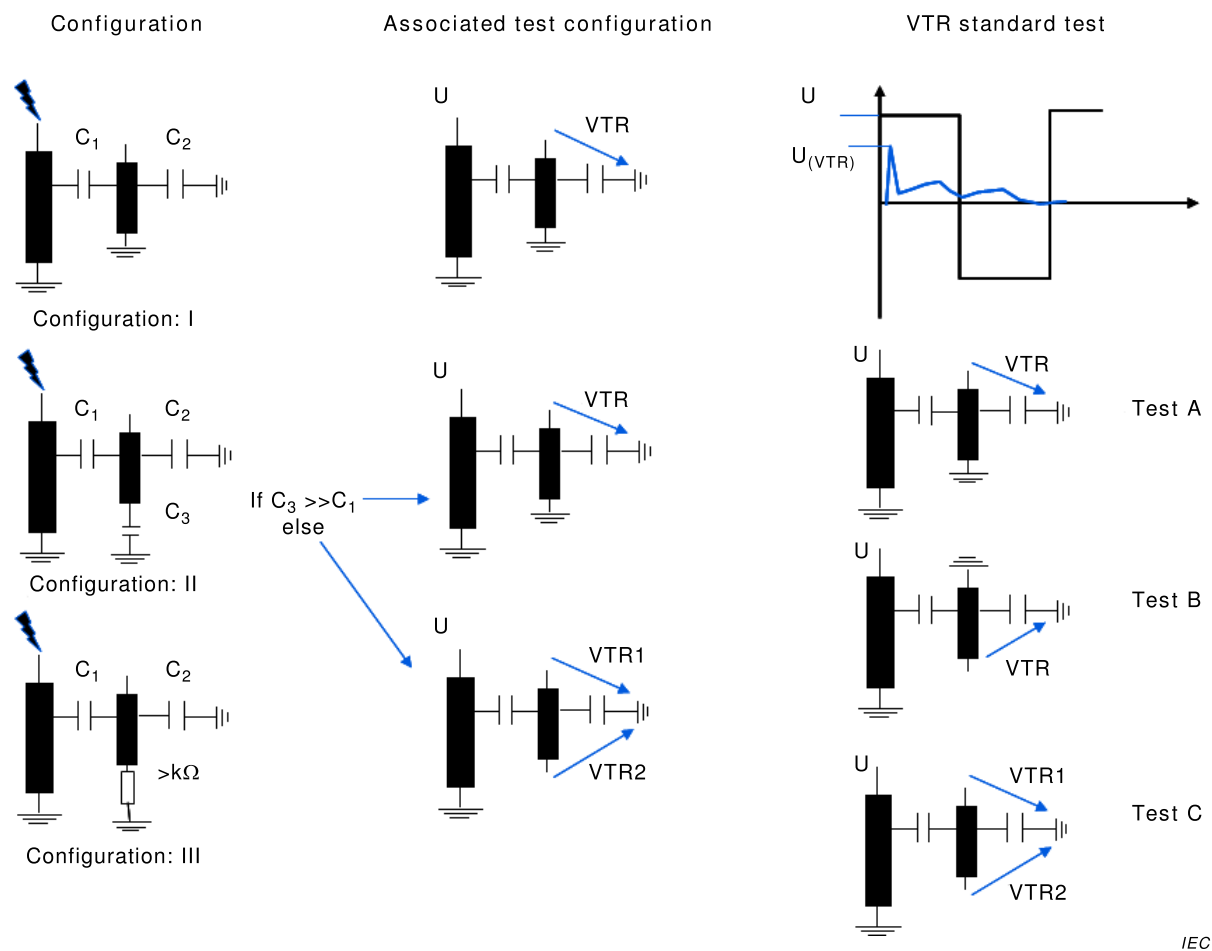


Figure 5 – Configurations for VTR test

13.2.18 Noise measurement (type test)

Noise level measurement shall be carried out according to IEC 60076-10 and specified cooling conditions.

For the sound intensity method ISO 9614-1 or ISO 9614-2 (when the setup of the test bench allows the presence of operator around the equipment) applies. For the sound pressure method ISO 3746 applies. The number of microphones may be increased to achieve the accuracy grade specified by the purchaser. In case the parallelepiped method is adopted measurement shall be performed on five surfaces:

- step 1 – the noise test shall be performed in the factory of the manufacturer, in the conditions defined in the IEC 60076-10 with sinusoidal supply, unless the manufacturer is able to reproduce the specified waveforms;
- step 2 – if step 1 has not been performed with the specified waveforms, an additional test shall be performed on a test bench or on the rolling stock with the associated converter.

13.2.19 Leakage magnetic flux density measurement (optional type test)

The leakage magnetic flux density shall be measured in specified points by applying specified current and checked against the specified limits.

Measuring points and limits shall be agreed between purchaser and manufacturer.

13.2.20 Electrical Frequency Response Analysis FRA (investigation test)

FRA may be used for diagnostic purposes and to estimate the current harmonics injected from secondaries linked to electronic converters into the primary.

The preferred FRA function is the ratio of the primary current divided by the secondary voltage which is applied to the transformer. The voltage shall be applied between secondary terminals and also between the secondary terminal shorted and earth. The measurement shall be performed over a frequency range up at least to 500 kHz.

The detailed measurement method shall be agreed between the purchaser and manufacturer.

13.2.21 Inrush current measurement (optional type test)

Inrush current is the transient magnetizing current flowing after connecting a transformer to the a.c. system. This current is highly asymmetric and depends on the remanent flux just before switch on and on the instant of switching the transformer. This current may be limited by a network requirement.

The measurement of inrush current needs precision on recording and a source of sufficient energy with a controlled switching off and switching on system.

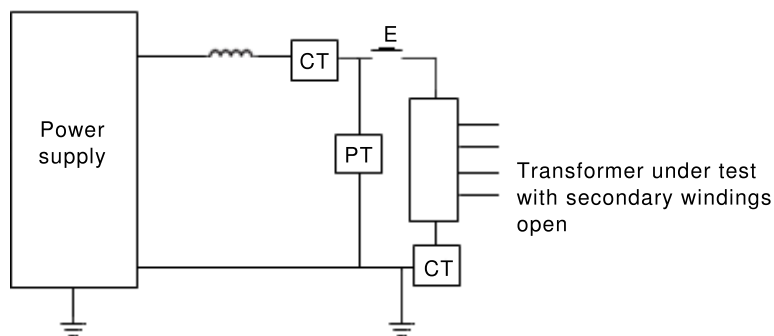
Following are the different stages for the measurement:

- a) create a remanent flux in the transformer core by suitable switching off at a precise point of the voltage wave;
- b) switch on the transformer at a voltage level U_{max1} , precisely at the point of zero voltage crossing;
- c) record the primary peak current and the supply voltage;
- d) measurement will be carried out for several times to obtain maximum current with a definite interval to allow the transients to diminish.

Acceptance criteria of primary inrush current shall be agreed between purchaser and manufacturer.

Example of test circuit (see Figure 6):

- e) the power supply should have enough capacity to obtain correct inrush current;
- f) the secondary windings are open.



IEC

Key
 CT Current transformer
 PT Potential transformer
 E Synchronised switch

Figure 6 – Example of test circuit

13.3 Tests on inductors

13.3.1 List of tests

The checks, measurements and tests to be made on inductors are indicated in Table 10 below which also stipulates the kind of test and the clauses to which reference should be made.

Table 10 – List of checks and tests to be made on inductors

Nature of test	Clause or Subclause		
	Type	Routine	Investigation
Visual checks	13.3.3	13.3.3	-
Mass	13.3.4	13.3.4 (optional)	-
Measurement of winding resistance	13.3.5	13.3.5	-
Determination of losses	13.3.6	-	-
Measurement of inductance	13.3.7	13.3.7	-
Temperature-rise test	13.3.8	-	-
Insulation resistance test	13.3.9 (optional)	13.3.9 (optional)	-
Wet dielectric tests	13.3.10.1 dry-type only (optional)	13.3.10.1 dry-type only (optional)	13.3.10.1 dry-type only (optional)
Separate source voltage withstand test	13.3.10.2	13.3.10.2	-
Lightning impulse voltage withstand test	13.3.10.3	-	-
Voltage between terminals withstand test	13.3.10.4	13.3.10.4	-
Partial discharge test	13.3.11 dry-type only	13.3.11 dry-type only (optional)	-
Short-circuit withstand test	13.3.12 (optional)	-	-
Shock and vibration test	13.3.13 (optional)	-	-
Vibration test with current flowing	-	-	13.3.14
Noise measurement	13.3.15	-	-
Leakage magnetic flux density measurement	13.3.16 (optional)	-	-

13.3.2 Tolerances

Table 11 gives tolerances applicable to certain rated quantities and to other quantities when they are the subject of manufacturer's guarantees referring to this standard.

When a tolerance in one direction is omitted, there is no limit on the value in that direction.

Table 11 – Tolerances

Quantity	Subclause	Tolerances
1. Winding resistance	13.3.5	≤ 10 % ^{a)}
2. Losses	13.3.6	+10 % of the total losses +15 % of each component loss provided that the tolerance on total losses is not exceeded
3. Inductance	13.3.7	±10 % of the declared inductance. Identical inductors shall not deviate more than 3 % from the average value, unless otherwise agreed between purchaser and manufacturer ^{b)}
4. Mass	13.3.4	Type test: ±10 % (total mass < 100 kg) ±5 % (1 000 kg > total mass ≥ 100 kg) ±3 % (total mass ≥ 1 000 kg) Series production: ±3 %
<p>a) For series production a lower tolerance is expected and shall be provided by the manufacturer depending on wire size and winding tolerances.</p> <p>b) Smaller tolerance shall be subject to agreement between purchaser and manufacturer e.g. for the tuned filter inductor.</p> <p>NOTE The impacts of tolerances shall be considered in the design phase and when evaluating the type test results.</p>		

For other values, if any, the tolerances shall be in accordance with IEC 60076-6.

13.3.3 Visual checks (type and routine test)

Visual checks shall be carried out according to 13.2.3.

13.3.4 Mass (type and optional routine test)

The inductor shall be weighed with all accessories included in the scope of supply.

13.3.5 Measurement of winding resistance (type and routine test)

The resistance of the winding(s) shall be measured with a direct current at ambient temperature, taking the usual care to minimize self-inductive effects. The temperature at which the measurement is made shall be recorded. The results shall be corrected to the reference temperature (see 13.2.5 and Table 7).

13.3.6 Determination of losses (type test)

The losses of alternating and pulsating current inductors shall be measured with a power frequency alternating current equivalent to the working current. The equivalent current shall be a r.m.s. value derived from the harmonic content or wave shape specified by the purchaser and shall take into account the estimated effect on the losses of the difference between the test and service condition.

The losses of direct current inductors shall be measured with direct current. Calculation of the losses in the magnetic core shall also be declared.

For inductors with a magnetic core or shield, the losses shall, whenever possible and unless otherwise agreed, be measured with a frequency and/or wave shape as close as practicable to the service.

13.3.7 Measurement of inductance (type and routine tests)

13.3.7.1 General

As a general rule, the type tests shall be carried out with a current appropriate to the type of inductor, whereas the routine tests may be made with an alternating current only or superimposed on a d.c. current. The value of the inductance specified or measured under these different conditions may not be the same and the manufacturer and purchaser shall agree the value to be used for the routine tests based on the results from the type test.

For coupled inductors, measurement of the mutual inductance (see IEC 60076-6) may be required as a type test.

The purchaser may require as additional type tests:

- the measurement of inductance variation with frequency;
- the measurement of inductance variation with temperature (e.g. for ferrite cores).

13.3.7.2 Measurements of a.c. inductance

13.3.7.2.1 General

These tests basically apply to inductors carrying alternating current with low harmonic contents. This test method may also be used for routine testing of other type of inductors.

The relevant inductance to measure is the a.c. inductance derived from the reactance where the voltage and the current are both given as r.m.s. values and where the voltage is sinusoidal: see IEC 60076-6 for reference.

The measurement shall be performed quickly so that the temperature-rise does not cause significant error. The d.c. resistance of the windings shall be indirectly measured if possible, from the measurement of losses during the record or measured directly before (for reference) and immediately after the record has been made.

13.3.7.2.2 Type test

The inductor shall be fed by an a.c. source (single or three phases as appropriate) at rated frequency; impedance or inductance curves shall be plotted as a function of the current over the whole range of utilisation of the inductor. If the purchaser requires, the saturation curve shall be agreed between the purchaser and the manufacturer before series production is started.

For air-cored inductors, the test shall be made only at rated current and maximum current.

For some inductors, the determination of the Q factor (see IEC 60076-6:2007, 9.4.11) may be required.

13.3.7.2.3 Routine test

The a.c. impedance shall be measured at rated current and at a frequency to be agreed between purchaser and manufacturer.

13.3.7.3 Measurement of incremental inductance

13.3.7.3.1 General

These tests basically apply to saturable inductors carrying d.c. current with low or significant harmonic contents (pulsating current).

The relevant inductance to measure is the incremental inductance derived from a record of the terminal voltage when a specified pulsating current is passing through the inductor: see IEC 60076-6 for reference.

The measurement shall be performed quickly so that the temperature-rise does not cause significant error referring to 13.3.2. The d.c. resistance of the windings shall be indirectly measured, if possible, from the measurement of losses during the record or measured directly before (for reference) and immediately after the record has been made.

13.3.7.3.2 Type test

The incremental inductance shall be measured at the specified harmonic frequency with a representative value of current superimposed on different d.c. currents within the specified current range.

NOTE Where the a.c. currents are small (less than 10 %) compared to the d.c. current, the exact value of the a.c. test current is not critical to the measurement.

Alternatively, the differential inductance may be used in lieu of the incremental inductance, subject to agreement between manufacturer and purchaser.

Curves of the incremental inductance shall be plotted as a function of the current over the whole range of utilisation of the inductor.

In case the routine test is to be performed with the a.c. impedance, on the inductor which has successfully passed the above type test, the impedance and inductance with alternating current at an agreed industrial frequency shall be recorded for several values of the current such that the voltage cannot reach dangerous values. The purchaser and manufacturer shall then agree on the choice of a certain point on the impedance curve so plotted; this point shall be adopted as a basis for the subsequent routine tests.

For air-cored inductors, the test shall be made only at rated and maximum current.

13.3.7.3.3 Routine test

Upon agreement between purchaser and manufacturer, the routine test may be performed either by measuring the incremental inductance in a single point (d.c. current and ripple current) or by measuring the a.c. impedance in the single point defined above.

13.3.7.4 Measurement of differential inductance

13.3.7.4.1 General

These tests basically apply to saturable inductors carrying a.c. or d.c. current with pulsating current (high harmonic contents).

This method may be used for air-cored inductors.

The relevant inductance to measure is the differential inductance derived from a digital record of instantaneous voltage and current in the inductor:

$$L_d(i) = \frac{d\psi(i)}{di} = \frac{u(t) - R \times i(t)}{di/dt}$$

NOTE This definition has the widest scope of application and describes best the magnetic characteristic of a saturable inductor. The other definitions of inductance can be derived from this characteristic.

In order to get accurate results:

- a) The voltage shall be adjusted in order to generate a peak current which is higher than the current range specified for L_d and to cause saturation.
- b) The measurements shall be performed quickly or with low energy so that temperature rises do not cause significant errors referring to 13.3.2. The d.c. resistance of the windings shall be indirectly measured, if possible, from the measurement of losses during the record or measured directly before (for reference) and immediately after the record has been made.
- c) The raw digital record shall be adequately filtered to generate the $L_d(i)$ characteristic.

13.3.7.4.2 Type test

The instantaneous voltage and current (in each phase for three phase inductors) shall be recorded in a digital recorder. For every current value within the specified range, the differential inductance shall be calculated according to the above formula.

The test method shall further be agreed between purchaser and manufacturer. Suggested methods are as follows:

Method 1: a.c. voltage.

A single (or three) phase alternative voltage is applied to the inductor terminals at a frequency such that the peak current is higher than the range specified for L_d and to cause saturation, but such that the voltage does not exceed the maximum operating voltage.

For methods 2 to 5, in case of three phase inductors, the current shall be injected in turn in each phase. Depending on the connection diagram, the current shall be increased by the appropriate factor to take into account the contribution of the other phases in normal, three phases, operation.

Method 2: single phase a.c. current injection with d.c. current polarization.

Basically, this method is the same as the measurement of incremental inductance in d.c. inductors, but based on instantaneous rather than r.m.s. values.

The differential inductance shall be measured at the specified harmonic frequency with a representative value of current superimposed on different d.c. currents within the specified current range.

Method 3: single phase oscillating capacitor discharge.

A capacitor is discharged in the inductor.

The advantages of this method are:

- a high current and power source is not required;
- negligible temperature-rise of the winding; it is sufficient to measure the d.c. resistance of the winding before (for reference) and just after the record.

Method 4: single phase d.c. voltage pulse.

A d.c. voltage pulse is applied to the inductor terminals. The voltage amplitude and/or pulse duration shall be adjusted to reach at least the specified maximum current.

The advantages of this method are similar to those of Method 3.

Method 5: d.c. current charging-discharging.

See IEC 60076-6:2007, Annex B: the test is carried out with direct current either by means of a sudden closing of the circuit or by a sudden short-circuiting of the inductor.

In case the routine test is to be performed with the a.c. impedance, on the inductor which has successfully passed the above type test, the impedance and inductance with alternating current at an agreed industrial frequency shall be measured for several values of the current such that the voltage cannot reach dangerous values. The purchaser and manufacturer shall then agree on the choice of a certain point on the impedance curve so plotted; this point shall be adopted as a basis for the subsequent routine tests.

13.3.7.4.3 Routine test

Upon agreement between purchaser and manufacturer, the routine test may be performed either by measuring the differential inductance in a single point or by measuring the a.c. impedance in the single point defined above.

13.3.8 Temperature-rise test (type tests)

The temperature-rise test shall be carried out according to 13.2.11.

13.3.9 Insulation resistance test (optional type and routine test)

Before dielectric test, insulation resistance test shall be carried out by a 1 000 V Megger between windings and between winding and the earth. The cooling medium temperature shall be recorded.

13.3.10 Dielectric tests (type and routine tests)

13.3.10.1 General

The dielectric tests on new types of inductors shall be carried out in the manufacturer's workshops with the inductors at room temperature and equipped with those accessories which could influence the tests.

Dielectric tests include:

- separate source voltage withstand test (see 13.3.10.2);
- in addition, for dry-type inductors, wet dielectric tests may be required by the purchaser according to Annex D (informative);
- lightning impulse voltage withstand test (see 13.3.10.3);
- voltage between terminals withstand test (see 13.3.10.4);
- partial discharge test (see 13.3.11).

All non-tested conductive parts such as core, frame, tank or casing of the inductor, temperature sensors, shall be connected to earth.

13.3.10.2 Separate source voltage withstand test (type and routine test)

The separate source voltage withstand test shall be carried out according to 13.2.13.3.

13.3.10.3 Lightning impulse voltage withstand test (type test)

The lightning impulse voltage withstand test shall be carried out according to 13.2.13.4.

13.3.10.4 Voltage between terminals withstand test (type and routine tests)

The main purpose of this test is to check insulation between turns and between windings, especially for windings repeatedly subjected to steep front voltage waveforms.

This test is to be carried out on transformers/inductors which may be exposed to dielectric stress between terminals during normal service or failure conditions.

During the test, the tank and the windings other than the one under test shall be connected as in service.

Several methods are proposed below in order to address the service stress conditions for transformers/inductors. Selection of test method and test conditions shall be agreed between purchaser and manufacturer (see Table 12).

Table 12 – Test method of voltage between terminals withstand test

Service conditions / Test methods	Pulsed voltages (windings supplied with PWM voltage, chopper inductor, transient inductor, 3ph filter inductor, etc.)	Sinusoidal a.c. (tuned filter inductor, etc.)	Pure d.c. (line filter inductor, etc.)
Impulse test: to be selected according to Table 8 based on U_{Nm}	Performed 3 times at U_{Ni}		
Capacitor discharge oscillation ^{a)}	Performed 3 times at U_a		
Sinusoidal voltage with or without increased frequency ^{b)}	$T = 120 \times f_{\text{assigned}} / f_{\text{test}}$ at U_a (15 s minimum, 60 s maximum)		
Recurring voltage pulse generator with steep front $\geq 5 \text{ kV}/\mu\text{s}$ ^{c)}	$U = 2 \times U_{mG}$ $N \geq 3\,000$ pulses	Not applicable	
<p>a) Refer to IEC 60076-6:2007, Annex E (depending of the damping, number of cycles shall be agreed between purchaser and manufacturer).</p> <p>b) For small inductance value, it may be required to increase the test frequency in order to keep the current sufficiently low for the source and the inductor.</p> <p>T = test duration. f = frequency.</p> <p>c) dv/dt should not be less than the specified service conditions.</p>			

13.3.11 Partial discharge test (type or optional routine test for the dry-type)

The partial discharge test shall be carried out according to 13.2.14.

13.3.12 Short-circuit withstand test (optional type test)

The short-circuit test shall be carried out according to 13.2.15. For the short circuit test of d.c. line filter inductors, the zero crossing of the supply voltage is not relevant. The maximum short-circuit current and the duration shall be specified by purchaser.

By agreement between the purchaser and manufacturer short-circuit test may be realised by capacitor discharge.

13.3.13 Shock and vibration test (optional type test)

The shock and vibration test shall be carried out according to 13.2.16.

13.3.14 Vibration test with current flowing (investigation test)

Measurement of vibration characteristics during current flowing shall be carried out to measure amplitudes of acceleration and displacement by applying current to inductor alone. Test conditions shall be agreed between purchaser and manufacturer.

13.3.15 Noise measurement (type test)

The noise measurement test shall be carried out according to 13.2.18.

13.3.16 Leakage magnetic flux density measurement (optional type test)

The leakage magnetic flux density measurement shall be carried out according to 13.2.19.

Annex A (informative)

List of items for which an agreement between purchaser and manufacturer is needed or for which further information or specifications shall be given by the purchaser or by the manufacturer

A.1 Items subject to agreement between purchaser and manufacturer

A.1.1 Transformer and inductors

- | | |
|-------------|--|
| 1 | Extension of the scope of the standard. |
| 5 | Special service conditions. |
| 10.2 | Other temperature limits of solid insulation. |
| 10.4 | Maximum temperature of tank surface. |
| 11 | Mechanical behaviour proved by FEA calculation (method, model calibration and fatigue limits). |
| 11 | Safety coefficient for mechanical design. |
| 12 | Items on rating plates. |
| 13.1.3 | Replacement of routine tests by sampling tests. |
| 13.2.1 | Tests as separate equipment for differential inductors associated with transformer. |
| 13.2.11.1 | Temperature-rise test: details of test conditions. |
| 13.2.11.1 | Temperature rise test in the overload conditions or any other condition. |
| 13.2.11.1 | Specific temperature tests. |
| 13.2.11.3 | Liquid-immersed type transformers/inductors: hot-spot winding temperatures determined by direct measurement. |
| 13.2.11.3 | Test with lower losses for liquid temperature-rise test. |
| 13.2.11.3 | Test in specified overload conditions for winding temperature-rise tests. |
| 13.2.11.4 | Dry-type transformers/inductors: position of temperature sensors. |
| 13.2.11.4 | Other steps for temperature-rise test. |
| 13.2.11.4 | Current injection test with lower losses. |
| 13.2.11.6 | Temperature-rise test criteria at rated power/current. |
| 13.2.13 | Arrangement of connections for dielectric test in each particular case. |
| 13.2.13.4.1 | Lightning impulse voltage withstand test: peak value of the applied voltage other than in Table 8. |
| 13.2.13.4.1 | Wider tolerances of the resulting impulse shape. |
| 13.2.14 | Partial discharge test: permissible level Q_{MAX} . |

- 13.2.14 Partial discharge test in cold conditions: upper and lower test voltages (U_1 , U_2).
- 13.2.15.3 Active part not being removed from the tank.
- 13.2.16.1 Check the behaviour of transformer with resilient fixation integrated on the vehicle.
- 13.2.16.2.3 Other performance tests after optional shock and vibration tests.
- 13.2.19 Measuring points and limits for leakage magnetic flux density measurement.
- B.4.4 Position of temperature sensors inside the windings for a dry-type transformer/inductor.
- D.2 Optional wet dielectric test 1 for dry-type transformers and inductors: soaking test on a sampling basis.
- D.3 Optional wet test 2: duration of application of the wet separate source voltage.
- D.4.2 Optional wet test 3: current injection conditions.
- D.5 Optional wet dielectric tests: acceptance of a brief arc, non-recurrent at the same spot.
- D.5 Value of insulation resistance criterion ($R_{IS-DRY-24H}$).
- D.5 Maximum variation of the leakage current.
- D.5 Minimum value of insulation resistance ($R_{IS-WET-0}$ and $R_{IS-WET-1}$).
- D.5 Acceptance of any deviation to target criteria.
- A.1.2 Transformers
 - 7.1 Rated line-side voltage other than the nominal voltage of the traction system.
 - 13.2.1 Table 5: list of tests to be performed.
 - 13.2.2 Table 6: smaller tolerance on the impedance voltage for principal tapping.
 - 13.2.3 Optional functional type and routine tests.
 - 13.2.7.2 Other values of line-side voltages for the measurement of the no-load current and losses.
 - 13.2.8.1 All the combinations in pairs of windings for impedance voltage measurement.
 - 13.2.8.1 Additional measurements on other tapping or in other combinations of windings for impedance voltage measurement.
 - 13.2.10 Any other method for harmonic losses calculation.
 - 13.2.10 Losses associated with the train heating load.
 - 13.2.11.3 Immersed-type transformers: temperature-rise test applying rated voltage and current by connection to a suitable load.
 - 13.2.11.3 Back-to-back method for temperature-rise test.
 - 13.2.11.4 Dry-type transformers: temperature-rise test applying rated voltage and current by connection to a suitable load.
 - 13.2.11.4 Back-to-back method.

- 13.2.12 Minimum value of insulation resistance.
 - 13.2.13 Table 8: dielectric test voltages for higher U_{Nm} .
 - 13.2.13.1 Optional wet dielectric test.
 - 13.2.13.2 Induced voltage withstand test: test voltages other than in Table 8.
 - 13.2.13.3 Separate source voltage withstand test: test voltages other than in Table 8 for non-uniform insulation windings.
 - 13.2.13.4.1 Lightning impulse voltage withstand test of low-voltage winding: tested with surges transferred from the high-voltage winding.
 - 13.2.14 Optional partial discharge investigation tests for immersed type transformers.
 - 13.2.15.1 Optional short-circuit withstand test.
 - 13.2.15.3 Results of FRA measurements before and after short-circuit tests.
 - 13.2.15.3 Reduced variation of short-circuit reactance below 7,5 % for non-circular concentric coils.
 - 13.2.16.2.3 Results of FRA measurements before and after shock and vibration tests.
 - 13.2.20 Electrical Frequency Response Analysis FRA: detailed measurement method.
 - 13.2.21 Primary inrush current: acceptance criteria (optional).
- A.1.3 Inductors
- 13.3.1 Table 10: list of tests to be performed.
 - 13.3.2 Table 11: other tolerances on inductance.
 - 13.3.6 Losses not being measured with a frequency and/or wave shape as close as practicable to the service.
 - 13.3.7.1 Value of inductance to be used for the routine tests.
 - 13.3.7.2.2 Measurement of a.c. inductance: saturation curve.
 - 13.3.7.2.3 Frequency for the a.c. impedance measurement.
 - 13.3.7.3.2 Measurement of incremental inductance: differential inductance being used in lieu of the incremental inductance.
 - 13.3.7.3.2 Industrial frequency for impedance and inductance measurement with alternating current in type test.
 - 13.3.7.3.2 Choice of a certain point on the impedance curve for type tests.
 - 13.3.7.3.3 Routine test by measuring the incremental inductance in a single point or by measuring the a.c. impedance in the single point defined.
 - 13.3.7.4.2 Measurement of differential inductance: test method for type test.
 - 13.3.7.4.2 Industrial frequency for impedance and inductance measurement with alternating current in type test.
 - 13.3.7.4.2 Choice of a certain point on the impedance curve for type tests.
 - 13.3.7.4.3 Routine test by measuring the differential inductance in a single point or by measuring the a.c. impedance in the single point defined.

- 13.3.10.1 Optional wet dielectric test.
- 13.3.10.4 Voltage between terminals withstand test: selection of test method and test conditions.
- 13.3.12 Short circuit test by capacitor discharge.
- 13.3.14 Test conditions for vibration test with current flowing.

A.2 Information to be given by purchaser to manufacturer

A.2.1 Transformers and inductors

- 6.1 Load profile.
- 6.1 Current frequency spectrum.
- 6.2 Reference temperature for continuous load or temperature histogram.
- 8 Intermediate tapplings.
- 9.2.3 Air flow for external air-forced or vehicle motion cooling.
- 13.1.2 Optional type tests.
- 13.1.4 Investigation tests.
- 13.1.4 Acceptance of the equipment after investigation tests.
- 13.2.11.1 Temperature of the cooling medium at the external interface of the transformer/inductor.
- 13.2.12 Repetition of insulation resistance test after test completion.
- 13.2.13 For all windings connected to a power converter generating steep voltage waves: recurring peak voltage amplitudes (U_{mT} and U_{mG}), d.c. link voltage, voltage rise rate and repetition frequency.
- 13.2.15.1 Optional requirement to measure the resistance for the tapping positions at which short-circuit test will be carried out.
- 13.2.15.3 Optional requirement of lightning impulse test after short-circuit test.
- 13.2.15.3 Optional requirement of wet dielectric test after short-circuit test.
- 13.2.16.2.1 Optional shock and vibration type test: specification of category 1 class A or B for simulated long-life testing at increased random vibration levels.
- 13.2.16.2.3 Optional requirement of wet dielectric tests for a dry-type transformer/inductor after shock and vibration tests.
- 13.2.18 Accuracy grade for noise measurement.
- B.4.1 Current over time, i.e. load profiles, and current frequency spectrum.
- B.4.2 Temperature histogram for the cooling medium at the external interface of a transformer/inductor. Or cooling medium reference temperature for lifetime calculations.
- C.3.2 Operation conditions for thermal endurance calculations.
- Annex E Load profile: duration and frequency of overload operation.

A.2.2 Transformers

- 13.2.1 Table 5 – List of tests: requirement for optional or investigation tests.
- 13.2.7.2 Optional requirement to record the no-load voltage and current waveforms and to analyse their harmonic contents.
- 13.2.8.2 Optional requirement to measure the differential inductance for non-linear short-circuit inductance characteristics.
- 13.2.8.2 Optional requirement to measure the variation of impedance (resistance and inductance) with frequency.
- 13.2.10 Other conditions to calculate total losses for transformers other than traction transformers.
- 13.2.13.2 Test time at full test voltage other than 60 s.
- 13.2.13.2 Induced voltage other than $2 \times U_N$ (rated voltage) for auxiliary transformers.
- 13.2.14 Partial Discharge.
Optional requirement for dry-type transformers as routine test.
Optional requirement for immersed-type as investigation test.
- 13.2.15.1 Optional requirement for short-circuit withstand test as type test.
- 13.2.15.1 Short-circuit apparent power of the system.
- 13.2.15.1 Maximum value of short circuit power available at the vehicle input.
- 13.2.17 Connection scheme for choice of configuration for VTR tests.
- 13.2.17 Maximum value of VTR.

A.2.3 Inductors

- 13.2.15.1 Short-circuit current for inductors.
- 13.3.1 Table 10 – List of tests: requirement for optional or investigation tests.
- 13.3.6 Wave shape of the current for the determination of losses.
- 13.3.7.1 Optional requirement to measure mutual inductance as type test for coupled inductors.
- 13.3.7.1 Optional requirement of additional type tests: measurement of inductance variation with frequency and temperature.
- 13.3.7.2.2 Optional requirement to determine the Q factor.
- 13.3.11 Partial discharge.
Optional requirement for dry-type inductors as routine test.
- 13.3.11 Optional requirement for short-circuit withstand test as type test.
- 13.3.12 Maximum short circuit current and duration.
- 13.3.14 Optional requirement for vibration test with current flowing as investigation test.

A.3 Information to be given by manufacturer to purchaser

A.3.1 Transformers and inductors

- 6.1 Current frequency spectrum.
- 6.2 Calculated reference temperature for continuous load.
- 9.1 Type of coolant.
- 9.2.1 Rating and cooling symbols for each cooling method.
- 10.1 Thermal class of solid insulation.
- 11 FEA calculations for mechanical behaviour: way cooling liquid has been simulated.
- 13.1.2 Certificates of type tests already carried out on identical equipment constructed on a previous occasion.
- 13.2.11.2 Temperature calculation method and test results on a similar transformer/inductor used as a reference.
- 13.2.11.3 Results of a study concerning the location of the hot-spots, and the relation between the hot-spot temperature and the winding average temperature.
- 13.2.11.3 Temperature-rise test of liquid-immersed type transformers/inductors: test consolidation and conformity assessment report.
- 13.2.11.4 Temperature-rise test of dry-type transformers/inductors: test consolidation and conformity assessment report.
- B.4.2 Calculated cooling medium reference temperature for lifetime calculation.
- B.5 Suitability of the insulation system for the specified application.
- B.6 End of life criterion: explanation of acceptance if CEP > 100 %.
- Annex C Thermal endurance calculation.
- C.3.3 Thermal endurance characteristics.
- D.5 Wet dielectric tests: investigation results in case of deviation to target criteria.

A.3.2 Transformers

- 13.2.2 Table 6: Lower tolerance on winding resistance for series production.
- 13.2.16.1 Demonstration of no change in operational state occurring during shocks tests.

A.3.3 Inductors

- 13.3.2 Table 11: Lower tolerance on winding resistance for series production.

Annex B (informative)

Thermal ageing and insulation life time

B.1 Insulation life time and thermal ageing

The insulation life time is defined as the total time between the initial state for which the normal component insulation is considered new and the final state when, due to many factors which are met or occur in normal service, there is a high risk of electrical failure.

The ageing factors are described in IEC 60505 (Evaluation and qualification of electrical insulation systems): thermal ageing, dielectric and mechanical stresses (vibration, thermal cycling, etc.), deleterious atmospheres and chemicals, moisture, dirt, radiation, etc.

As temperature is very often the dominating ageing factor, standards have introduced thermal classes (IEC 60085) and methods to characterize thermal endurance properties (IEC 60216-1).

Electrical Insulating Materials (EIM) or Systems (EIS) are characterised by thermal endurance properties (mechanical and dielectric strengths, thermal cycling resistance, sealing performance, etc.) which are described by two terms: Thermal Index (TI) and Halving Interval (HIC).

The thermal endurance of an EIM is always given for a specific property and end-point. If this is disregarded, any reference to thermal endurance properties ceases to be meaningful since the properties of a material subjected to thermal ageing may not all deteriorate at the same rate. Consequently, a material may be assigned more than one temperature index or halving interval derived, for example, from the measurement of different properties.

The description of a transformer/inductor as being of a particular thermal class does not mean, and shall not be taken to imply, that each EIM used in its construction is of the same thermal endurance.

- All parts of the transformer/inductor are not exposed to the same temperature and do not necessarily require materials of the same thermal class.
- The thermal class for an EIS may not be directly related to the thermal endurance of the individual EIM included in it.
- It should also not be assumed that the system thermal class would necessarily default to the lowest temperature class of the system's individual components. On the contrary, the thermal capability will often favour the highest temperature component. However, the individual component thermal class should provide guidance in the selection and positioning of the various materials within the insulation design.

The material deterioration rate is highest in high temperature areas. These areas will reach the end-point first and determine the service reliability of the whole transformer or inductor. Thermal endurance calculations are based on hot-spot temperatures.

B.2 Definitions of thermal endurance

For the purposes of this document, the following terms and definitions of thermal endurance characteristics of an insulating material or system apply.

B.2.1

thermal endurance

time taken for the deterioration of a selected property (electrical, mechanical, etc.) to reach a specified end-point at a given temperature. An end-point of 50 % of the initial value of the property is used (unless otherwise specified)

Note 1 to entry: An insulation material mainly ensures the electric performance (dielectric strength) of the conductor insulation, while the impregnation, casting, sealing, coating, etc., materials mainly ensure the mechanical performance of the windings (water tightness, resistance to thermal cycling and shock, resistance to vibration or shocks, thermal conduction, etc.).

B.2.2

Temperature Index

TI

numerical value of the temperature (in degrees Celsius) derived from the thermal endurance relationship at a time of 20 000 h (unless otherwise specified)

Note 1 to entry: TI is referring to the RTE (Relative Thermal Endurance) or ATE (Assessed Thermal Endurance) indexes used in IEC 60216-5.

B.2.3

Halving Interval

HIC

numerical value of the temperature interval (in Kelvins) which expresses the halving of the time to end-point taken at the temperature equal to TI

B.3 Thermal endurance calculations

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

NOTE As far as thermal endurance calculations are concerned, IEC 60076-12 provides an explanation of ageing fundamentals and the means to estimate ageing rate and consumption of lifetime of the transformer/inductor insulation as a function of operating temperature, time and loading. The hot-spot temperature is used to estimate the number of hours of life time consumed during a particular time period of loading.

B.3.1

thermal endurance in continuous operation

ECO

for a given hotspot temperature θ_{HS} (°C), the thermal endurance in continuous operation is derived from the simplified equation of the Arrhenius plot (based on TI and HIC) as follows:

$$ECO(h) = 20000 \times 2^{\frac{TI - \theta_{HS}}{HIC}}$$

this simplified formula is very convenient to understand the concept of TI and HIC. However, this formula yields slightly pessimistic results compared to the exact formula.

Whenever possible, the exact Arrhenius formula derived from the endurance graph (constants A and B) should be used, where E(h) is the thermal endurance and $T_{HS}(K) = \theta_{HS} (°C) + 273,15$ is the thermodynamic (absolute) hot-spot temperature:

$$\log E(h) = \log A + \frac{B}{T_{HS}(K)}$$

which represents the thermal endurance graph, or

$$E(h) = a \times \exp\left(\frac{b}{T_{HS}}\right)$$

which expresses directly the thermal endurance value.

B.3.2

Actual Operating Time

AOT

actual time (in hours) the insulating system will operate at the given hotspot temperature

B.3.3

Consumed Endurance Potential

CEP

$$CEP(\%) = \frac{AOT}{ECO} \times 100$$

for a given hot-spot temperature

B.4 Special considerations for thermal design and test

B.4.1 General

For thermal endurance considerations, it is important to keep in mind the following.

- Lifetime is related to temperature by an inverse exponential function.
Example: if HIC is 10 K, every increase of 10 °C temperature reduces lifetime by a factor 2.
- Winding temperature is directly affected by the cooling medium temperature at the external interface.
- The winding temperature rise is roughly proportional to load losses. Load losses are made of ohmic and additional losses. Ohmic losses directly proportional to the square of the current and to the d.c. resistance. Additional losses are related to the current frequency spectrum and inversely proportional to the d.c. resistance. The winding d.c. resistance is proportional to temperature.

The purchaser is able to specify the current over time, i.e. the load profile, including its frequency spectrum, and the temperature histogram at the external cooling interface.

But the losses and temperature rises in the transformer/inductor depend on the design of the manufacturer.

For the temperature rise tests, it is important to define correctly the cooling medium reference temperature and the continuous current rating of each winding in order to be able to check compliance with the specified lifetime.

B.4.2 Cooling medium temperature at the external interface

Cooling medium temperature histogram:

- a temperature histogram should be provided by the purchaser for the cooling medium at the external interface of the transformer/inductor. Otherwise, the purchaser shall provide directly the cooling medium reference temperature for lifetime calculations.

Cooling medium reference temperature for lifetime calculation:

- the reference temperature of the cooling medium at the external interface of the transformer/inductor, for the purpose of lifetime calculation, is the permanent temperature for which the effects on material ageing are equivalent to those of the specified temperature histogram during the lifetime;
- either this reference temperature shall be calculated by the manufacturer, or it shall be provided by the purchaser.

NOTE Thermal ageing is an exponential function of temperature, i.e. the reference temperature for lifetime calculation is an exponentially weighted average based on the winding temperature. It is higher than the arithmetic mean temperature.

B.4.3 Rated current

The rated current of a winding is the current this winding can sustain permanently, at the reference temperature of the cooling medium for lifetime calculation, for which the effects on material ageing are equivalent to those of the specified load profiles during lifetime.

NOTE The rated current is an exponentially weighted average based on the winding temperature.

B.4.4 Temperature rise test of a dry-type transformer/inductor

For direct measurement of the temperature, temperature sensors shall be fitted inside the windings in positions, to be agreed between manufacturer and purchaser, where the hot-spots are presumed to be located.

B.5 Thermal conformity of the insulation system

The suitability of the insulation system for the specified application should be demonstrated by the manufacturer by thermal endurance calculations based on the thermal endurance characteristics of the insulation system (Arrhenius plot and formula constants or, at least, ATE or RTE and HIC, according to IEC 60216-1 and IEC 60216-5) for the relevant performance (mechanical, electrical).

See an example of detailed calculations in Annex C (informative).

B.6 End of life criterion

Definition of end-points in IEC 60216-1 is mainly conventional and is not functional. The deterioration of the material happens gradually. The end-point represents no sharp limit between 'life' and 'death' of the component. In the thermal endurance experiments, the end-point is reached when half of the samples submitted to the test have failed the selected criterion (for example, 50 % of the initial a.c. breakdown voltage). It is up to manufacturer to take this reduction into account in design rules to achieve the specified life time with the specified reliability.

Under these conditions, a transformer or inductor is deemed acceptable from the thermal endurance point of view if the sum of Consumed Endurance Potential (CEP) for all service conditions and relevant electrical and mechanical properties is lower or roughly equal to 100 %. In case 100 % is exceeded, the manufacturer shall explain why this result may be acceptable.

Annex C (informative)

Example of thermal endurance calculation to demonstrate the suitability of an insulation system for a specified application

C.1 Preliminary

The following are just examples for the purpose of understanding the calculation method set up in Annex B (informative).

They are based on purely indicative thermal endurance characteristics and should not be taken as reference for actual applications if not supported by actual thermal endurance test data.

For easy understanding, the simplified Arrhenius formula has been used.

C.2 Example 1 – Temperature limits for a dry-type transformer/inductor

In the examples of Table C.1, two insulation systems of different classes are considered which have a TI at the lower limit of their thermal class and with the shown HIC.

Table C.1 – Temperature limits and expected lifetime
for a dry-type transformer or inductor (examples)

Thermal class	Thermal endurance characteristics for the examples		Short-time operation at maximum hot-spot temperature (NOTE 1)		Continuous operation (210 000 h) (NOTE 2)
	TI	HIC	Maximum hot-spot temperature °C	Expected lifetime h	Maximum hot-spot temperature °C
105 (A)	105	6	130	1 100	85
180 (H)	180	11	205	4 100	143

NOTE 1 Column 5 shows the expected lifetime if the insulation system is operated continuously at the maximum hot-spot temperature according to Table 3. The expected lifetime is calculated for 100 % CEP.

NOTE 2 Column 6 shows the maximum temperature for continuous operation of the insulation system for a specified lifetime of 210 000 h (i.e. 30 years 7 000 h per year).

C.3 Example 2 – Thermal endurance calculation

C.3.1 General

It is often possible to split the operation of a traction transformer or inductor into simple equivalent loading conditions thanks to their usually high thermal time constant compared with the running cycle of the railway vehicle. This process leads to simplified load cycle histograms and cooling medium temperature histograms.

This example considers a dry-type, d.c. line filter, air-cored inductor for a traction application, cooled by forced air ventilation.

C.3.2 Operating conditions to be provided by the purchaser

Total operation hours over lifetime: 180 000 h (30 years at 16 h per day).

Load cycle histogram. Two main electrical conditions define the temperature rise of the inductor by the current flowing into it: normal and overload conditions with the specified split of operating time over lifetime shown in Table C.2.

Table C.2 – Load cycle histogram

Load cycle	Current $A_{r.m.s.}$	Operation over lifetime	
		Split %	AOT h
Normal	425	90	162 000
Overload	495	10	18 000
Total		100	180 000

Cooling medium temperature histogram at the external interface. The temperature histogram of the cooling air at the inlet side of the inductor is given in Table C.3.

Table C.3 – Temperature histogram

$\theta_{COOL AIR}$ °C	Operation over lifetime	
	Split %	AOT h
20	50	90 000
30	35	63 000
40	15	27 000
Total	100	180 000

C.3.3 Thermal endurance characteristics to be provided by the manufacturer

- Information about the reference and actually used insulation system according to IEC 60216-5: generic type of materials, test certificates.
- Thermal class, endurance graph (Arrhenius formula constants, ATE or RTE, HIC). In the example, the ATE or RTE index is taken for TI in the calculations with the following values: TI = 180 °C and HIC = 11 K.

C.3.4 Temperature rise test results

Table C.4 shows the average and hot-spot temperatures and temperature rises, measured during the temperature rise test conducted at the indicated current and cooling air temperature ($\theta_{COOL AIR}$).

Table C.4 – Temperature rise test results

Load cycle	Current $A_{r.m.s.}$	Temperature rise		Temperature	
		Average K	Hot-spot K	at $\theta_{COOL AIR} = 20\text{ °C}$	
				Average °C	Hot-spot °C
Normal	425	52	97	72	117
Overload	495	78	140	98	160

NOTE 1 In this example, due to the design of the inductor, the temperature of the hot-spot is significantly higher than the average temperature of the winding.

NOTE 2 Due to the increase of the d.c. resistance of the winding with temperature, the temperature rise variation between normal and overload conditions is more than proportional to the square of the current.

C.3.5 Calculations

Table C.5 shows the effect of the cooling air temperature ($\theta_{COOL AIR}$) on the ageing of the inductor for both load cycles.

This table is derived from Table C.4 by calculation. The winding temperatures are extrapolated at other cooling air temperatures by applying the iterative method of 13.2.11.5 for cooling medium temperature correction.

Table C.5 – Thermal endurance calculation

Load cycle	$\theta_{COOL AIR}$ °C	Operation over lifetime		Temperature		Thermal endurance	
		Split % (NOTE 1)	AOT h	Average °C	Hot-spot °C	ECO h	CEP %
Normal	20	45,0	81 000	72	117	1 089 000	7,4
	30	31,5	56 700	85	130	456 000	12,4
	40	13,5	24 300	97	144	191 000	12,7
Subtotal		90,0	162 000				32,5
Overload	20	5,0	9 000	98	160	69 000	13,0
	30	3,5	6 300	112	176	25 900	24,3
	40	1,5	2 700	125	191	9 700	27,7
Subtotal		10,0	18 000				65,0
Grand total		100	180 000				97,5

NOTE 1 In this table, the operation split is the result of multiplying the split of the load cycle histogram (Table C.2) by the split of the temperature histogram (Table C.3).

NOTE 2 Due to the design of the inductor chosen for this example, although the overload operation is limited to 10 % of the specified lifetime, it consumes 65 % of the lifetime potential of the insulation system.

The total Consumed Endurance Potential (CEP) is lower than 100 %: this inductor is acceptable from the thermal endurance point of view.

On the basis of Table C.5, it is possible to calculate an equivalent current and an equivalent temperature consuming the same potential of thermal endurance. This provides the rated current (I_{RATED}) and the reference temperature of the cooling medium for lifetime calculation ($\theta_{COOL_AIR_REF}$): the results are shown in Table C.6.

Table C.6 is generated from Table C.5 in two steps:

- step 1 – a single temperature $\theta_{COOL_AIR_REF}$ for both load cycles is determined which consumes the same overall CEP. This is performed by iterative calculations by using the same method as for Table C.5;
- step 2 – a single current I_{RATED} is then determined which consumes the same overall CEP at $\theta_{COOL_AIR_REF}$. This is performed by applying the iterative method of 13.2.11.5 for power or current correction.

Table C.6 – Equivalent current and temperatures

I_{RATED} $A_{r.m.s.}$	$\theta_{COOL_AIR_REF}$ °C	Operation over lifetime		Temperature		Thermal endurance	
		Split %	AOT h	Average °C	Hot-spot °C	ECO h	CEP %
451	29,3	100	180 000	93	145	184 500	97,5

Annex D (informative)

Wet dielectric tests for dry-type transformers and inductors

D.1 General

Dielectric failures of dry-type power wound components sometimes occur after a few years service in wet conditions, such as:

- misting (fine water droplets) on rainy days or during car wash operations;
- fine snow sucked by forced air and melting on winding;
- condensation e.g. entering tunnels in cold season, hot and wet weather following cold and dry days;
- cold winter with de-icing operations.

These failures occur although those wound components have successfully passed the dry dielectric tests.

The purpose of this annex is to propose optional tests based on return of experience to assess the ability to operate in wet conditions over the required lifetime.

The principle is to add separate source voltage withstand tests:

- in conditions generating or simulating water misting;
- before and after thermal shock;
- and after soaking in water.

The described wet dielectric tests 1 to 3 have an increasing severity level. The pollution degree according to IEC 62497-1 can be used as a guideline to require (or not) a wet test as investigation, type or routine test depending on the specified operation environment in terms of exposure to humidity and dust. If more than one test is required the tests shall be performed in sequence 1, 2 and 3.

Detailed procedures and criteria are given below.

Unless otherwise stated, the wound component under test, or the water used for testing shall be cold, i.e. at room ambient temperature.

The dielectric test voltage and the insulation resistance test are performed on the windings in a similar way as for the separate source voltages withstand tests at industrial frequency.

D.2 Wet test 1 (optional type test or optional routine test): short soaking

After the dry separate source voltage withstand test in 13.2.13.3, each cold wound component shall be totally immersed in cold tap water for the specified duration. Then, the wound component shall be taken out of the water, and submitted to the insulation resistance and wet separate source voltage tests, in the normal mounting position, and within less than 10 min overall. The voltage shall be applied for 1 min.

If required as a routine test, and if a high stability of the manufacturing process has been demonstrated by routine test after a few batches, this soaking test may be performed on a sampling basis, upon agreement.

D.3 Wet test 2 (investigation test or optional type test): misting

The cold wound component shall be placed in a ventilated enclosure, in the normal mounting position, and sprayed with water using a misting machine (nebulizer). This is not equivalent to spraying water directly on the wound component. For example, water is injected via a spraying nozzle placed between a fan and the wound component, in order to generate a fine water mist. This arrangement shall be left operating for minimum 2 h until the entire surface of the wound component is covered by a continuous layer of very fine water droplets. The fan and water injection shall then be stopped, and the wound component shall be submitted to the insulation resistance test and the wet separate source voltage shall be applied for a duration to be agreed between purchaser and manufacturer (minimum 1 min).

For investigation, partial discharge inception and extinction voltages should be measured according to 13.2.14 before and after the separate source voltage withstand test.

D.4 Wet test 3 (investigation test): thermal shock – long soaking – misting

D.4.1 General

This test is used to simulate the effects of thermal cycling combined with accumulation of dirt and moisture.

D.4.2 Temperature conditioning

The wound component is first heated up by current injection in conditions to be agreed (e.g. at twice the rated current according to IEC 60076-11 for thermal shock test). The average temperature of each winding shall be checked by measuring the d.c. resistance variation just before soaking for thermal shock. The average temperature of each winding shall be:

- either the temperature class minus 30 °C, with a tolerance of ± 15 °C (e.g. 150 °C ± 15 °C for a class 180 insulation system);
- or, if higher, the winding average temperature in actual service (± 15 °C), in rated conditions at cooling medium reference temperature for lifetime calculation.

D.4.3 Thermal shock

When hot, the component shall be immediately (within 15 min after the end of the heat run), abruptly and totally immersed in cold tap water. The tank shall contain a mass of water at least equal to half the mass of the wound component and a volume high enough to submerge it totally.

NOTE For example, for an iron close core component, both conditions are met if each dimension of the tank is at least 20 % larger than the corresponding one of the wound component, and if the tank is topped up with water.

D.4.4 Dielectric test

After the specified soaking duration, the cold wound component shall be taken out of the water and submitted to the misting test according to Clause D.3.

D.5 Common test procedure and criteria for wet dielectric tests

After taking the wound component out of the water, it is permitted to drain and tilt it for 1 min to eliminate the excess of water. However, it is not allowed to wipe out, nor dry, any part of it before proceeding with insulation resistance and wet separate source voltage tests or with the next wet test step.

The insulation resistance shall be measured, just before ($R_{IS-WET-0}$) and after ($R_{IS-WET-1}$) the wet separate source voltage test.

The leakage current shall be measured periodically (e.g. every 30 s) during the dielectric test: after the test voltage is established.

The wet separate source test voltage shall be 80 % of the dry test voltage.

Acceptance criteria:

- there shall not be visible or audible arcing during the dielectric test. However, a brief arc non-recurrent at the same spot, may be acceptable upon agreement of the purchaser.
- if $R_{IS-WET-1}$ is less than the criterion of $R_{IS-DRY-24H}$, to be agreed between purchaser and manufacturer, the insulation resistance shall be measured again, at regular intervals, until maximum 24 h of natural drying in ambient conditions. The part shall be rejected if the insulation resistance is still lower than the indicated criterion $R_{IS-DRY-24H}$.

Target criteria:

- the variation of the leakage current during the test or between parts should be lower than a value to be agreed between purchaser and manufacturer;
- the insulation resistances ($R_{IS-WET-0}$ and $R_{IS-WET-1}$) should be higher than a value to be agreed between purchaser and manufacturer.

If a target criterion is not met, the component shall not automatically be rejected. However, before acceptance can be decided, the manufacturer shall investigate and discuss the reasons of deviation and the following with the purchaser:

- the amplitude of variation of I_{LEAK} during each test and the spread of its average value I_{LEAK_AVG} , within and between batches;
- the stability of $R_{IS-WET-0}$ and $R_{IS-WET-1}$, within and between batches.

Annex E (informative)

Load profiles

The load profile should be specified considering the following operating conditions:

- normal load profiles are defined when all equipment are operating properly;
- overload profile. In case of a traction or auxiliary supply system providing redundancy, if a subsystem fails, the remaining one(s) will have to supply higher power/current than in normal conditions. The purchaser shall specify the duration and frequency of overload operation;
- peak transient (or surge) power/current. This surge capability is defined by a maximum short time current (e.g. compressor start) delivered both in normal and overload conditions. The purchaser shall specify the duration and frequency of transient operation;
- winter and summer current/power load profiles in relation with the corresponding cooling medium temperature range;
- air speed for AN transformers/inductors;
- fan management (variable speed or discontinuous operation) and maximum train speed for AF transformers/inductors.

Bibliography

IEC 60050-421, *International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 421: Power transformers and reactors*

IEC 60216-1, *Electrical insulating materials – Thermal endurance properties – Part 1: Ageing procedures and evaluation of test results*

IEC 60216-5, *Electrical insulating materials – Thermal endurance properties – Part 5: Determination of relative thermal endurance index (RTE) of an insulating material*

IEC 60505, *Evaluation and qualification of electrical insulation systems*

IEC 61287-1, *Railway applications – Power converters installed on board rolling stock – Part 1: Characteristics and test methods*

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	74
1 Domaine d'application.....	76
2 Références normatives	76
3 Termes et définitions	78
3.1 Définitions générales.....	78
3.2 Définitions relatives aux transformateurs	79
3.3 Définitions relatives aux bobines d'inductance	79
4 Classification.....	80
4.1 Classification des transformateurs	80
4.2 Classification des bobines d'inductance	80
5 Conditions de service	81
6 Courant assigné et profil de charge.....	81
6.1 Profil de charge.....	81
6.2 Courant assigné.....	81
7 Tension assignée et puissance d'enroulements de transformateur	81
7.1 Tension assignée côté réseau	81
7.2 Tension assignée secondaire	82
7.3 Puissance assignée du transformateur	82
8 Prises de transformateur.....	82
9 Refroidissement	82
9.1 Désignation des transformateurs et des bobines d'inductance selon le mode de refroidissement	82
9.2 Disposition des symboles	83
9.2.1 Transformateurs et bobines d'inductance enveloppés	83
9.2.2 Transformateurs et bobines d'inductance non enveloppés.....	83
9.2.3 Refroidissement à air	84
10 Limites de température	84
10.1 Classification des matériaux isolants	84
10.2 Limites de température de l'isolation solide.....	84
10.3 Limites de température pour de l'isolation liquide	85
10.4 Limites de température pour les autres parties.....	86
11 Conception mécanique	86
12 Plaques signalétiques.....	86
13 Essais	87
13.1 Catégories d'essais	87
13.1.1 Généralités	87
13.1.2 Essais de type	87
13.1.3 Essais individuels de série	87
13.1.4 Essais d'investigation.....	87
13.2 Essais sur les transformateurs.....	87
13.2.1 Généralités – Liste des essais.....	87
13.2.2 Tolérances.....	89
13.2.3 Contrôles visuels (essai de type, essai individuel de série) et essais fonctionnels (essai de type et essai individuel de série facultatifs).....	89
13.2.4 Masse (essai de type et essai individuel de série facultatif).....	90

13.2.5	Mesure de la résistance des enroulements (essai de type et essai individuel de série).....	90
13.2.6	Mesure des rapports de transformation, polarités et couplages (essai de type et essai individuel de série)	90
13.2.7	Mesure du courant primaire et des pertes à vide (essai de type et essai individuel de série).....	91
13.2.8	Mesure des tensions de court-circuit ou des impédances de court-circuit (essai de type et essai individuel de série).....	91
13.2.9	Mesure des pertes dues à la charge fondamentale (essai de type et essai individuel de série).....	92
13.2.10	Détermination des pertes totales (essai de type).....	93
13.2.11	Essai d'échauffement (essai de type)	93
13.2.12	Essai de résistance d'isolement (essai de type et essai individuel de série facultatifs)	98
13.2.13	Essais diélectriques (essai de type et essai individuel de série)	98
13.2.14	Essai de décharge partielle (essai de type ou essai individuel de série facultatif pour le type sec, essai d'investigation pour le type immergé)	104
13.2.15	Essai de tenue au court-circuit (essai de type facultatif).....	106
13.2.16	Essai de chocs et de vibrations (essai de type facultatif).....	108
13.2.17	Rapport de transmission de tension – VTR (essai de type facultatif).....	110
13.2.18	Mesure du bruit (essai de type)	111
13.2.19	Mesure de la densité de flux magnétique de fuite (essai de type facultatif)	111
13.2.20	Analyse de la réponse en fréquence électrique (FRA) (essai d'investigation).....	112
13.2.21	Mesure du courant d'appel (essai de type facultatif).....	112
13.3	Essais sur bobines d'inductance	113
13.3.1	Liste des essais	113
13.3.2	Tolérances.....	114
13.3.3	Contrôles visuels (essai de type et individuel de série)	115
13.3.4	Masse (essai de type et individuel de série facultatif).....	115
13.3.5	Mesure de la résistance des enroulements (essai de type et essai individuel de série).....	115
13.3.6	Détermination des pertes (essai de type).....	115
13.3.7	Mesure de l'inductance (essai de type et essai individuel de série).....	115
13.3.8	Essais d'échauffement (essais de type)	119
13.3.9	Essai de résistance d'isolement (essai de type et essai individuel de série facultatifs)	119
13.3.10	Essais diélectriques (essai de type et essai individuel de série)	119
13.3.11	Essai de décharge partielle (essai de type ou essai individuel de série facultatif pour le type sec)	120
13.3.12	Essai de tenue au court-circuit (essai de type facultatif).....	120
13.3.13	Essai de chocs et de vibrations (essai de type facultatif).....	121
13.3.14	Essai de vibrations avec circulation de courant (essai d'investigation).....	121
13.3.15	Mesure du bruit (essai de type)	121
13.3.16	Mesure de la densité de flux magnétique de fuite (essai de type facultatif)	121
Annexe A (informative) Liste des points pour lesquels un accord entre l'acheteur et le fabricant est nécessaire ou pour lesquels des informations ou spécifications complémentaires doivent être fournies par l'acheteur ou par le fabricant.....		
A.1	Points sujets à accord entre l'acheteur et le fabricant.....	122
A.1.1	Transformateurs et bobines d'inductance.....	122

A.1.2	Transformateurs.....	123
A.1.3	Bobines d'inductance	124
A.2	Informations à donner par l'acheteur au fabricant.....	125
A.2.1	Transformateurs et bobines d'inductance.....	125
A.2.2	Transformateurs.....	126
A.2.3	Bobines d'inductance	127
A.3	Informations à donner par le fabricant à l'acheteur	127
A.3.1	Transformateurs et bobines d'inductance.....	127
A.3.2	Transformateurs.....	128
A.3.3	Bobines d'inductance	128
Annexe B (informative)	Vieillessement thermique et durée de vie de l'isolation.....	129
B.1	Durée de vie de l'isolation et vieillissement thermique	129
B.2	Définitions d'endurance thermique.....	130
B.3	Calculs d'endurance thermique.....	130
B.4	Considérations particulières pour la conception et l'essai thermique	131
B.4.1	Généralités	131
B.4.2	Température du fluide de refroidissement à l'interface externe	132
B.4.3	Courant assigné.....	132
B.4.4	Essai d'échauffement du transformateur/de la bobine d'inductance de type sec.....	132
B.5	Conformité thermique des systèmes d'isolation.....	132
B.6	Critère de fin de vie.....	132
Annexe C (informative)	Exemple de calcul d'endurance thermique pour démontrer la conformité d'un système d'isolation pour une application spécifiée.....	134
C.1	Préliminaire.....	134
C.2	Exemple 1 – Limites de température pour un transformateur/une bobine d'inductance de type sec	134
C.3	Exemple 2 – Calcul d'endurance thermique.....	134
C.3.1	Généralités	134
C.3.2	Conditions de fonctionnement à fournir par l'acheteur	135
C.3.3	Caractéristiques d'endurance thermique à fournir par le fabricant.....	135
C.3.4	Résultats des essais d'échauffement	135
C.3.5	Calculs	136
Annexe D (informative)	Essais diélectriques humides pour des transformateurs et des bobines d'inductance de type sec.....	139
D.1	Généralités	139
D.2	Essai humide 1 (essai de type ou essai individuel de série facultatifs): trempage court.....	139
D.3	Essai humide 2 (essai d'investigation ou essai de type facultatif): brumisation	140
D.4	Essai humide 3 (essai d'investigation): choc thermique – trempage long – brumisation	140
D.4.1	Généralités	140
D.4.2	Conditionnement en température.....	140
D.4.3	Choc thermique.....	140
D.4.4	Essai diélectrique.....	141
D.5	Procédure d'essai commune et critères pour les essais diélectriques humides.....	141
Annexe E (informative)	Profils de charge.....	142
Bibliographie	143

Figure 1 – Exemples de montage pour les essais de tenue de tension induite	101
Figure 2 – Exemples de montage pour les essais de tenue de tension de source séparée	102
Figure 3 – Exemples de connexions d'essais aux ondes de choc pour des transformateurs de traction, des bobines d'inductance et des transformateurs auxiliaires	103
Figure 4 – Essai de décharge partielle: tension en fonction du temps	105
Figure 5 – Configurations pour l'essai VTR	111
Figure 6 – Exemple de circuit d'essai	113
Tableau 1 – Symboles littéraux pour le mode de refroidissement	83
Tableau 2 – Ordre des symboles	83
Tableau 3 – Limites de température de l'isolation solide	85
Tableau 4 – Limites de température pour de l'isolation liquide	85
Tableau 5 – Liste des vérifications et des essais à réaliser sur les transformateurs de traction	88
Tableau 6 – Tolérances	89
Tableau 7 – Températures de référence	90
Tableau 8 – Tension d'essai diélectrique	100
Tableau 9 – Mesures de décharge partielle	105
Tableau 10 – Liste des vérifications et essais à réaliser sur les bobines d'inductance	113
Tableau 11 – Tolérances	114
Tableau 12 – Méthode d'essai de tenue à la tension entre bornes	120
Tableau C.1 – Limites de température et durée de vie prévue pour un transformateur ou une bobine d'inductance de type sec (exemples)	134
Tableau C.2 – Histogramme de cycle de charge	135
Tableau C.3 – Histogramme de température	135
Tableau C.4 – Résultats d'essais d'échauffement	136
Tableau C.5 – Calcul de l'endurance thermique	137
Tableau C.6 – Courant et températures équivalents	138

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

APPLICATIONS FERROVIAIRES – TRANSFORMATEURS DE TRACTION ET BOBINES D'INDUCTANCE À BORD DU MATÉRIEL ROULANT

AVANT-PROPOS

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

La Norme Internationale IEC 60310 a été établie par le comité d'études 9 de l'IEC: Matériels et systèmes électriques ferroviaires.

Cette quatrième édition annule et remplace la troisième édition publiée en 2004, et constitue une révision technique.

Cette édition tient compte des nouvelles normes génériques ferroviaires, en particulier en ce qui concerne les conditions générales de service en référence à l'IEC 62498-1 et les considérations en matière de chocs et de vibrations en référence à l'IEC 61373. Elle inclut également les modifications techniques majeures suivantes par rapport à l'édition précédente:

- limites de températures;
- essai d'échauffement;

- essais diélectriques;
- essai de décharges partielles;
- méthodes de mesure d'inductance;
- essai de tenue à la tension entre bornes;
- vieillissement thermique et durée de vie d'isolation (informatif);
- exemples de calcul d'endurance thermique (informatif);
- essais diélectriques sous pluie (informatif);
- profils de charge (informatif).

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
9/2080/FDIS	9/2117/RVD

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

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

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

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

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.

APPLICATIONS FERROVIAIRES – TRANSFORMATEURS DE TRACTION ET BOBINES D'INDUCTANCE À BORD DU MATÉRIEL ROULANT

1 Domaine d'application

La présente Norme internationale s'applique aux transformateurs de traction et de puissance auxiliaire à bord du matériel roulant et aux divers types de bobines d'inductance d'alimentation insérées dans les circuits de traction ou auxiliaires du matériel roulant, de conception sèche ou immergée dans un liquide.

NOTE Les exigences de l'IEC 60076 (toutes les parties) sont applicables aux transformateurs et aux bobines d'inductance dans la mesure où elles ne sont pas en contradiction avec la présente Norme ou avec les publications IEC spécialisées traitant des applications de traction.

La présente Norme peut également être appliquée, après accord entre l'acheteur et le fabricant, aux transformateurs de traction des véhicules à courant alternatif triphasé côté réseau et aux transformateurs insérés dans les circuits auxiliaires monophasés ou polyphasés des véhicules, exception faite des transformateurs de mesure et des transformateurs de puissance assignée inférieure à 1 kVA en monophasé ou à 5 kVA en polyphasé.

La présente Norme ne couvre pas les accessoires tels que changeurs de prises, résistances, échangeurs de chaleur, ventilateurs, etc., destinés à être installés sur les transformateurs ou les bobines d'inductance et qui sont soumis à essai séparément suivant les règles les concernant.

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités en référence de manière normative, en intégralité ou en partie, dans le présent document et sont indispensables pour son application. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

IEC 60050-811, *Vocabulaire Électrotechnique international (VEI) – Chapitre 811: Traction électrique*

IEC 60060-1, *Techniques des essais à haute tension – Partie 1: Définitions et exigences générales*

IEC 60060-2, *Techniques des essais à haute tension – Partie 2: Systèmes de mesure*

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

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

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

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

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

IEC 60076-6:2007, *Transformateurs de puissance – Partie 6: Bobines d'inductance*

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

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

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

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

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

IEC 60076-18, *Transformateurs de puissance – Partie 18: Mesure de la réponse en fréquence*

IEC 60077-1, *Applications ferroviaires – Équipements électriques du matériel roulant – Partie 1: Conditions générales de service et règles générales*

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

IEC 60270, *Techniques des essais à haute tension – Mesures des décharges partielles*

IEC 60296, *Fluides pour applications électrotechniques – Huiles minérales isolantes neuves pour transformateurs et appareillages de connexion*

IEC 60836, *Spécifications pour liquides isolants silicones neufs pour usages électrotechniques*

IEC 60850, *Applications ferroviaires – Tensions d'alimentation des réseaux de traction*

IEC 61039, *Classification des liquides isolants*

IEC 61099, *Liquides isolants – Spécifications relatives aux esters organiques de synthèse neufs destinés aux matériels électriques*

IEC 61373:2010, *Applications ferroviaires – Matériel roulant – Essais de chocs et vibrations*

IEC 61378-1:2011, *Transformateurs de conversion – Partie 1: Transformateurs pour applications industrielles*

IEC 62497-1, *Applications ferroviaires – Coordination de l'isolement – Partie 1: Exigences fondamentales – Distances d'isolement dans l'air et lignes de fuite pour tout matériel électrique et électronique*

IEC 62498-1, *Applications ferroviaires – Conditions d'environnement pour le matériel – Partie 1: Équipement embarqué du matériel roulant*

ISO 3746, *Acoustique – Détermination des niveaux de puissance acoustique et des niveaux d'énergie acoustique émis par les sources de bruit à partir de la pression acoustique – Méthode de contrôle employant une surface de mesure enveloppante au-dessus d'un plan réfléchissant*

ISO 9614-1, *Acoustique – Détermination par intensimétrie des niveaux de puissance acoustique émis par les sources de bruit – Partie 1: Mesurages par points*

ISO 9614-2, *Acoustique – Détermination par intensimétrie des niveaux de puissance acoustique émis par les sources de bruit – Partie 2: Mesurage par balayage*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions de l'IEC 60076-1 et de l'IEC 60050-811, ainsi que les suivants s'appliquent.

NOTE Lorsque le mot "transformateur" est utilisé seul, il s'applique tant aux transformateurs de traction qu'aux transformateurs auxiliaires.

Le terme "transformateur(s)/bobine(s) d'inductance" apparaît dans les articles applicables tant aux transformateurs qu'aux bobines d'inductance afin d'éviter la duplication de texte.

Le terme "bobine d'inductance" est utilisé dans la présente Norme avec la signification du terme anglais "reactor" dans l'IEC 60050-421, l'IEC 60050-811 et l'IEC 60076-6.

3.1 Définitions générales

3.1.1

profil de charge

courant/puissance en fonction du temps dans des conditions spécifiées, y compris de tension

3.1.2

fluide de refroidissement

fluide de refroidissement utilisé pour extraire la chaleur d'un transformateur/d'une bobine d'inductance, par exemple, l'air, l'eau, l'huile, un dissipateur thermique, etc.

3.1.3

tension assignée d'isolement

U_{Nm}

tension de tenue efficace fixée par le fabricant aux matériels ou à une partie d'entre eux, caractérisant la capacité de tenue permanente spécifiée (sur 5 min) de son isolation

Note 1 à l'article: U_{Nm} est une tension entre une partie active du matériel et la terre ou une autre partie active. Pour le matériel roulant, la terre considérée est la caisse de la voiture.

Note 2 à l'article: Pour des circuits, des systèmes et sous-systèmes d'applications ferroviaires, cette définition est préférable à la "tension la plus élevée pour le matériel" qui est très fréquemment utilisée dans les normes internationales.

Note 3 à l'article: U_{Nm} est supérieure ou égale à la tension locale. En conséquence, pour des circuits directement reliés à une ligne de contact, U_{Nm} est supérieure ou égale à U_{max1} , comme spécifié dans l'IEC 60850. Pour les circuits reliés à un convertisseur électronique U_{Nm} est supérieure ou égale à la tension continue de boucle.

Note 4 à l'article: U_{Nm} n'est pas nécessairement égale à la tension assignée, qui est principalement liée aux performances fonctionnelles.

3.1.4

tension nominale

U_n

valeur approchée appropriée d'une tension, utilisée pour identifier ou désigner un réseau d'alimentation donné

3.1.5

tension assignée

U_r

valeur assignée de la tension pour une condition de fonctionnement spécifique

3.1.6

tension assignée de tenue aux chocs

U_{Ni}

valeur de la tension de tenue aux chocs, caractérisant la capacité de tenue spécifiée de son isolation contre des surtensions transitoires

3.1.7

tension d'essai

U_a

valeur efficace déduite de U_{Nm} utilisée pour une tension de source séparée, une tension induite, une tenue à la tension entre bornes, en fonction de l'essai effectué

3.1.8

tension de crête répétitive

U_{mT} , U_{mG}

valeur de crête maximale des excursions périodiques de la forme d'onde de tension entre bornes (U_{mT}) ou entre les bornes et la terre (U_{mG})

3.2 Définitions relatives aux transformateurs

3.2.1

rapport de transmission de tension

VTR

rapport entre la tension secondaire et la tension primaire lorsqu'une tension de choc ou une tension à onde carrée en courant alternatif spécifiée est appliquée à la tension primaire.

Le VTR est exprimé sous la forme d'un pourcentage de cette tension appliquée.

Note 1 à l'article: L'abréviation "VTR" est dérivée du terme anglais développé correspondant "voltage transmission ratio".

3.2.2

tension de court-circuit

tension appliquée pour atteindre le courant assigné en court-circuit.

Elle est exprimée en pourcentage de cette tension appliquée à la tension assignée, à la température de référence.

Note 1 à l'article: Lorsqu'elle est exprimée en pourcentage ou par unité, elle est égale à l'impédance de court-circuit référencée dans l'IEC 60076-1:2011, 3.7.

3.2.3

tolérance

déviations permises entre la valeur déclarée d'une quantité et la valeur mesurée

[SOURCE: IEC 60050-411:2007, 411-36-19]

3.3 Définitions relatives aux bobines d'inductance

Les valeurs de l'inductance des bobines d'inductance dépendent des différentes catégories d'utilisation et sont définies comme suit, dans la mesure où elles comportent une indication de la nature et de la valeur du courant utilisé pour leur mesure.

3.3.1

inductance en courant alternatif

inductance déduite de la mesure du courant alternatif traversant la bobine d'inductance alimentée par une tension alternative sinusoïdale de valeur et de fréquence spécifiées

3.3.2

inductance différentielle

inductance définie à partir de la dérivée du flux totalisé en fonction du courant (égal à la pente de la caractéristique magnétique)

Note 1 à l'article: Elle est déduite de l'enregistrement transitoire de la tension instantanée et du courant dans la bobine d'inductance ou de la mesure de la variation de flux magnétique.

3.3.3

inductance en courant pulsatoire

inductance détectée par le courant alternatif d'une valeur et une fréquence particulières superposées à un courant continu à travers la bobine d'inductance

Note 1 à l'article: Il convient de mentionner que le taux d'ondulation d'un courant ondulé, exprimé en pourcentage, est défini par convention par la formule:

$$\frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \times 100$$

dans laquelle I_{\max} et I_{\min} représentent respectivement la valeur maximale et la valeur minimale de l'onde de courant.

Note 2 à l'article: Elle est déduite d'un relevé de la tension aux bornes.

Note 3 à l'article: L'inductance en courant pulsatoire est souvent appelée inductance incrémentale.

4 Classification

4.1 Classification des transformateurs

Les transformateurs mentionnés ci-dessus peuvent être:

- des transformateurs de traction pour alimenter les circuits de propulsion, et éventuellement d'autres matériels;
- des transformateurs auxiliaires pour alimenter le matériel électrique à l'exception des circuits de propulsion.

Les enroulements mentionnés dans la présente Norme peuvent être:

- des enroulements côté réseau qui sont directement connectés à la ligne d'alimentation;
- des enroulements de traction qui alimentent les circuits de propulsion;
- des enroulements auxiliaires qui sont utilisés pour d'autres fonctions.

4.2 Classification des bobines d'inductance

Suivant leur utilisation, les bobines d'inductance peuvent être classées de la façon suivante:

- bobines d'inductance pour courant alternatif:
 - bobines d'inductance traversées par des courants alternatifs, telles que les bobines d'inductance de transition entre prises de changeurs de prises, les bobines d'inductance des circuits de freinage des moteurs à courant alternatif à collecteur, les bobines d'inductance d'antiparasitage, les bobines d'inductance de filtrage accordées, etc.
- bobines d'inductance pour courant continu:
 - bobines d'inductance traversées par des courants continus avec une composante alternative faible ou négligeable, telles que les bobines d'inductance de filtrage en courant continu, les shunts inductifs de moteurs de traction, les bobines d'inductance de circuits de freinage en courant continu, etc.
- bobines d'inductance pour courant ondulé:
 - bobines d'inductance traversées par des courants continus ou alternatifs présentant une ondulation périodique notable, telles que les bobines d'inductance de lissage de moteurs

de traction, les bobines d'inductance de filtrage sinusoïdal dans les convertisseurs auxiliaires, etc.

5 Conditions de service

Les conditions normales de service des transformateurs et des bobines d'inductance doivent être conformes à l'IEC 62498-1. Les conditions particulières de service doivent être convenues entre l'acheteur et le fabricant.

6 Courant assigné et profil de charge

6.1 Profil de charge

Un transformateur/une bobine d'inductance est conçu(e) pour fonctionner sur le train dans des conditions stables et transitoires (surtension), dans des conditions normales et de surcharge.

Il convient que l'acheteur spécifie le profil de charge conformément à l'Annexe E (informative). Le spectre des fréquences de courant doit être spécifié par la partie responsable.

6.2 Courant assigné

Le courant assigné d'un enroulement est le courant que cet enroulement peut supporter en régime permanent à la température de référence pour une charge continue.

Le courant assigné doit être calculé selon l'une des méthodes suivantes:

- a) courant efficace dérivé des profils de charge;
- b) en tenant compte du vieillissement thermique des matériaux isolants conformément à l'Annexe B (informative).

Il convient de veiller particulièrement aux différents modes de refroidissement et à la fenêtre de détermination de moyenne.

La température de référence pour une charge continue est la température du fluide de refroidissement à l'interface externe du transformateur/de la bobine d'inductance. Elle doit:

- c) soit être directement spécifiée par l'acheteur;
Il convient que les valeurs spécifiées reposent sur la température de l'air externe du véhicule (voir l'IEC 62498-1).
- d) soit être calculée par le fabricant sur la base de l'histogramme de température fourni par l'acheteur et la méthode de l'Annexe B (informative); voir la température de référence du fluide de refroidissement pour le calcul de la durée de vie en B.4.2.

Pour un enroulement de traction, le courant assigné doit correspondre à la prise principale. Cette définition du courant assigné s'applique dans l'hypothèse où les autres enroulements, qui sont en principe chargés, délivrent leur charge assignée.

7 Tension assignée et puissance d'enroulements de transformateur

7.1 Tension assignée côté réseau

La tension assignée côté réseau est la tension efficace applicable au groupe d'enroulements côté réseau dans les conditions normales de fonctionnement. Si cet enroulement est muni de prises, la tension assignée doit se référer à la prise principale.

Sauf accord particulier entre l'acheteur et le fabricant, la tension assignée côté réseau est spécifiée comme étant égale à la tension nominale du réseau de traction.

NOTE L'IEC 60850 donne la liste des tensions nominales des réseaux de traction.

7.2 Tension assignée secondaire

La tension assignée d'un enroulement secondaire d'un transformateur est la tension efficace à vide aux bornes de l'enroulement lorsque la prise principale de l'enroulement côté réseau du transformateur est alimentée à sa tension et à sa fréquence assignées.

7.3 Puissance assignée du transformateur

La puissance assignée d'un enroulement de transformateur est définie comme étant le produit de la tension assignée de cet enroulement par son courant assigné.

NOTE Les transformateurs sont généralement munis de plusieurs enroulements secondaires (traction, auxiliaires, chauffage du train, par exemple). La puissance assignée de l'enroulement côté réseau d'un transformateur peut être inférieure à la somme des puissances assignées de ses différents enroulements secondaires.

8 Prises de transformateur

En vue de permettre de modifier le rapport de transformation du transformateur, un ou plusieurs de ses enroulements peuvent être munis de prises intermédiaires, qui doivent être indiquées sur le schéma et dans la spécification, en précisant leurs caractéristiques limites de fonctionnement.

La prise principale est celle qui permet d'obtenir aux bornes des moteurs de traction la tension assignée de ces moteurs lorsqu'ils absorbent leur courant assigné, l'enroulement côté réseau du transformateur étant alimenté à sa tension et sa fréquence assignées.

Lorsque des prises intermédiaires sont placées à la fois sur les enroulements côté réseau et sur les enroulements de traction, les prises principales doivent être indiquées.

Pour les véhicules à moteur polycourant, les prises principales peuvent être différentes pour chaque système d'alimentation.

Le rapport de transformation à vide doit être défini pour la prise principale et pour les autres prises.

9 Refroidissement

9.1 Désignation des transformateurs et des bobines d'inductance selon le mode de refroidissement

Les transformateurs et les bobines d'inductance doivent être identifiés selon le mode de refroidissement employé. Les symboles littéraux à utiliser selon les modes de refroidissement doivent correspondre à ceux figurant dans le Tableau 1.

Tableau 1 – Symboles littéraux pour le mode de refroidissement

Nature du fluide de refroidissement	Symbole
Huile minérale ou autre liquide isolant avec point de feu ≤ 300 °C	O
Liquide isolant avec point de feu > 300 °C	K
Liquide isolant avec point de feu supérieur à son point d'ébullition	L
Gaz	G
Eau	W
Air	A
Nature de la circulation	Symbole
Naturelle	N
Forcée non dirigée	F
Forcée dirigée	D

Dans les transformateurs et les bobines d'inductance avec circulation forcée et dirigée, une certaine partie du flux d'huile forcé est canalisée pour passer à travers les enroulements. Cependant, certains enroulements peuvent avoir une circulation forcée non dirigée, par exemple les enroulements à prises séparées, les enroulements auxiliaires et les enroulements de stabilisation.

Le liquide de refroidissement doit recevoir l'approbation de l'acheteur.

9.2 Disposition des symboles

9.2.1 Transformateurs et bobines d'inductance enveloppés

Les transformateurs et bobines d'inductance doivent être identifiés par des symboles comportant quatre lettres correspondant à chacun des modes de refroidissement pour lequel un régime assigné est spécifié par le fabricant.

L'ordre dans lequel les symboles doivent être utilisés est donné au Tableau 2. Des traits obliques doivent être utilisés pour séparer les groupes de symboles caractérisant des modes de refroidissement différents.

Tableau 2 – Ordre des symboles

1 ^{re} lettre	2 ^e lettre	3 ^e lettre	4 ^e lettre
Désigne le fluide de refroidissement en contact avec l'enroulement		Désigne le fluide de refroidissement en contact avec le système de refroidissement extérieur	
Nature du fluide de refroidissement	Nature de la circulation	Nature du fluide de refroidissement	Nature de la circulation

Exemple un transformateur immergé dans un liquide avec circulation de liquide forcée et dirigée et circulation forcée d'air serait désigné par ODAF ou KDAF.

Pour les transformateurs immergés dans l'huile où il peut y avoir une circulation naturelle ou forcée avec flux d'huile non dirigé, les désignations types sont: ONAN/ONAF, ONAN/OFAF.

Pour un transformateur de type sec muni d'une enveloppe de protection non ventilée et à refroidissement naturel par air à l'intérieur et à l'extérieur de l'enveloppe, la désignation est: ANAN.

9.2.2 Transformateurs et bobines d'inductance non enveloppés

Les transformateurs et les bobines d'inductance de type sec sans enveloppe de protection sont désignés par deux symboles seulement pour le fluide de refroidissement qui est en

contact avec les enroulements ou avec le revêtement de surface dans le cas d'enroulements enrobés (résine époxy, par exemple).

Le mode de refroidissement d'un transformateur de type sec sans enveloppe de protection ou avec une enveloppe ventilée et à refroidissement naturel par air est désigné par: AN.

9.2.3 Refroidissement à air

Lorsque les transformateurs ou les bobines d'inductance sont refroidis par le courant d'air provoqué par le déplacement du véhicule, ou par un dispositif de ventilation forcée non soumis à essai avec le transformateur ou la bobine d'inductance, le débit (ou la vitesse) d'air sur lequel la puissance assignée du matériel repose doit être indiqué par l'acheteur.

10 Limites de température

10.1 Classification des matériaux isolants

Les différentes classes de matériaux solides (MIE – matériaux isolants électriques) et de systèmes (SIE – systèmes isolants électriques) actuellement utilisés pour l'isolation des enroulements des transformateurs et des bobines d'inductance auxquels s'applique la présente Norme sont définies dans l'IEC 60085 et répertoriées au Tableau 3.

Pour un matériau d'isolation solide donné, la classe thermique peut être différente suivant le milieu environnant (air, huile minérale, esters liquides, etc.).

La classe thermique des matériaux solides utilisés pour l'isolation des enroulements doit être indiquée par le fabricant.

10.2 Limites de température de l'isolation solide

La température maximale des composants de transformateur et de bobine d'inductance ne doit pas dépasser les limites indiquées au Tableau 3.

Les limites de température s'appliquent à la température maximale à court terme en tenant compte d'un point chaud.

Ces températures absolues sont associées aux conditions de fonctionnement spécifiées du cas le moins favorable.

Pour les limites de température de fonctionnement à long terme, voir 13.2.11.6.

Tableau 3 – Limites de température de l'isolation solide

Indice d'endurance thermique relatif (RTE, Relative Thermal Endurance) ou Indice d'endurance thermique évalué (ATE, Assessed Thermal Endurance)	Classe thermique	Température maximale pour type immergé °C a)	Température maximale pour type sec °C b)
RTE ou ATE < 90	70	Pas de ligne directrice	Pas de ligne directrice
90 ≤ RTE ou ATE < 105	90 (Y)	Pas de ligne directrice	Pas de ligne directrice
105 ≤ RTE ou ATE < 120	105 (A)	120	130
120 ≤ RTE ou ATE < 130	120 (E)	135	145
130 ≤ RTE ou ATE < 155	130 (B)	170	155
155 ≤ RTE ou ATE < 180	155 (F)	195	180
180 ≤ RTE ou ATE < 200	180 (H)	220	205
200 ≤ RTE ou ATE < 220	200 (N)	240	225
220 ≤ RTE ou ATE < 250	220 (R)	260	245
250 ≤ RTE ou ATE	250	Pas de ligne directrice	Pas de ligne directrice
<p>a) Pour les systèmes d'isolation de type immergé, les limites de température sont supérieures à celles du type sec, compte tenu de l'oxydation réduite de matériaux isolants. Les exceptions sont les systèmes d'isolation à base de cellulose (classes 105 et 120), pour lesquels les limites de température sont basées sur l'IEC 60076-7.</p> <p>b) Les limites pour les systèmes de type sec sont basées sur l'IEC 60076-12:2008, Tableau 2.</p>			

D'autres limites peuvent être adoptées dans le cadre d'un accord entre l'acheteur et le fabricant lorsque certaines combinaisons de matériaux isolants sont utilisées. Cela devient particulièrement important lorsque des matériaux de classes thermiques différentes sont combinés dans un système d'isolation. Ensuite, l'évaluation approfondie de la capacité thermique d'un tel système créé est nécessaire.

Pour estimer la durée de vie, voir l'Annexe B (informative) et l'Annexe C (informative).

10.3 Limites de température pour de l'isolation liquide

La température du liquide ne doit pas dépasser les limites du Tableau 4.

Tableau 4 – Limites de température pour de l'isolation liquide

	Huile minérale (IEC 60296)	Ester synthétique liquide (IEC 61099)	Liquide silicone (IEC 60836)
Classe de point de feu (IEC 61039)	O	K	K
Température maximale pour la charge à long terme, respiration de fluide en vrac ou scellé °C	105	130	155

Les valeurs de la température sont basées sur l'IEC 60076-14. Les limites de température recommandées sont valides pour l'environnement spécifique pour des systèmes d'isolation. Les systèmes scellés limitent l'impact de l'oxygène et de l'humidité en tant que facteurs de vieillissement typiques. Pour le système de respiration libre, l'entretien doit être adapté.

10.4 Limites de température pour les autres parties

La température maximale de surface de la cuve doit être convenue entre l'acheteur et le fabricant.

La température des noyaux et d'autres parties du transformateur ou de la bobine d'inductance ne doit en aucun cas atteindre une valeur endommageant ces parties ou des parties adjacentes, ou entraînant un vieillissement indésirable du liquide isolant.

11 Conception mécanique

Le comportement mécanique peut être démontré par le calcul FEA (Finite Element Analysis, analyse par éléments finis) (méthode, étalonnage de modèle et limites de fatigue) à convenir entre l'acheteur et le fabricant, ou par l'essai de chocs et de vibrations. Si la méthode FEA est choisie, il convient qu'elle comprenne au moins les cas de charge statique, l'analyse modale jusqu'à 60 Hz et une analyse de fatigue appropriée reposant sur la densité de puissance spectrale définie par les conditions d'essais de l'IEC 61373 en tant que signal d'entrée. Une évaluation appropriée des dommages doit être effectuée avec une méthode normalisée reconnue (moment unique, Rayleigh, etc.). Les données de matériau doivent être considérées en respectant la présente Norme. Le calcul doit prendre en compte les soudures et le coefficient de sécurité appliqué, conformément à la norme correspondante et convenue avec l'acheteur comme devant être utilisée. Le liquide doit être pris en compte et la façon dont il a été simulé doit être démontrée.

12 Plaques signalétiques

Chaque unité qui peut être traitée indépendamment doit être pourvue d'une plaque signalétique donnant au moins les indications ci-dessous, sauf accord entre l'acheteur et le fabricant:

- nom du fabricant;
- désignation du type ou numéro du fabricant;
- numéro de série du fabricant;
- date et lieu de fabrication;
- schéma des connexions;
- prises;
- puissance, tension et fréquence assignées de chaque enroulement;
- courant assigné (valeur efficace, ou courant continu moyen);
- valeur de l'inductance (à une ou plusieurs valeurs de courant de référence spécifiées);
- volume et type du fluide de refroidissement (uniquement pour le liquide rempli);
- nom du fluide de refroidissement (uniquement pour le liquide rempli);
- identification du mode de refroidissement;
- masse totale.

La plaque d'identification doit être placée de manière à être facile à examiner et à nettoyer dans le cadre d'opérations d'entretien normales, une fois que le transformateur est installé dans l'application finale.

13 Essais

13.1 Catégories d'essais

13.1.1 Généralités

Il y a trois catégories d'essais:

- les essais de type;
- les essais individuels de série;
- les essais d'investigation.

Les différents essais appartenant à chaque catégorie sont décrits ci-dessous.

13.1.2 Essais de type

Les essais de type sont effectués sur un seul élément de matériel d'un modèle donné. Les essais doivent être réalisés sur une unité choisie parmi le premier lot fabriqué.

Le matériel de fabrication brut doit être considéré comme ayant satisfait aux essais de type et doit être dispensé de ces essais si le fabricant présente les certificats dûment signés des essais de type déjà réalisés sur un matériel identique construit précédemment.

Les essais de type facultatifs ne doivent être réalisés que si cela est expressément spécifié dans la commande.

13.1.3 Essais individuels de série

Les essais individuels de série sont effectués sur tout le matériel d'une même commande. Pour certains matériels, après accord entre l'acheteur et le fabricant, les essais individuels de série peuvent être remplacés par des essais sur quelques matériels de la commande prélevés au hasard.

13.1.4 Essais d'investigation

Les essais d'investigation sont des essais spéciaux facultatifs qui sont réalisés sur un seul matériel dans le but d'obtenir des renseignements complémentaires sur ses performances; ils ne doivent être réalisés que si cela est expressément spécifié dans la commande.

Les résultats de ces essais ne doivent pas influencer l'acceptation du matériel, à moins qu'un accord contraire ne soit spécifié dans la commande.

13.2 Essais sur les transformateurs

13.2.1 Généralités – Liste des essais

Les vérifications, mesures et essais à effectuer sur les transformateurs de traction et auxiliaire sont indiqués au Tableau 5 qui précise également la catégorie de l'essai et les articles auxquels il convient de se reporter.

Dans la mesure du possible, les essais des bobines d'inductance différentielles qui ne peuvent être dissociées du transformateur doivent être réalisés en même temps que les essais de ce dernier. L'acheteur et le fabricant doivent convenir des essais à effectuer, si nécessaire, sur ces bobines d'inductance en tant que matériels séparés, afin de s'assurer qu'elles satisfont à toutes les exigences de la présente Norme.

Lorsque les changeurs de prises font partie intégrante des transformateurs, ils ne peuvent en être séparés pendant que ces derniers sont soumis à essai.

Tableau 5 – Liste des vérifications et des essais à réaliser sur les transformateurs de traction

Nature des essais	Article ou paragraphe		
	Type	Série	Analyse
Contrôles visuels	13.2.3	13.2.3	-
Essais fonctionnels	13.2.3 (facultatif)	13.2.3 (facultatif)	-
Masse	13.2.4	13.2.4 (facultatif)	-
Mesure de la résistance des enroulements	13.2.5	13.2.5	-
Mesure des rapports de transformation, polarités et couplages	13.2.6	13.2.6	-
Mesure du courant primaire et des pertes à vide	13.2.7.2	13.2.7.3	-
Mesure de la tension de court-circuit ou des impédances de court-circuit	13.2.8	13.2.8	-
Mesure des pertes dues à la charge	13.2.9.2	13.2.9.3	-
Détermination des pertes totales	13.2.10	-	-
Essai d'échauffement	13.2.11	-	-
Essai de résistance d'isolement	13.2.12 (facultatif)	13.2.12 (facultatif)	
Essais diélectriques sous pluie	13.2.13.1 type sec uniquement (facultatif)	13.2.13.1 type sec uniquement (facultatif)	13.2.13.1 type sec uniquement (facultatif)
Essai de tenue en tension induite	13.2.13.2	13.2.13.2	-
Essai de tenue en tension de source séparée	13.2.13.3	13.2.13.3	-
Essais de tension de tenue aux chocs de foudre	13.2.13.4	-	-
Essai de tenue à la tension entre bornes	13.2.13.5 (facultatif)	-	
Essai diélectrique de câblage	13.2.13.6	13.2.13.6	-
Essai de décharge partielle	13.2.14 type sec uniquement	13.2.14 type sec uniquement (facultatif)	13.2.14 type immergé dans un liquide uniquement
Essai de tenue au court-circuit	13.2.15 (facultatif)	-	-
Essai de chocs et vibrations	13.2.16 (facultatif)	-	-
Rapport de transmission de tension (VTR)	13.2.17 (facultatif)	-	-
Mesure du bruit	13.2.18	-	-
Mesure de la densité de flux magnétique de fuite	13.2.19 (facultatif)	-	-
Analyse de la réponse en fréquence électrique (FRA)	-	-	13.2.20
Mesure du courant d'appel	13.2.21 (facultatif)	-	-

13.2.2 Tolérances

Le Tableau 6 présente les tolérances applicables à certaines grandeurs assignées et à d'autres grandeurs lorsqu'elles sont sujettes à des garanties du fabricant se référant à la présente Norme.

Lorsqu'une tolérance dans un sens n'est pas indiquée, la valeur n'est soumise à aucune limitation dans ce sens.

Tableau 6 – Tolérances

Grandeur	Paragraphe	Tolérances
1. Résistance des enroulements	13.2.5	≤10 % ^{a)}
2. a) Pertes totales b) Pertes partielles	13.2.7, 13.2.9, 13.2.10	+10 % des pertes totales. +15 % de chacune des pertes partielles, à condition de ne pas dépasser la tolérance sur les pertes totales
3. Rapport de transformation à vide sur la prise principale. Rapport de transformation assigné	13.2.6	±0,5 % du rapport spécifié sur la plaque signalétique ou un pourcentage du rapport spécifié égal à 1/10 de la tension de court-circuit réelle, exprimée en pourcentage, à la charge assignée, en prenant la plus faible des valeurs
4. Tension de court-circuit à la prise principale	13.2.8	±10 % de la tension de court-circuit spécifiée pour cette prise. Un enroulement individuel ne doit pas s'écarter de plus de 3 % de la valeur moyenne d'enroulements identiques à l'intérieur du même transformateur, sauf accord contraire entre l'acheteur et le fabricant ^{b)}
5. Courant à vide	13.2.7	+30 % du courant à vide spécifié
6. Masse totale	13.2.4	Essai de type: ±10 % (masse totale < 100 kg) ±5 % (1 000 kg > masse totale ≥ 100 kg) ±3 % (masse totale ≥ 1 000 kg) Production en série: ±3 %
^{a)} Pour la production en série, une tolérance plus faible est prévue et doit être apportée par le fabricant en fonction des tolérances de taille de câble et d'enroulement. ^{b)} Une tolérance plus faible doit faire l'objet d'un accord entre l'acheteur et le fabricant.		

13.2.3 Contrôles visuels (essai de type, essai individuel de série) et essais fonctionnels (essai de type et essai individuel de série facultatifs)

Contrôles visuels: interfaces mécaniques (dimensions, marquages, etc.), niveau de configuration et plaques signalétiques.

Essais fonctionnels: sur tous les auxiliaires (indicateur de niveau d'huile, dispositifs de mesure de la tension et du courant, système de refroidissement, etc.).

Dans le cadre d'un accord entre l'acheteur et le fabricant, des essais de type additionnels peuvent être réalisés.

13.2.4 Masse (essai de type et essai individuel de série facultatif)

Le transformateur doit être pesé avec tous les accessoires compris dans la fourniture.

Si la masse avec les combinaisons de pièces mentionnées ci-dessus ne peut pas être mesurée, les pièces doivent être mesurées individuellement.

13.2.5 Mesure de la résistance des enroulements (essai de type et essai individuel de série)

La résistance de chacun des enroulements entre bornes accessibles doit être mesurée à froid en courant continu. Il convient de se référer à l'IEC 60076-1 pour les précautions à prendre en vue de réduire au minimum les effets d'auto-induction et de déterminer correctement la température des enroulements. La température à laquelle la mesure est réalisée doit également être notée.

La résistance de l'enroulement doit être corrigée aux températures de référence du Tableau 7 conformément à l'IEC 60076-1:2011, Annexe E.

Tableau 7 – Températures de référence

Classe thermique des systèmes d'isolation	Température de référence °C
105(A) 120(E)	85
130(B)	130
155(F) 180(H) 200 220	150

D'autres valeurs de référence peuvent être tirées de l'IEC 60076-1 et de l'IEC 60076-11 et peuvent être utilisées pour les transformateurs/bobines d'inductance dans le cadre d'un accord entre l'acheteur et le fabricant.

Pour les essais de type:

- a) si l'un des enroulements est muni de prises pour le réglage de la tension du circuit de traction, la résistance totale de la partie active dudit enroulement doit être mesurée pour chaque prise;
- b) si certains enroulements auxiliaires comportent plusieurs sections, la résistance de chacune d'elles doit être mesurée.

Pour les essais individuels de série:

- c) la mesure a) peut être limitée à la prise principale de l'enroulement;
- d) la mesure b) peut être effectuée seulement sur la totalité de l'enroulement auxiliaire.

13.2.6 Mesure des rapports de transformation, polarités et couplages (essai de type et essai individuel de série)

Les divers rapports de transformation entre paires d'enroulements doivent être mesurés pour chacune de leurs prises accessibles.

Si un transformateur à réglage haute tension comporte plusieurs enroulements secondaires de traction et si des rapports de transformation corrects ont été trouvés lors des mesures effectuées entre ces enroulements secondaires, il suffit de mesurer le rapport de

transformation entre l'un de ces enroulements secondaires et l'enroulement côté réseau pour toutes les prises de ce dernier.

La mesure du rapport de transformation d'un transformateur de traction à rapport fixe faisant partie d'un transformateur à réglage haute tension est un essai de type.

En plus de la mesure du rapport de transformation, les polarités et les couplages doivent être vérifiés conformément à l'IEC 60076-1.

13.2.7 Mesure du courant primaire et des pertes à vide (essai de type et essai individuel de série)

13.2.7.1 Généralités

Les mesures doivent être effectuées à la fréquence assignée, la forme d'onde de la tension appliquée étant sinusoïdale.

Si la tension d'essai n'est pas sinusoïdale, il convient de se référer à l'IEC 60076-1 pour la méthode de correction qui peut être utilisée. La tension doit être appliquée à un enroulement convenable du transformateur. Si celui-ci est à réglage haute tension, le changeur de prises et le primaire du transformateur de traction à rapport fixe doivent rester en circuit mais, dans tous les cas, tous les autres enroulements doivent être laissés ouverts.

La mesure de courant doit comprendre les valeurs moyenne et efficace.

13.2.7.2 Essai de type

Le courant et les pertes à vide doivent être mesurés pour les tensions côté réseau de $U_{\min 2}$, $U_{\min 1}$, U_n , $U_{\max 1}$ et $U_{\max 2}$ (IEC 60850). D'autres valeurs peuvent être envisagées en cas d'accord entre le fabricant et l'acheteur.

Pour un transformateur auxiliaire, le courant à vide de crête doit être mesuré à U_r , et si cela est exigé, à $1,1 U_r$ et $1,2 U_r$.

Si le transformateur est muni de prises ou est spécifié pour fonctionner à plusieurs tensions, les mesures doivent être réalisées pour les prises ou tensions spécifiées, l'une d'elles étant celle qui correspond à la prise principale.

L'acheteur peut exiger l'analyse des formes d'onde et harmoniques de courant et de tension.

13.2.7.3 Essai individuel de série

Les mesures doivent être réalisées comme spécifié en 13.2.7.2, mais uniquement pour la tension assignée U_r et pour la prise principale.

13.2.8 Mesure des tensions de court-circuit ou des impédances de court-circuit (essai de type et essai individuel de série)

13.2.8.1 Généralités

En raison de la diversité des dispositions des enroulements des transformateurs de traction et auxiliaires, l'ensemble des combinaisons de paires d'enroulements sur lesquelles les tensions de court-circuit doivent être mesurées doit être défini d'un commun accord entre l'acheteur et le fabricant. Il convient que les essais de type donnent des renseignements suffisants pour permettre le tracé des caractéristiques en charge du transformateur sur toutes les positions du matériel de changement de prises et pour le calcul des courants de défaut.

Les tensions de court-circuit doivent être mesurées selon la procédure décrite dans l'IEC 60076-1 pour les combinaisons suivantes des enroulements:

- a) enroulement côté réseau et ensemble des enroulements de traction en commun (essai de type et essai individuel de série);
- b) enroulement côté réseau et chaque groupe d'enroulement commutant simultanément ou presque simultanément (essai de type);
- c) enroulement côté réseau et chacun des enroulements de traction séparés (essai de type et essai individuel de série);
- d) enroulements côté réseau et chacun des enroulements auxiliaires séparés (essai de type).

Pour les essais de types a), b) et c), les mesures doivent être effectuées sur toutes les prises, tandis que pour l'essai de type d) et pour les essais individuels de série, il est uniquement nécessaire d'effectuer les mesures sur la prise principale pour l'enroulement côté réseau et sur une prise spécifiée pour les enroulements auxiliaires.

Si des mesures supplémentaires sur d'autres prises ou sur d'autres combinaisons d'enroulements sont exigées, celles-ci doivent faire l'objet d'un accord entre l'acheteur et le fabricant. La tension de court-circuit doit être mesurée à la fréquence assignée en utilisant une source de tension approximativement sinusoïdale. La mesure peut être effectuée à un courant quelconque compris entre 25 % et 100 % du courant assigné. Il convient que la tension appliquée à un enroulement ne dépasse pas 50 % de la tension assignée dudit enroulement et il convient que le courant dans cet enroulement ne dépasse pas sa valeur assignée.

La valeur mesurée doit être corrigée en la multipliant par le rapport du courant assigné au courant d'essai. Les valeurs ainsi obtenues doivent être corrigées à la température de référence appropriée indiquée au Tableau 7.

L'impédance de court-circuit doit être déduite de la tension de court-circuit et divisée en résistance et inductance de court-circuit (voir l'IEC 60076-1:2011, 3.7).

13.2.8.2 Mesure de l'inductance différentielle (essai de type)

Si cela est exigé, pour les caractéristiques d'inductance de court-circuit non linéaire, l'inductance différentielle doit être mesurée conformément à 13.3.7.4.

L'acheteur peut exiger la mesure de la variation d'impédance (résistance et inductance) en fonction de la fréquence.

13.2.9 Mesure des pertes dues à la charge fondamentale (essai de type et essai individuel de série)

13.2.9.1 Généralités

Les pertes dues à la charge fondamentale doivent être enregistrées lors de l'essai de type et de l'essai individuel de série pour la mesure des tensions ou impédances de court-circuit (voir 13.2.8), les valeurs ainsi obtenues devant être corrigées en les multipliant par le carré du rapport entre le courant assigné et le courant d'essai.

Les pertes dues à la charge fondamentale ainsi déduites doivent être corrigées en fonction de la température de référence appropriée donnée en 13.2.8.1, en tenant compte de la variation directe de I^2R (R = résistance en courant continu) en fonction de la résistance, toutes les autres pertes variant de façon inversement proportionnelle à la résistance. La résistance doit être déterminée comme indiqué en 13.2.5.

Les pertes dues à la charge fondamentale doivent être déterminées pour les combinaisons suivantes de paires d'enroulements:

- a) enroulement côté réseau/tous les enroulements secondaires de traction en parallèle ou en série, selon le cas;

b) enroulement côté réseau/chacun des enroulements secondaires auxiliaires.

Les pertes dues à la charge fondamentale doivent être corrigées en fonction des températures de référence du Tableau 7 conformément à l'IEC 60076-1:2011, Annexe E.

NOTE 1 Les pertes totales pour l'ensemble des circuits ne peuvent être obtenues par la simple addition des pertes mesurées pour chaque paire d'enroulements comme indiqué ci-dessus.

NOTE 2 Elles peuvent, dans certains cas, être calculées à partir de la résistance en courant continu de chaque enroulement et du courant approprié, en ajoutant les pertes supplémentaires déduites des essais.

13.2.9.2 Essai de type

Les pertes dues à la charge fondamentale doivent être déterminées pour les combinaisons a) et b) définies en 13.2.9.1. Pour la combinaison a), la détermination doit avoir lieu pour trois positions du matériel de changement de prises correspondant respectivement:

- à la prise principale;
- à la prise conduisant aux pertes maximales dues à la charge dans les enroulements de traction;
- à une autre prise.

13.2.9.3 Essai individuel de série

Les pertes dues à la charge fondamentale doivent être déterminées pour la combinaison a) de 13.2.9.1 uniquement, et limitées à la prise principale.

13.2.10 Détermination des pertes totales (essai de type)

Les pertes totales sont égales à la somme des pertes à vide (13.2.7) et des pertes dues à la charge (13.2.9, fondamentales et harmoniques) après correction de ces dernières à la température de référence des enroulements, qui est spécifiée au Tableau 7. Les pertes dues aux fréquences harmoniques induites par le fonctionnement du convertisseur doivent être calculées conformément à l'IEC 61378-1:2011, Annexe A, ou par une autre méthode à convenir entre l'acheteur et le fabricant, et sont additionnées aux pertes mesurées à la fréquence fondamentale.

Les pertes totales dans les circuits de traction d'un transformateur de traction sont calculées pour la prise principale et pour la prise conduisant aux pertes maximales dues à la charge dans les circuits de traction.

Les pertes totales d'un transformateur de traction sont calculées pour la combinaison de la charge de traction assignée et des charges de circuit auxiliaires assignées. Sauf accord contraire entre l'acheteur et le fabricant, les pertes associées à la charge calorifique du train sont généralement incluses dans ce calcul. La consommation de puissance du matériel auxiliaire du transformateur (pompe à huile, ventilateur, etc.) n'est pas incluse dans les pertes totales.

Sauf spécification contraire, pour des transformateurs autres que les transformateurs de traction, les pertes totales sont calculées pour la charge assignée de tous les enroulements en même temps.

13.2.11 Essai d'échauffement (essai de type)

13.2.11.1 Généralités

Les détails des conditions d'essais d'échauffement font l'objet d'un accord commun entre l'acheteur et le fabricant.

L'essai d'échauffement doit être effectué:

- a) à la puissance/au courant assigné(e) du transformateur/de la bobine d'inductance (voir l'Article 6) afin de déterminer les paramètres thermiques à inclure dans le rapport d'évaluation de la conformité;
- b) et, sauf indication contraire, dans les conditions de surcharge, afin de vérifier que les températures maximales pendant un temps court ne dépassent pas les limites du Tableau 3 et du Tableau 4;

et en deux étapes:

- étape 1 – Un essai d'échauffement doit être effectué en usine du fabricant, au courant/à la puissance assigné(e) avec un courant alternatif ou continu constant, sauf si le fabricant peut reproduire les formes d'onde spécifiées;
- étape 2 – Si l'étape 1 n'a pas été effectuée avec les formes d'onde spécifiées, un essai additionnel doit être effectué sur un banc d'essai avec le convertisseur associé.

NOTE 1 Pour un transformateur/une bobine d'inductance de type sec installé(e) à l'intérieur d'une armoire, l'étape 2 utilisant une charge équivalente connectée au convertisseur est également utilisée pour valider l'impact de l'installation sur les échauffements.

NOTE 2 Pour un transformateur/une bobine d'inductance immergé(e) dans un liquide, l'étape 2 a pour objectif de mesurer les pertes dues aux fréquences harmoniques.

Les enroulements munis de prises doivent être soumis à essai au niveau de leur prise présentant des pertes maximales ou d'une autre prise spécifiée.

Au cours de l'essai, tous les accessoires pour la circulation et le refroidissement du fluide de refroidissement sont disposés dans des conditions équivalentes à celles qui sont réalisées sur le véhicule (le bouchage spécifié de l'échangeur de chaleur et une chute de pression externe, etc.).

La température de la pompe à huile, des moteurs de ventilateur et de l'échangeur de chaleur installés sur le transformateur/la bobine d'inductance doit être mesurée et vérifiée par rapport à leur plage de températures de fonctionnement.

Des essais de température spécifiques peuvent être convenus entre l'acheteur et le fabricant afin de valider les différents modes du système de refroidissement (fonctionnement avec des ventilateurs de moteur à vitesse réduite ou avec une seule pompe, par exemple).

Pour les transformateurs/bobines d'inductance avec refroidissement par air forcé ou un type de refroidissement similaire à celui décrit en 9.2.3, l'essai doit être réalisé avec le débit ou la vitesse d'air spécifié ou avec le débit d'air calculé en tenant compte de la chute de pression externe supplémentaire résultant des transformateurs/bobines d'inductance intégré(e)s au véhicule.

L'acheteur doit définir la température du fluide de refroidissement à l'interface externe du transformateur/de la bobine d'inductance.

13.2.11.2 Méthodes de détermination de la température

Trois méthodes doivent être utilisées pour déterminer la température, en fonction de l'essai effectué:

- a) mesure directe de la température:

la température est mesurée directement avec un capteur de température (thermomètre résistif, thermocouple, fibre optique, autocollant sensible à la température, caméra infrarouge, etc.);

- b) mesure indirecte de la température:

la température est déduite des mesures d'autres paramètres physiques (la tension, le courant, la résistance, etc.). Par exemple, la température moyenne d'un enroulement peut être déterminée à partir de la variation de la résistance en courant continu;

c) méthode de calcul de la température:

dans certaines circonstances, la zone dans laquelle la température maximale peut survenir n'est pas aisément accessible pour mesurer directement la température. Dans ce cas, la température est mesurée directement en un point proche de la zone critique. L'échauffement entre ce point et la zone critique de température maximale doit ensuite être calculé. Le fabricant doit pouvoir fournir des informations relatives à la méthode de calcul et aux résultats d'essais réalisés sur un transformateur/une bobine d'inductance similaire à ceux/celles utilisé(e)s en référence.

13.2.11.3 Essai d'échauffement de transformateurs/bobines d'inductance de type immergé dans un liquide

Pour les transformateurs et les bobines d'inductance immergé(e)s dans un liquide, il n'est pas toujours pratique de mesurer directement les températures de point chaud.

Les températures du point chaud de l'enroulement peuvent être déterminées par mesure directe dans le cadre d'un essai spécial d'un commun accord entre le fabricant et l'acheteur.

Sinon, l'échauffement du point chaud de l'enroulement doit être déterminé par calcul sur la base du résultat d'un essai d'échauffement, comme suit:

- la température moyenne de l'enroulement doit être mesurée (mesure de température indirecte par variation de la résistance en courant continu);
- le fabricant doit soumettre à l'acheteur les résultats d'une étude concernant l'emplacement des points chauds, et la relation entre la température de point chaud et la température moyenne de l'enroulement.

Il convient que l'étude s'appuie sur:

- le champ de flux de fuite et la distribution des pertes additionnelles;
- le profil de circulation du liquide isolant à l'intérieur des enroulements dans les zones dans lesquelles les pertes additionnelles sont plus élevées.

Dans l'usine du fabricant, les échauffements doivent être déterminés en trois étapes:

– étape 1 – Essai d'échauffement de liquide:

Cet essai doit être réalisé par injection d'un courant d'essai dans les enroulements qui génèrent les pertes totales de transformateur/bobine d'inductance conformément à 13.2.10 et les pertes totales des autres composants à l'intérieur de la même cuve.

En cas d'accord entre l'acheteur et le fabricant, l'essai peut être réalisé avec des pertes plus faibles, mais pas moins de 80 % des pertes totales, et extrapolées aux pertes totales comme indiqué en 13.2.10.

Pour un transformateur/une bobine d'inductance à tension multiple, le schéma de tension générant les pertes les plus élevées doit être pris en compte.

Les données suivantes doivent être mesurées:

- température du liquide à l'entrée et la sortie de l'échangeur de chaleur;
- température et débit du fluide de refroidissement à l'interface externe.

– étape 2 – Essais d'échauffement d'enroulement:

Cet essai doit être réalisé selon la méthode d'injection de courant assigné conformément à l'IEC 60076-2 pour chaque schéma de tension d'alimentation.

S'il est accepté, cet essai doit également être effectué dans des conditions de surcharge spécifiées.

– étape 3 – Consolidation des essais:

Après les essais d'échauffement, le fabricant doit consolider les résultats et calculer la température de l'huile et la température de l'enroulement pour les conditions spécifiées

(comprenant les contraintes d'installation) et doit soumettre le rapport d'évaluation de conformité à l'acheteur.

À ce stade, le calcul doit inclure toutes les composantes de courant affectant la température interne et la température de l'enroulement pendant le fonctionnement normal du matériel et qui ne pouvaient pas être reproduites pendant les étapes 1 et 2 précédentes (les pertes dues aux fréquences harmoniques, par exemple).

Les températures de profil de charge doivent être calculées sur la base des résultats d'essais.

La méthode normalisée de détermination de l'échauffement de l'enroulement est l'injection de courant. Pour les transformateurs, l'injection de courant est assurée par la méthode de court-circuit conformément à l'IEC 60076-2.

Dans des cas particuliers, en cas d'accord, l'essai peut être effectué en appliquant une tension et un courant assignés par connexion à une charge adaptée. Cela est applicable principalement aux transformateurs présentant une faible puissance assignée.

Une méthode d'opposition peut également être convenue. Dans cette méthode, deux transformateurs, dont l'un est le transformateur soumis à essai, sont connectés en parallèle et excités à la tension assignée du transformateur soumis à essai. Au moyen de différents rapports de transformation ou d'une tension injectée, le courant assigné est amené à circuler dans les enroulements du transformateur soumis à essai.

Des recommandations peuvent être trouvées dans l'IEC 60076-2 pour:

- a) les termes et définitions;
- b) la mesure des différentes températures;
- c) la durée des essais;
- d) la détermination des températures du liquide et de l'enroulement;
- e) les corrections nécessaires des mesures.

13.2.11.4 Essai d'échauffement des transformateurs/bobines d'inductance de type sec

Dans des transformateurs/bobines d'inductance de type sec:

- le gradient de température entre le point chaud et la température moyenne de l'enroulement, ou la température superficielle de l'enroulement, peut être significativement élevé;
- le couplage thermique entre le(s) noyau(x) et les enroulements peut être important;
- les capteurs de température sont plus faciles à installer.

Pour la mesure directe de la température, des capteurs de température doivent être installés à des positions à convenir entre le fabricant et l'acheteur.

De plus, la température moyenne des enroulements doit être mesurée indirectement par la variation de leur résistance en courant continu.

Le gradient entre les mesures de capteur et la température moyenne des enroulements doit être examiné afin de bien confirmer que le point chaud de chaque enroulement a été mesuré.

Dans l'usine du fabricant, les échauffements doivent être déterminés en trois étapes, sauf accord contraire:

- étape 1 – Essai d'injection de courant:

Un courant d'essai doit être injecté dans les enroulements générant les pertes totales du transformateur/de la bobine d'inductance comme spécifié en 13.2.10, tant que les conditions d'équilibre des enroulements et du noyau magnétique ne sont pas atteintes.

Pour les transformateurs, l'injection de courant est effectuée par la méthode de court-circuit.

L'échauffement final est atteint lorsque l'échauffement devient constant. Ce stade est considéré comme étant atteint lorsque l'échauffement ne varie pas de plus de 2 K par heure dans les enroulements et le(s) noyau(x) magnétique(s). Les températures d'enroulement doivent ensuite être mesurées.

En cas d'accord entre l'acheteur et le fabricant, l'essai peut être réalisé avec des pertes plus faibles (pas moins de 80 % de pertes totales) et extrapolées aux pertes totales comme indiqué en 13.2.10.

- étape 2 – Essai de circuit ouvert (pour transformateur uniquement):

L'essai de circuit ouvert, à la tension assignée et la fréquence assignée, doit continuer jusqu'à ce que des conditions d'équilibre du/des enroulement(s) et du/des noyau(x) magnétique(s) soient atteintes. Les échauffements d'enroulements individuels doivent ensuite être mesurés.

L'essai de circuit ouvert peut être réalisé avant ou après l'essai d'injection de courant.

- étape 3 – Consolidation des essais:

L'échauffement total de chaque enroulement, avec pertes dans le(s) enroulement(s) et excitation normale du/des noyau(x), doit être calculé par le fabricant qui doit soumettre un rapport d'évaluation de conformité à l'acheteur.

Le calcul doit prendre en compte toutes les composantes de courant affectant la température interne et la température d'enroulement pendant le fonctionnement normal du matériel, mais qui n'ont pas pu être reproduites pendant les étapes 1 et 2 précédentes.

Par exemple, les pertes de noyau et d'enroulement dues aux harmoniques sont incluses à ce stade. Le cas échéant, la contribution des pertes dues aux fréquences harmoniques générées dans un noyau (dans le noyau de shunt d'un transformateur avec bobine d'inductance intégrée, par exemple) fait l'objet d'une attention particulière.

Il convient que la contribution du noyau à l'échauffement du point chaud de l'enroulement à vide soit la valeur indiquée ci-dessous ou la valeur mesurée par le fabricant pendant l'essai d'échauffement sur le transformateur/la bobine d'inductance:

- 5 K pour un enroulement externe;
- 25 K pour un enroulement interne.

Les températures de profil de charge doivent être calculées sur la base des résultats d'essais.

Dans des cas particuliers, en cas d'accord, l'essai peut être effectué en appliquant une tension et un courant assignés par connexion à une charge adaptée. Cela est applicable principalement aux transformateurs présentant une faible puissance assignée.

Une méthode d'opposition peut également être convenue.

13.2.11.5 Correction des déterminations de température

Il peut être nécessaire de corriger les mesures de température avant de les vérifier conformément aux critères:

- lorsque la température moyenne d'un enroulement est déterminée à partir de la variation de la résistance en courant continu, celle-ci doit être extrapolée au moment de l'arrêt conformément à l'IEC 60076-2;
- si les valeurs spécifiées de puissance ou courant injecté ne sont pas obtenues pendant l'essai d'échauffement, les résultats doivent être corrigés conformément à l'IEC 60076-2 pour des transformateurs/bobines d'inductance de type immergé et l'IEC 60076-12 pour les types secs. Cette correction doit comprendre l'effet de la température sur la résistance en courant continu et, par conséquent, sur les pertes (processus de calcul itératif);
- si l'essai d'échauffement n'a pas été réalisé à la température spécifiée du fluide de refroidissement, les résultats doivent être corrigés pour prendre en compte l'effet de la température sur la résistance en courant continu et, par conséquent, sur les pertes (processus de calcul itératif): voir 13.2.9.1 pour obtenir des instructions.

13.2.11.6 Critères d'essais d'échauffement

L'essai est déclaré comme étant réussi si, pour un composant du transformateur/de la bobine d'inductance:

- la température de point chaud consolidée, à la puissance/au courant assigné(e) (voir 6.2 et 7.3) et à la température du fluide de refroidissement de référence:
 - soit, ne dépasse pas la limite de température convenue entre l'acheteur et le fabricant;
 - soit, est compatible avec la durée de vie spécifiée. Une méthode et un exemple d'évaluation de la durée de vie sont décrits à l'Annexe B (informative) et à l'Annexe C (informative);
- la température de point chaud consolidée, dans les conditions les plus défavorables, ne dépasse pas la température du Tableau 3 et du Tableau 4.

13.2.12 Essai de résistance d'isolement (essai de type et essai individuel de série facultatifs)

Avant de commencer les essais diélectriques, la résistance d'isolement doit être mesurée à l'aide d'un mégohmmètre en appliquant au moins 1 000 V en courant continu entre les enroulements et entre l'enroulement et la terre. La température d'huile à l'essai doit être enregistrée. Si cela est exigé, la mesure de résistance d'isolement doit être répétée après la fin de l'essai.

La résistance d'isolement doit être supérieure à la valeur convenue entre l'acheteur et le fabricant.

13.2.13 Essais diélectriques (essai de type et essai individuel de série)

13.2.13.1 Généralités

Les essais diélectriques sur des transformateurs neufs ou des bobines d'inductance neuves sont réalisés dans les ateliers du fabricant, sur le transformateur/la bobine d'inductance à température ambiante et équipé(e) des accessoires qui pourraient avoir une influence sur ces essais.

Les normes associées sont l'IEC 60076-3 et l'IEC 60060-1 et l'IEC 60060-2.

Il convient de vérifier les distances d'isolation dans l'air et les lignes de fuite selon l'IEC 62497-1 pour toutes les parties qui ne sont pas immergées dans le fluide diélectrique.

En raison de la diversité des variantes, la configuration des connexions à adopter pour ces essais doit être définie dans chaque cas particulier.

Cependant:

- la masse doit être maintenue connectée aux divers points des enroulements qui y sont connectés directement en service;
- toutes les pièces conductrices non soumises à essai (le noyau, le bâti, la cuve ou le boîtier de transformateur/bobine d'inductance, les capteurs de température et les écrans diélectriques, par exemple) doivent être connectés à la terre;
- pour les transformateurs de traction à réglage "haute tension", le changeur de prises doit être connecté à la prise principale.

Les essais diélectriques comprennent:

- des essais de tenue en tension induite (voir 13.2.13.2);
- des essais de tenue en tension de source séparée à fréquence industrielle (voir 13.2.13.3);

- de plus, pour des transformateurs/bobines d'inductance de type sec, des essais diélectriques sous pluie peuvent être exigés par l'acheteur conformément à l'Annexe D (informative);
- un essai de tension de tenue aux chocs de foudre (voir 13.2.13.4);
- un essai de tenue à la tension entre bornes (voir 13.2.13.5);
- une mesure de décharge partielle (voir 13.3.11).

Pour les essais de tenue de tension induite et les essais de tension de source séparée, les tensions d'essais à utiliser sont données au Tableau 8 en tant que valeurs efficaces. La mesure directe de la tension efficace peut être remplacée par la mesure de la valeur crête de la tension. Il convient que cette valeur crête divisée par la racine carrée de deux soit égale à la valeur efficace donnée au Tableau 8.

Les tensions d'essais diélectriques du Tableau 8 sont définies pour une isolation principale du transformateur/de la bobine d'inductance.

Pour tous les enroulements connectés à un convertisseur de puissance générant des ondes de tension raides:

- l'acheteur doit spécifier les amplitudes de tension de crête répétitive (U_{mT} et U_{mG}), la tension continue de boucle, le taux d'augmentation de tension et la fréquence de répétition;
- il convient procéder à une revue de conception détaillée afin de s'assurer que le concept d'isolation a pris en compte les contraintes diélectriques répétées induites par une valeur dv/dt élevée et la surtension associée.

Tableau 8 – Tension d'essai diélectrique

Tension nominale U_n [V]	Tension assignée d'isolement U_{Nm} (inférieur strictement) [V] ^{a)}	Enroulement directement connecté à la ligne de contact ou protégé conformément à OV3 U_a/U_{Ni} [kVr.m.s./kVcrête]	Enroulement protégé conformément à OV2 U_a/U_{Ni} [kVr.m.s./kVcrête]
600	720	3,3 / 5	2,8 / 4
750	900	4,0 / 6	3,4 / 5
1 500	1 800	6,0 / 12	5,6 / 10
-	2 300 ^{b)}	7 / 15,5	6,6 / 12
3000	3 700	11,5 / 25	10 / 18
-	4 800 ^{b)}	13 / 25	11,6 / 18
-	6 500 ^{b)}	17 / 30	15 / 25
11 000	17 250	38 / 95	N.A.
12 000	17 250	38 / 95	N.A.
12 500	17 250	38 / 95	N.A.
15 000	17 250	38 / 95	N.A.
20 000	24 000	44 / 125	N.A.
25 000	27 500 ^{c)}	60 / 150	N.A.
50 000	60 000	120 / 300	N.A.

NOTE Les enroulements directement connectés à la ligne de contact doivent être protégés par une protection à maximum de tension. Seuls OV3 et OV2 sont pris en compte.

a) Pour les tensions plus faibles, voir l'IEC 60077-1.

b) Cette tension est utilisée pour des tensions continues de boucle intermédiaires.

c) Pour des valeurs plus élevées de U_{Nm} , des tensions d'essais doivent être convenues entre l'acheteur et le fabricant.

13.2.13.2 Essai de tenue en tension induite (essai de type et essai individuel de série)

Cet essai a pour principal objet de contrôler l'isolation entre spires, bobines et prises de tous les enroulements concernés.

Pour les enroulements dont une extrémité ou une prise est en permanence mise à la terre, cet essai constitue simultanément un essai de tenue en tension de source séparée pour l'extrémité de l'enroulement isolée de la terre.

Pendant l'essai, une extrémité des enroulements couplés autre que celui utilisé pour l'alimentation doit être connectée à la terre par une de ses bornes.

Les tensions d'essais U_a doivent être conformes au Tableau 8, sauf accord contraire.

Une autre tension doit être appliquée aux bornes d'un enroulement du transformateur. La forme de la tension doit être aussi proche que possible d'une forme sinusoïdale et sa fréquence doit être suffisamment supérieure à la fréquence assignée afin d'éviter un courant magnétisant excessif pendant l'essai.

La valeur de crête de la tension d'essai induite doit être mesurée. La valeur de crête divisée par la racine carrée de deux doit être égale à la valeur d'essai.

L'essai doit commencer à une tension n'étant pas supérieure à un tiers de la valeur d'essai, et la tension doit être augmentée à la valeur d'essai aussi rapidement que possible avec la

mesure. À la fin de l'essai, la tension doit être rapidement réduite à moins d'un tiers de la valeur d'essai avant désactivation.

Le temps d'essai à la tension d'essai totale doit être de 60 s pour une fréquence d'essai jusqu'à et incluant deux fois la fréquence assignée, sauf spécification contraire. Lorsque la fréquence d'essai est supérieure à deux fois la fréquence assignée, le temps d'essai en s de l'essai doit être:

$$120 \times (\text{fréquence assignée} / \text{fréquence d'essai}) \text{ mais pas moins de 15 s.}$$

Lors de l'essai d'un enroulement par tension induite, il convient de s'assurer que les tensions auxquelles se trouvent portés les différents enroulements couplés magnétiquement n'excèdent pas les valeurs d'essais maximales.

Pour des transformateurs auxiliaires, sauf spécification contraire, la tension induite est de $2 \times U_r$ (tension assignée). Voir l'IEC 60076-3.

Pour les enroulements primaires de transformateurs de traction, les tensions d'essais figurant au Tableau 8 s'appliquent.

Pour les transformateurs auxiliaires, l'essai par tension induite constitue également un essai de tension entre phases.

Le montage d'essai induit pour le transformateur de traction et le transformateur auxiliaire est présenté à la Figure 1. Il est à noter que l'alimentation peut être assurée depuis le côté primaire ou secondaire pour les transformateurs auxiliaires.

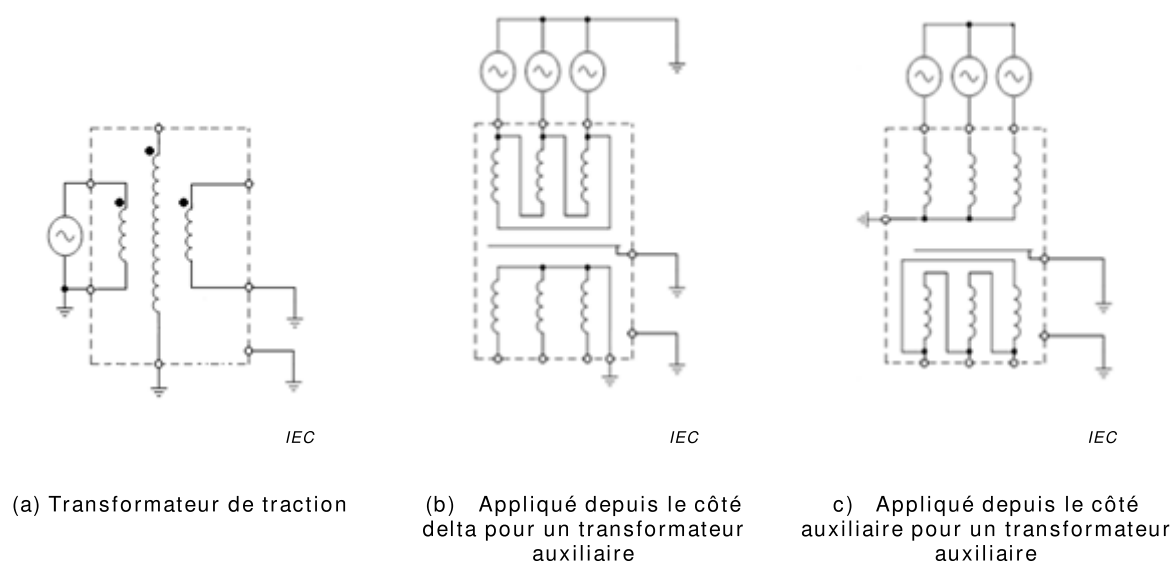


Figure 1 – Exemples de montage pour les essais de tenue de tension induite

L'essai est réussi si la tension et le courant restent stables pendant l'essai.

13.2.13.3 Essai de tenue en tension de source séparée (essai de type et essai individuel de série)

Cet essai a pour principal objet de vérifier l'isolation entre des groupes d'enroulements, des prises et la terre. Voir Figure 2.

Cet essai est applicable à tous les enroulements de transformateurs. L'essai de tension de source séparée doit être effectué en utilisant une source séparée fournissant une tension

alternative monophasée, qui doit être appliquée successivement entre chaque enroulement soumis à essai et toutes les bornes des enroulements restants, connectés conjointement à la terre. Pour la forme d'onde de la tension d'essai, la fréquence minimale, les détails d'application de la tension d'essai, il convient de se référer à l'IEC 60076-3.

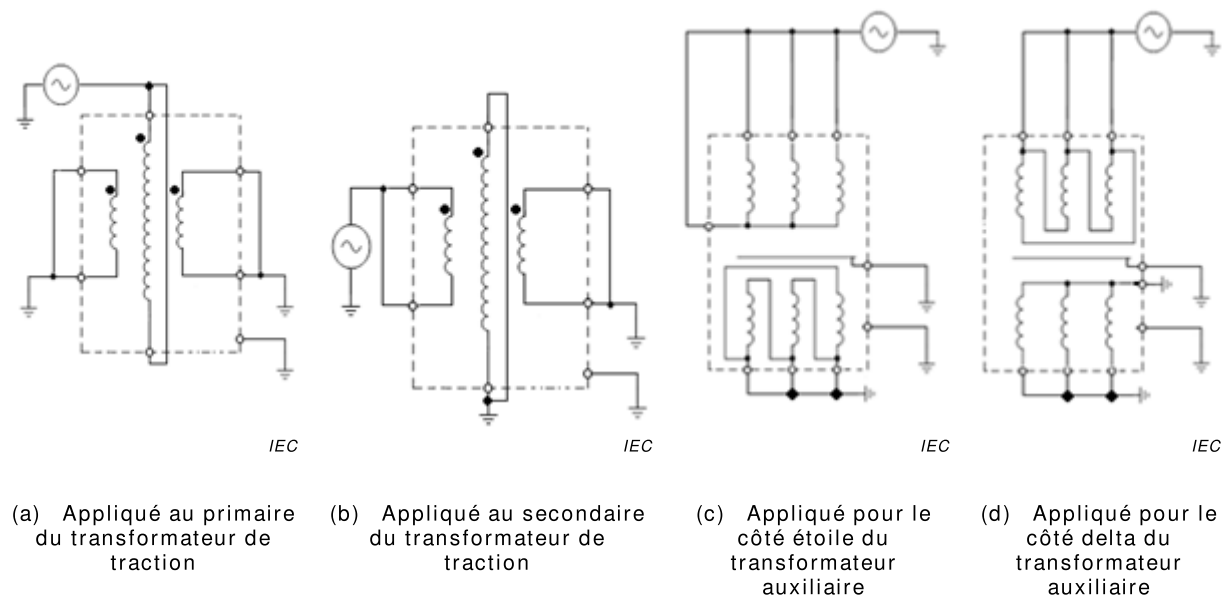


Figure 2 – Exemples de montage pour les essais de tenue de tension de source séparée

La tension d'essai doit être conforme à U_a du Tableau 8, et la pleine tension d'essai doit être appliquée pendant 60 s.

Les enroulements reliés à la ligne de contact avec une isolation non uniforme et qui ne sont pas mis à la terre en permanence à l'intérieur du transformateur doivent être soumis à un essai de tenue en tension de source séparée à une valeur de tension à convenir entre l'acheteur et le fabricant.

L'essai est réussi si la tension et le courant restent stables pendant l'essai.

13.2.13.4 Essai de tension de tenue aux chocs de foudre (essai de type)

13.2.13.4.1 Généralités

Cet essai a pour principal objet de vérifier les isolations d'enroulement interne, bobine à bobine et bobine à la terre contre une surtension de foudre et des transitoires rapides. Cet essai est obligatoire pour les enroulements de transformateur de traction et auxiliaires directement alimentés depuis la ligne de contact.

Pendant l'essai:

- toutes les bornes accessibles non soumises à essai doivent être directement mises à la terre (voir la Figure 3);
- l'extrémité à la terre de l'enroulement côté réseau doit être mise à la terre soit directement, soit par l'intermédiaire d'une impédance de faible valeur;
- tous les dispositifs de protection contre les surtensions, reliés en service à la borne côté réseau, doivent être retirés ou déconnectés;
- dans le cas de réglage haute tension, le changeur de prises doit être connecté à la prise principale.

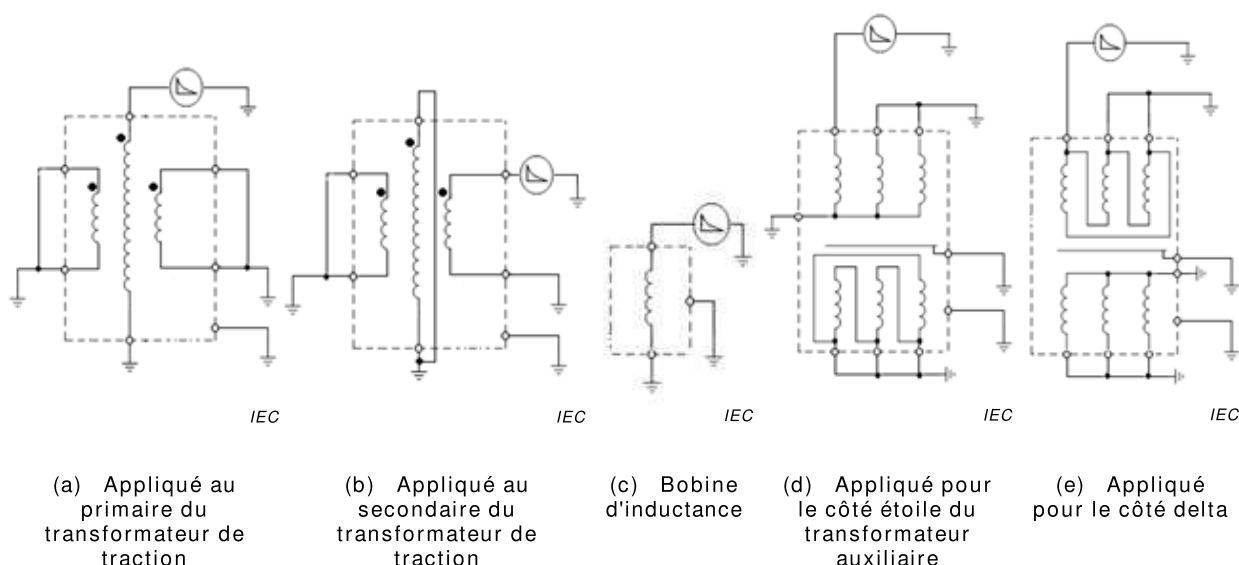


Figure 3 – Exemples de connexions d'essais aux ondes de choc pour des transformateurs de traction, des bobines d'inductance et des transformateurs auxiliaires

L'impulsion d'essai doit être un choc de foudre normalisé plein: $1,2 \mu\text{s} (\pm 30 \%) / 50 \mu\text{s} (\pm 20 \%)$.

Sauf accord contraire, la valeur de crête de la tension appliquée doit être U_{Ni} conformément au Tableau 8.

Toutefois, dans certains cas, cette forme de choc normalisée ne peut pas être raisonnablement obtenue, en raison d'une faible inductance d'enroulement ou d'une capacité élevée à la terre. La forme du choc obtenue est souvent oscillatoire. Dans un tel cas, des tolérances plus larges peuvent être acceptées par accord entre l'acheteur et le fabricant. Voir l'IEC 60076-4.

Lorsque l'enroulement basse tension ne peut pas être soumis à des surtensions de foudre à partir du système basse tension, cet enroulement peut, par accord entre le fabricant et l'acheteur, être soumis à essai aux ondes de choc avec des surtensions transférées depuis l'enroulement haute tension. La méthode est décrite dans l'IEC 60076-3.

Lorsque la borne neutre est connectée à la terre, l'essai de tension de tenue aux chocs pour la borne neutre n'est pas exigé.

Lorsque la borne neutre d'un enroulement a une tension de tenue aux chocs spécifiée, l'essai est réalisé comme spécifié dans l'IEC 60076-3.

13.2.13.4.2 Séquence d'essai

La séquence d'essai doit être constituée d'une impulsion à une tension entre 50 % et 75 % de la pleine tension d'essai, et trois impulsions consécutives à pleine tension. Si, pendant l'une de ces applications, un contournement externe dans le circuit ou de part et d'autre d'un éclateur de traversée survient, ou si l'enregistrement oscillographique est défaillant sur l'un des canaux de mesure spécifiés, l'application doit être ignorée et une autre application est effectuée.

13.2.13.4.3 Critères d'essais

L'absence de différences significatives entre des transitoires de tension et de courant enregistrés à tension réduite et ceux enregistrés à pleine tension d'essai est un élément

démontrant que l'isolation a supporté l'essai. L'interprétation détaillée des enregistrements d'essais oscillographiques ou numériques et la discrimination des perturbations marginales et des enregistrements réels de défaillance exigent un niveau élevé de savoir-faire et d'expérience. D'autres informations sont données dans l'IEC 60076-4. En cas de doute sur l'interprétation des éventuelles divergences entre des enregistrements transitoires, trois impulsions consécutives à pleine tension doivent être appliquées, ou bien l'essai aux ondes de choc complet doit être répété.

L'essai doit être considéré comme positivement réussi si aucun écart supplémentaire et progressif n'est observé. Des observations additionnelles pendant l'essai (effets sonores anormaux, etc.) peuvent être utilisées pour confirmer l'interprétation des enregistrements transitoires, mais elles ne constituent pas elles-mêmes des données probantes. Toute différence de forme d'onde entre l'onde totale réduite et l'onde totale finale détectée par comparaison des deux enregistrements de transitoire de courant peut être une indication de défaillance ou d'écarts dus à des causes non dommageables. Il convient que ceux-ci soient examinés et expliqués de manière approfondie par un nouvel essai à onde réduite et à onde pleine. Des exemples de causes possibles de formes d'onde différentes sont le fonctionnement des dispositifs de protection, la saturation de noyau, ou les conditions dans le circuit d'essai extérieur au transformateur.

13.2.13.5 Essai de tenue à la tension entre bornes (essai de type facultatif)

L'essai de tenue à la tension entre bornes doit être réalisé comme spécifié en 13.3.10.4.

Cet essai est applicable uniquement aux enroulements de transformateur soumis de façon répétée à des formes d'onde de tension à front raide.

NOTE Par exemple, cet essai n'est pas applicable à l'enroulement côté réseau d'un transformateur de traction ou aux enroulements de transformateur 3 ph alimentés par l'intermédiaire d'un filtre sinusoidal, etc.

13.2.13.6 Essai diélectrique du câblage (essai de type et essai individuel de série)

Le câblage basse tension (auxiliaire) doit être soumis à essai avec un niveau de tension conforme à l'IEC 62497-1.

Ce paragraphe s'applique uniquement aux conducteurs à isolation galvanique utilisés pour l'alimentation des circuits basse tension et des composants auxiliaires (capteur thermique, pompe, par exemple).

13.2.14 Essai de décharge partielle (essai de type ou essai individuel de série facultatif pour le type sec, essai d'investigation pour le type immergé)

Cet essai a pour objet d'évaluer la capacité du système d'isolation à rester efficace tout au long de sa durée de vie. Le principe consiste à effectuer des mesures de décharge partielle afin de vérifier que le transformateur/la bobine d'inductance fonctionne en toute sécurité dans des conditions normales. Pour le transformateur/la bobine d'inductance de type immergé, des essais d'investigation de décharge partielle peuvent être convenus entre l'acheteur et le fabricant en référence à l'IEC 60076-3 pour l'essai de tension induite. Dans le cas des transformateurs/bobines d'inductance de traversée de type embrochable, une méthode appropriée doit être adoptée pour éviter une décharge partielle dans la traversée.

Des informations supplémentaires sur les mesures de décharge partielle peuvent être obtenues dans l'IEC 60270.

Pour les transformateurs/bobines d'inductance de type sec, il s'agit d'un essai de type. Cet essai peut être exigé par l'acheteur en tant qu'essai individuel de série. L'essai doit être effectué comme suit. Le niveau de charge apparente Q et la tension sont mesurés lorsqu'une tension efficace en courant alternatif (50 Hz ou 60 Hz) est appliquée (tension de source séparée) successivement entre chacun des enroulements à soumettre à essai et toutes les bornes des enroulements restants connectés à la terre.

Jusqu'à six valeurs doivent être enregistrées pendant l'essai, conformément à la Figure 4 et au Tableau 9.

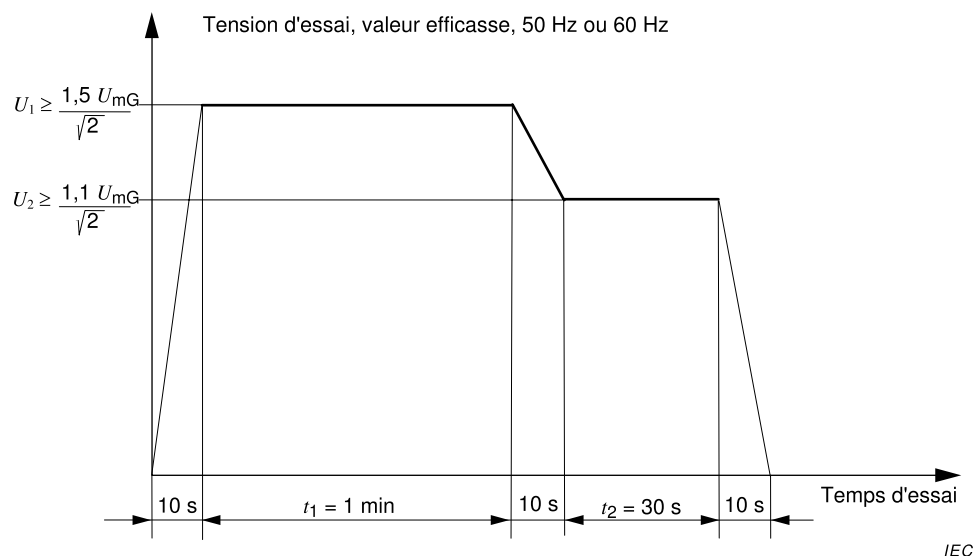


Figure 4 – Essai de décharge partielle: tension en fonction du temps

Tableau 9 – Mesures de décharge partielle

	Mesure	Condition	Commentaire	Essai de type ou essai d'investigation	Essai individuel série
1	Q_{BG}	-	$Q_{BG} \ll Q_{MAX}$	X	X
2	U_i	at Q_{MAX}	$> U_2$	X	
3	Q_1	at U_1	-	X	X
4	U_e	at Q_{MAX}	$\geq U_2$	X	
5	Q_2	at U_2	$\leq Q_{MAX}$ et aucune tendance à la hausse pendant t_2 .	X	X
6	U_{e-tot}	at Q_{BG}	-	X	

La séquence est la suivante:

- a) Avant de commencer l'essai, le bruit de fond de décharge partielle Q_{BG} est mesuré. Il convient que le bruit de fond soit nettement inférieur au critère Q_{MAX} afin de permettre une mesure suffisamment sensible et efficace des niveaux de tension d'apparition et d'extinction, et de l'amplitude de décharge partielle admissible maximale Q_{MAX} .

La tension est augmentée jusqu'à U_1 en 10 s et est maintenue pendant $t_1 = 1$ min (voir Figure 4). Pendant ce temps t_1 , des décharges partielles peuvent être observées.

U_1 doit être considéré comme étant égal à $1,5 U_{mG} / \sqrt{2}$ au minimum, où U_{mG} est la tension de crête répétitive maximale de part et d'autre de l'isolation soumise à essai.

- b) Lors d'une augmentation de tension:

- la tension d'apparition (U_i à laquelle Q atteint ou dépasse Q_{MAX}) doit être enregistrée;
- le niveau de décharge Q_1 à U_1 doit être enregistré.

- c) Après t_1 , la tension est diminuée à U_2 en 10 s et maintenue pendant $t_2 = 30$ s. Pendant les 5 dernières secondes de t_2 , le niveau de décharge partielle Q_2 est mesuré.

U_2 doit être considéré comme étant égal à $1,1 U_{mG} / \sqrt{2}$ au minimum.

d) Lors d'une diminution de tension:

- la tension d'extinction (U_e à laquelle Q passe au-dessous de Q_{MAX}) doit être enregistrée;
- le niveau de décharge Q_2 à U_2 doit être enregistré.

Si des décharges significatives sont encore observées à U_2 , la tension d'essai doit être diminuée plus avant jusqu'à U_{e-tot} lorsque les décharges apparaissent (jusqu'au bruit de fond Q_{BG}).

Critères d'acceptation – L'essai est réussi si:

- aucun effondrement de la tension d'essai ne se produit;
- le comportement de décharge partielle à U_2 ne présente pas une tendance à la hausse continue;
- Le niveau continu de charge apparente Q à U_2 pendant les 5 dernières secondes ne dépasse pas le niveau admissible Q_{MAX} , à convenir entre l'acheteur et le fabricant.

Par exemple, pour des composants de type sec, Q_{MAX} est généralement choisi entre 10 pC et 50 pC. La valeur de Q_{MAX} est moins importante si l'extinction est brusque.

Pour un essai de type ou l'essai d'investigation, si aucune décharge significative n'est observée à U_1 , la tension d'essai doit être augmentée jusqu'à ce qu'une décharge atteigne la limite de décharge Q_{MAX} ou que la tension atteigne la tension d'essai de tenue par source séparée ou la tension d'essai induite.

Il convient de réaliser l'essai de type dans des conditions chaudes (voir D.4.1, par exemple) et froides (température ambiante, par exemple).

Les tensions d'apparition et d'extinction de décharge partielle peuvent être plus faibles dans des conditions chaudes. Si l'essai individuel de série est réalisé dans des conditions froides, les tensions d'essais supérieure et inférieure (U_1 , U_2) doivent être définies d'un commun accord entre l'acheteur et le fabricant (U_1 ne devant toutefois jamais dépasser U_a).

13.2.15 Essai de tenue au court-circuit (essai de type facultatif)

13.2.15.1 Généralités

S'il est exigé par l'acheteur, cet essai doit être demandé dans les spécifications d'appel d'offres, faire l'objet d'un accord entre l'acheteur et le fabricant dans la commande et être conforme à l'IEC 60076-5.

Le transformateur/la bobine d'inductance, ainsi que tous les matériels et accessoires, doivent être conçus et construits de manière à supporter sans dommages les effets thermiques et dynamiques de courts-circuits externes. La présence d'impédances et/ou de dispositifs de protection (fusibles, commutateurs, etc.) dans les circuits correspondants doit être prise en compte. La puissance apparente de court-circuit du système à l'emplacement du transformateur/de la bobine d'inductance doit être spécifiée par l'acheteur dans son appel d'offres afin d'obtenir le courant de court-circuit à utiliser pour la conception et les essais.

La conception thermique doit être conforme à l'IEC 60076-5.

La valeur maximale de la puissance de court-circuit disponible à l'entrée du véhicule doit être spécifiée par l'acheteur au fabricant.

La tension à prendre en compte est la valeur maximale (U_{max1}) du réseau de traction, comme spécifié dans l'IEC 60850.

Pour les transformateurs, la valeur de crête du courant d'essai et la valeur du courant de court-circuit symétrique doivent être calculées conformément à l'IEC 60076-5.

Les courants de court-circuit pour les bobines d'inductance doivent être définis par l'acheteur.

Sauf accord contraire, les essais doivent être réalisés avec des accessoires de protection (dispositif de limitation de pression, etc.).

Si les enroulements sont équipés de prises, la réactance/l'inductance et, si cela est exigé, la résistance doivent être mesurées pour les positions correspondant aux prises aux auxquelles des essais de court-circuit seront réalisés.

Toutes les mesures de réactance/d'inductance doivent présenter une répétabilité meilleure que $\pm 0,2\%$. Un rapport contenant le résultat des essais individuels de série doit être disponible au début des essais de court-circuit.

13.2.15.2 Essais

Pour obtenir la valeur de crête initiale du courant dans l'enroulement de phase soumis à essai, le moment d'activation doit être ajusté au moyen d'un commutateur synchrone. Afin de vérifier les valeurs des courants d'essais, des enregistrements oscillographiques doivent toujours être réalisés. Afin d'obtenir l'asymétrie maximale du courant dans l'enroulement de phase, l'activation doit se produire au moment du passage à zéro de la tension appliquée à cet enroulement.

Pour des transformateurs/bobines d'inductance monophasés, le nombre d'essais doit être de trois, pour des transformateurs / bobines d'inductance triphasés, le nombre d'essais doit être neuf.

La durée de chaque essai doit être de 0,25 s avec une tolérance de $\pm 10\%$.

Pendant chaque essai, des enregistrements oscillographiques des tensions et courants appliqués doivent être effectués.

Après chaque essai, les oscillogrammes obtenus au cours de l'essai doivent être vérifiés.

13.2.15.3 Détection des défauts et évaluation des résultats d'essais

Une fois que l'essai est terminé, les parties externes du transformateur/de la bobine d'inductance doivent être examinées. Les résultats des mesures de réactance/inductance de court-circuit et les oscillogrammes obtenus pendant les différentes étapes des essais doivent être examinés afin de rechercher toute indication d'anomalies possibles pendant les essais, en particulier des indications de changement de la réactance/inductance de court-circuit.

Différentes procédures sont suivies à ce stade pour des transformateurs/bobines d'inductance. Sauf accord contraire, la partie active doit être enlevée de la cuve (transformateurs/bobines d'inductance immergés dans un liquide uniquement) pour l'examen du noyau et des enroulements et comparée à son état avant l'essai, afin de mettre en évidence des défauts apparents possibles tels que des changements de position de conducteur, des déplacements, etc., qui, malgré des essais individuels de série réussis, pourraient compromettre le fonctionnement sûr du transformateur/de la bobine d'inductance.

L'examen visuel de la structure de support ne doit mettre en évidence aucun signe de changement d'état mécanique susceptible de modifier le fonctionnement du transformateur/de la bobine d'inductance. Si, après le programme d'essais de court-circuit, le système de serrage de l'enroulement s'est dégradé, ou que le nombre ou les dimensions de fissures superficielles ont significativement augmenté, l'essai de court-circuit de transformateur/bobine d'inductance est considéré comme un échec. En cas de doute, jusqu'à trois essais de court-

circuit supplémentaires avec un courant pleinement décalé doivent être appliqués pour vérifier que la condition surveillée s'est stabilisée. Si la dégradation se poursuit, le transformateur/la bobine d'inductance doit être considéré(e) comme ayant échoué à l'essai. Si les conditions se stabilisent après un ou deux essais de court-circuit supplémentaires avec des essais individuels de série réussis après des essais de court-circuit, le transformateur/la bobine d'inductance doit être considéré(e) comme ayant réussi l'essai de court-circuit.

Tous les essais individuels de série, y compris les essais diélectriques à 80 % de la valeur d'essai prescrite doivent être répétés. S'il est spécifié, un essai aux chocs de foudre doit être effectué à ce stade.

Pour considérer que le transformateur/la bobine d'inductance ont réussi l'essai de court-circuit, les conditions suivantes doivent être remplies:

- les résultats des essais de court-circuit et les mesures et vérifications effectuées pendant les essais ne mettent en évidence aucune condition de défaut;
- les essais individuels de série ont été répétés avec succès, l'essai aux chocs de foudre, s'il est spécifié, et les essais diélectriques sous pluie pour des transformateurs/bobines d'inductance de type sec, s'ils sont spécifiés, ont été réalisés avec succès;
- si une analyse de la réponse en fréquence (FRA) est exigée pour évaluer l'état mécanique des enroulements, les résultats des mesures avant et après l'essai de court-circuit doivent être discutés entre le fabricant et l'acheteur. La méthode doit être conforme à l'IEC 60076-18 ou celle définie en 13.2.20;
- l'examen de la partie active sortie de la cuve ne met pas en évidence des défauts tels que des déplacements, un décalage des laminages, une déformation des enroulements, des connexions ou structures de support, dont l'étendue pourrait compromettre le bon fonctionnement du transformateur;
- aucune trace de décharge électrique interne n'est observée;
- les valeurs de réactance de court-circuit en ohms, ou l'inductance en mH évaluées pour chaque phase à la fin des essais, ne diffèrent pas des valeurs originales de plus de:
 - 2 % pour des transformateurs/bobines d'inductance avec des bobines concentriques circulaires et des bobines non circulaires en sandwich;
 - 7,5 % pour des transformateurs/bobines d'inductance avec des bobines concentriques non circulaires ayant une impédance de court-circuit de 3 % ou plus. La valeur de 7,5 % peut être réduite par accord entre le fabricant et l'acheteur, sans toutefois aller au-dessous de 4 %.

De plus, pour des transformateurs de type sec, des essais diélectriques sous pluie peuvent être exigés conformément à l'Annexe D (informative).

13.2.16 Essai de chocs et de vibrations (essai de type facultatif)

13.2.16.1 Généralités

S'il est exigé par l'acheteur, cet essai doit être demandé dans les spécifications d'appel d'offres et faire l'objet d'un accord entre l'acheteur et le fabricant dans la commande et être conforme à l'IEC 61373.

L'essai est destiné à mettre en évidence une faiblesse/erreur qui peut conduire à des problèmes en conséquence du fonctionnement dans des environnements dans lesquels il est connu que des vibrations et des chocs surviennent pendant le fonctionnement d'un véhicule ferroviaire. Ceci n'est pas destiné à représenter un essai de durée de vie totale. Cependant, les conditions d'essais sont suffisantes pour démontrer avec un degré de confiance raisonnable que le matériel survive pendant la durée de vie spécifiée dans les conditions de service. Les essais suivants sont obligatoires pour la conformité à la norme IEC 61373:

- essai fonctionnel aléatoire:

non exigé pour un transformateur et une bobine d'inductance;

– essai de durée de vie simulé:

cet essai a pour objet de déterminer l'intégrité mécanique du matériel à des niveaux de service augmentés. Il n'est pas nécessaire de démontrer la capacité à fonctionner dans ces conditions;

– essai de choc:

l'essai de choc a pour objet de simuler des événements de service rares. Il n'est pas nécessaire de démontrer la fonctionnalité pendant cet essai. Cependant, il est nécessaire de démontrer qu'aucun changement d'état opérationnel ne survient, qu'il n'y a pas de déformation visuelle et que l'intégrité mécanique n'a pas changé. Ces points doivent être clairement présentés dans le rapport d'essai final.

Avant et après l'essai, la fonction de transfert mécanique doit être établie afin de vérifier l'intégrité mécanique et les modes de résonance.

13.2.16.2 Essais

13.2.16.2.1 Essais de durée de vie simulée à des niveaux de vibration aléatoires plus importants

Le matériel doit faire l'objet d'une période de conditionnement totale de 15 h, laquelle doit en principe être divisée en périodes de 5 h de conditionnement dans chacun des trois axes mutuellement perpendiculaires.

Si un essai à plusieurs axes est utilisé, la durée totale est de 5 h.

Il est recommandé de réaliser l'essai sans fixation résiliente du transformateur/de la bobine d'inductance.

Si, au cours de l'essai, une surchauffe du matériel est considérée comme étant problématique, l'essai peut être interrompu pendant un certain temps afin de permettre au matériel de refroidir. Cependant, la durée totale de 5 h de vibration doit être atteinte. Si les essais sont interrompus, cela doit être indiqué dans le rapport. Les essais doivent être réalisés pendant les essais de durée de vie conformément à l'IEC 61373:2010 pour la catégorie 1 de classe A ou B suivant la spécification de l'acheteur.

13.2.16.2.2 Essai de choc

Les équipements sous tests doivent être soumis à une séquence d'impulsions semi-sinusoïdales uniques conformément à l'IEC 61373:2010 pour la catégorie 1 de classe A ou B suivant la spécification de l'acheteur.

Si, pour des raisons pratiques, le 5 g ne peut pas être satisfait, la valeur peut être réduite (mais pas à moins de 3 g) à condition de respecter le taux de changement de vitesse.

13.2.16.2.3 Détection des défauts et évaluation des résultats d'essais

Un examen visuel du transformateur/ de la bobine d'inductance ne doit mettre en évidence aucun signe de dommages. Les couples de serrage des fixations mécaniques et électriques doivent être vérifiés. Pour un transformateur/une bobine d'inductance de type liquide, les parties actives doivent faire l'objet d'un examen visuel. Toutes les parties mobiles (pales, capteurs de niveau d'huile, pompe, ventilateurs, etc.) associées au transformateur/à la bobine d'inductance doivent être soumises à un essai fonctionnel.

Les essais de qualification à répéter après les essais de chocs et de vibrations, sauf accord contraire entre l'acheteur et le fabricant, doivent comporter:

Pour les transformateurs:

- a) la mesure de la résistance des enroulements;
- b) la mesure du courant et des pertes à vide;
- c) la mesure de la tension de court-circuit;
- d) l'essai de tenue en tension induite et/ou de tenue en tension de source séparée;
- e) de plus, pour des transformateurs de type sec, des essais diélectriques sous pluie peuvent être exigés par l'acheteur conformément à l'Annexe D (informative).

Pour des bobines d'inductance:

- f) la mesure de la résistance des enroulements;
- g) la mesure de l'inductance;
- h) la mesure des pertes;
- i) l'essai de tenue en tension de source séparée;
- j) de plus, pour des bobines d'inductance de type sec, des essais diélectriques sous pluie peuvent être exigés par l'acheteur conformément à l'Annexe D (informative).

Si les résultats des essais des points a), b), c) et/ou f), g), h) de 13.2.16.2.3 présentent une différence inférieure à 2 % par rapport aux valeurs mesurées pendant les essais d'origine, le transformateur/la bobine d'inductance est considéré(e) comme ayant satisfait aux essais de chocs et de vibrations. Pour l'essai des points d), e), i) et j), la tension d'essai doit être égale à 80 % des valeurs utilisées pour l'essai d'origine.

Si une analyse de la réponse en fréquence (FRA) est exigée pour évaluer l'état mécanique des enroulements, les résultats des mesures avant et après l'essai de chocs et de vibrations doivent être discutés entre le fabricant et l'acheteur. La méthode doit être conforme à l'IEC 60076-18 ou à celle définie en 13.2.20.

13.2.17 Rapport de transmission de tension – VTR (essai de type facultatif)

Cet essai a pour objet d'évaluer la tension la plus élevée transmise de façon capacitive entre des enroulements primaires et adjacents et de vérifier si ces enroulements sont dans la classe de tension assignée d'isolement (U_{Nm}) correcte. Des informations sur les tensions transmises peuvent être trouvées dans l'IEC 60076-3.

Une source basse tension de choc ou de forme d'onde carrée en courant alternatif (10 V; 1 A, par exemple) et un échauffement maximal de 1,5 μ s au maximum sont appliqués au primaire entre la borne HT et l'autre borne connectée à la terre.

La configuration appropriée (I, II, III) est choisie en fonction du schéma de connexions de l'acheteur et les tensions d'enroulement secondaire correspondantes sont mesurées.

Il convient que la première tension de crête extrapolée par le facteur VTR à U_{Ni} pour le primaire soit inférieure à la tension assignée de tenue aux chocs (U_{Ni}) du secondaire ou à la valeur spécifiée par l'acheteur.

Les configurations de borne d'enroulement typiques et l'essai VTR (mis à la terre, maintenu de façon capacitive ou résistance de liaison à la terre élevée) sont présentés sur la Figure 5:

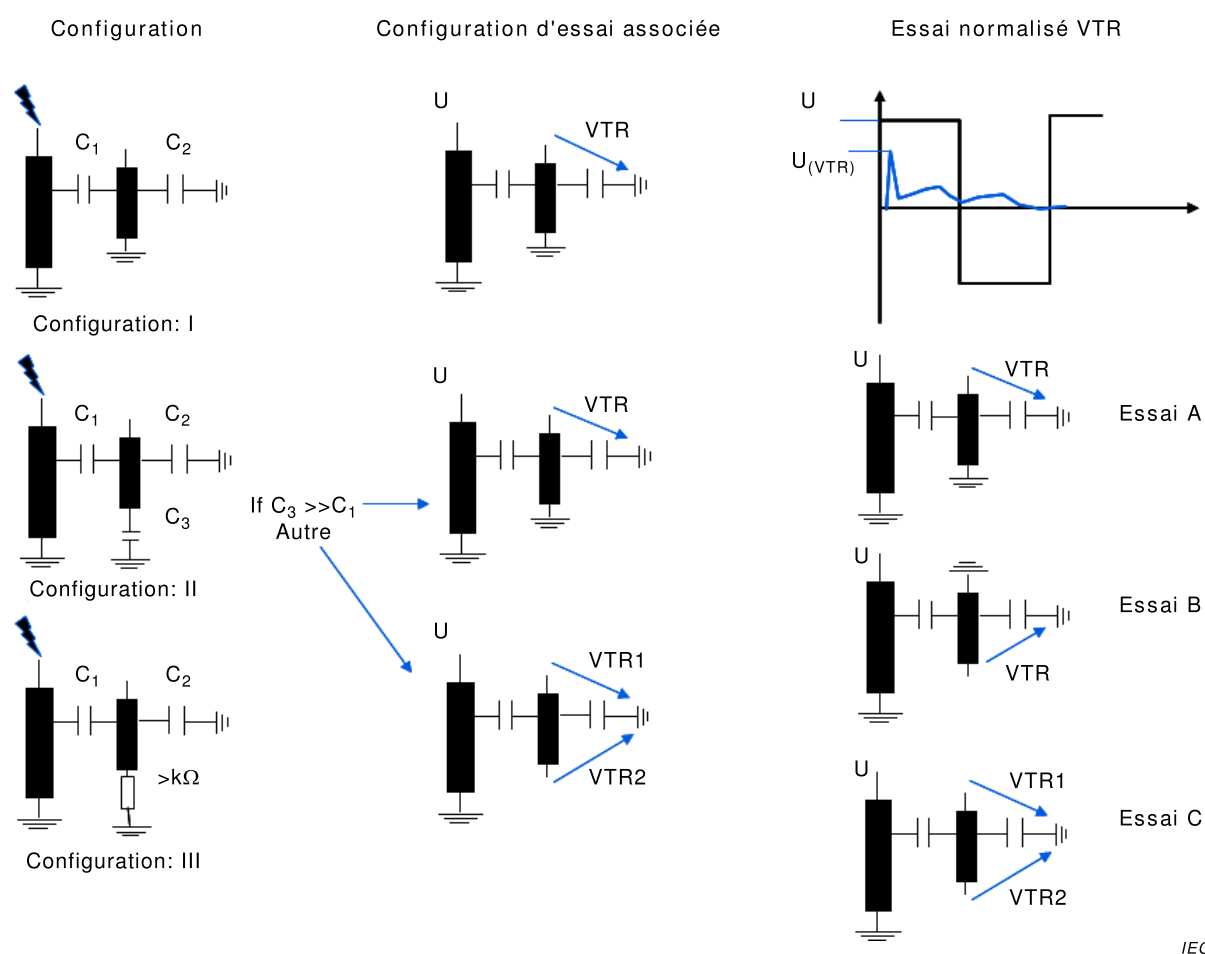


Figure 5 – Configurations pour l'essai VTR

13.2.18 Mesure du bruit (essai de type)

Le niveau de bruit doit être mesuré conformément à l'IEC 60076-10 et selon les conditions de refroidissement spécifiées.

Pour l'intensité acoustique, la méthode de l'ISO 9614-1 ou de l'ISO 9614-2 (lorsque la configuration du banc d'essai permet la présence de l'opérateur autour du matériel) s'applique. Pour la pression acoustique, la méthode de l'ISO 3746 s'applique. Le nombre de microphones peut être augmenté pour obtenir le niveau de précision spécifié par l'acheteur. Si la méthode parallélépipédique est adoptée, la mesure doit être effectuée sur cinq surfaces:

- étape 1 – l'essai de bruit doit être effectué à l'usine du fabricant, dans les conditions définies dans l'IEC 60076-10 avec alimentation sinusoïdale, sauf si le fabricant peut reproduire les formes d'onde spécifiées;
- étape 2 – Si l'étape 1 n'a pas été effectuée avec les formes d'onde spécifiées, un essai additionnel doit être réalisé sur un banc d'essai ou un matériel roulant avec le convertisseur associé.

13.2.19 Mesure de la densité de flux magnétique de fuite (essai de type facultatif)

La densité de flux magnétique de fuite doit être mesurée à des points spécifiés en appliquant un courant spécifié, puis vérifiée par rapport à des limites spécifiées.

Les points et limites de mesure doivent être convenus entre l'acheteur et le fabricant.

13.2.20 Analyse de la réponse en fréquence électrique (FRA) (essai d'investigation)

L'analyse de la réponse en fréquence électrique (FRA: Electrical Frequency Response Analysis) peut être utilisée à des fins de diagnostic et pour estimer les harmoniques de courant injectées à partir de secondaires liés à des convertisseurs électroniques dans le primaire.

La fonction FRA préférentielle est le rapport du courant primaire divisé par la tension secondaire qui est appliquée au transformateur. La tension doit être appliquée entre les bornes secondaires et également entre la borne secondaire en court-circuit et la terre. La mesure doit être réalisée dans une plage de fréquences jusqu'à au moins 500 kHz.

La méthode de mesure détaillée doit être convenue entre l'acheteur et le fabricant.

13.2.21 Mesure du courant d'appel (essai de type facultatif)

Le courant d'appel est le courant de magnétisation transitoire circulant après la connexion d'un transformateur au système en courant alternatif. Ce courant est fortement asymétrique et dépend du flux rémanent précédant immédiatement l'activation et au moment de la commutation du transformateur. Ce courant peut être limité par une exigence de réseau.

La mesure du courant d'appel nécessite de la précision lors de l'enregistrement et une source d'énergie suffisante avec un système de désactivation et d'activation contrôlé.

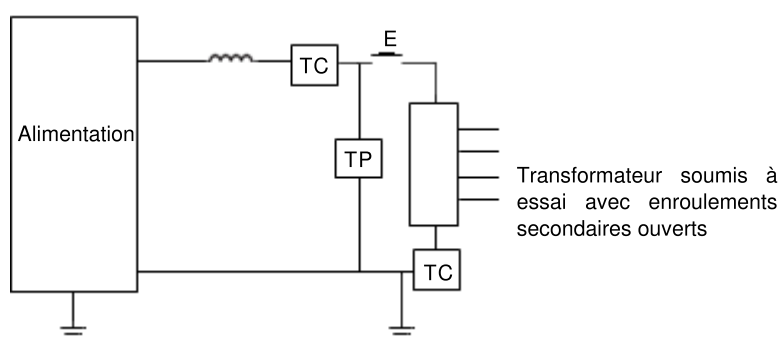
Les différentes étapes de la mesure sont:

- a) la création d'un flux rémanent dans le noyau de transformateur par désactivation appropriée à un point précis de l'onde de tension;
- b) l'activation du transformateur à un niveau de tension $U_{\max 1}$, précisément au point d'intersection avec la tension zéro;
- c) l'enregistrement du courant de crête primaire et de la tension d'alimentation;
- d) la mesure est effectuée plusieurs fois pour obtenir un courant maximal à intervalle défini et permettre la diminution des transitoires.

Les critères d'acceptation de courant d'appel primaire doivent être convenus entre l'acheteur et le fabricant.

Exemple de circuit d'essai (voir la Figure 6):

- e) il convient que la capacité de l'alimentation soit suffisante pour obtenir un courant d'appel correct;
- f) les enroulements secondaires sont ouverts.



IEC

Légende

TC Transformateur de courant

TP Transformateur de potentiel

E Commutateur synchronisé

Figure 6 – Exemple de circuit d'essai

13.3 Essais sur bobines d'inductance

13.3.1 Liste des essais

Les vérifications, mesures et essais à effectuer sur les bobines d'inductance sont indiqués au Tableau 10, qui précise également la catégorie de l'essai et les articles auxquels il convient de se référer.

Tableau 10 – Liste des vérifications et essais à réaliser sur les bobines d'inductance

Nature des essais	Article ou paragraphe		
	Type	Série	Analyse
Contrôles visuels	13.3.3	13.3.3	-
Masse	13.3.4	13.3.4 (facultatif)	-
Mesure de la résistance des enroulements	13.3.5	13.3.5	-
Détermination des pertes	13.3.6	-	-
Mesure de l'inductance	13.3.7	13.3.7	-
Essai d'échauffement	13.3.8	-	-
Essai de résistance d'isolement	13.3.9 (facultatif)	13.3.9 (facultatif)	-
Essais diélectriques sous pluie	13.3.10.1 type sec uniquement (facultatif)	13.3.10.1 type sec uniquement (facultatif)	13.3.10.1 type sec uniquement (facultatif)
Essai de tenue en tension de source séparée	13.3.10.2	13.3.10.2	-
Essais de tension de tenue aux chocs de foudre	13.3.10.3	-	-
Essai de tenue à la tension entre bornes	13.3.10.4	13.3.10.4	-
Essais de décharges partielles	13.3.11 type sec uniquement	13.3.11 type sec uniquement (facultatif)	-

Nature des essais	Article ou paragraphe		
	Type	Série	Analyse
Essai de tenue au court-circuit	13.3.12 (facultatif)	-	-
Essai de chocs et vibrations	13.3.13 (facultatif)	-	-
Essai de vibrations avec circulation de courant	-	-	13.3.14
Mesure du bruit	13.3.15	-	-
Mesure de la densité de flux magnétique de fuite	13.3.16 (facultatif)	-	-

13.3.2 Tolérances

Le Tableau 11 présente les tolérances applicables à certaines grandeurs assignées et à d'autres grandeurs lorsqu'elles sont sujettes à des garanties du fabricant se référant à la présente Norme.

Lorsqu'une tolérance dans un sens n'est pas indiquée, la valeur n'est soumise à aucune limitation dans ce sens.

Tableau 11 – Tolérances

Grandeur	Paragraphe	Tolérances
1. Résistance des enroulements	13.3.5	≤ 10 % ^{a)}
2. Pertes	13.3.6	+10 % des pertes totales +15 % de chacune des pertes partielles, à condition de ne pas dépasser la tolérance sur les pertes totales
3. Inductance	13.3.7	±10 % de l'inductance déclarée. Des bobines d'inductance identiques ne doivent pas s'écarter de plus de 3 % de la valeur moyenne, sauf accord particulier entre l'acheteur et le fabricant ^{b)}
4. Masse	13.3.4	Essai de type: ±10 % (masse totale < 100 kg) ±5 % (1 000 kg > masse totale ≥ 100 kg) ±3 % (masse totale ≥ 1 000 kg) Production en série: ±3 %
<p>a) Pour la production en série, une tolérance plus faible est prévue et doit être apportée par le fabricant en fonction des tolérances de taille de câble et d'enroulement.</p> <p>b) Une tolérance plus faible doit faire l'objet d'un accord entre l'acheteur et le fabricant (pour la bobine d'inductance de filtre accordée, par exemple).</p> <p>NOTE L'impact des tolérances doit être pris en compte dans la phase de conception et lors de l'évaluation des résultats d'essais de type.</p>		

Pour les autres valeurs, le cas échéant, les tolérances doivent être conformes à l'IEC 60076-6.

13.3.3 Contrôles visuels (essai de type et individuel de série)

Des contrôles visuels doivent être réalisés conformément à 13.2.3.

13.3.4 Masse (essai de type et individuel de série facultatif)

La bobine d'inductance doit être pesée avec tous les accessoires compris dans la fourniture.

13.3.5 Mesure de la résistance des enroulements (essai de type et essai individuel de série)

La résistance des enroulements doit être mesurée avec un courant continu à la température ambiante, en prenant toutes précautions d'usage pour réduire le plus possible les effets de self-induction. La température à laquelle la mesure est réalisée doit être notée. Les résultats doivent être corrigés à la température de référence (voir 13.2.5 et le Tableau 7).

13.3.6 Détermination des pertes (essai de type)

Les pertes des bobines d'inductance à courant alternatif et à courant ondulé doivent être mesurées avec un courant alternatif en puissance industrielle équivalent au courant de fonctionnement. Le courant équivalent doit être une valeur efficace déduite du contenu harmonique ou de la forme d'onde spécifiée par l'acheteur, et doit tenir compte de l'effet évalué sur les pertes de la différence entre la condition d'essais et la condition de service.

Les pertes des bobines d'inductance à courant continu doivent être mesurées en courant continu. Le calcul des pertes dans le noyau magnétique doit également être spécifié.

Pour les bobines d'inductance à noyau magnétique ou blindage, les pertes doivent être mesurées autant que possible et sauf accord contraire, avec une fréquence et/ou une forme d'onde aussi proches que possible des conditions de service.

13.3.7 Mesure de l'inductance (essai de type et essai individuel de série)

13.3.7.1 Généralités

En règle générale, les essais de type doivent être réalisés avec un courant adapté au type de bobine d'inductance, tandis que les essais individuels de série peuvent être réalisés avec un courant alternatif seul ou superposé à un courant continu. La valeur de l'inductance spécifiée ou mesurée dans les différentes conditions peut ne pas être la même, et le fabricant et l'acheteur doivent se mettre d'accord sur la valeur à utiliser pour les essais individuels de série fondés sur les résultats de l'essai de type.

Pour les bobines d'inductance couplées, la mesure de l'inductance mutuelle (voir l'IEC 60076-6) peut être exigée comme essai de type.

L'acheteur peut exiger des essais de type supplémentaires:

- la mesure de la variation d'inductance en fonction de la fréquence;
- la mesure de la variation d'inductance en fonction de la température (pour les noyaux de ferrite, par exemple).

13.3.7.2 Mesure de l'inductance en courant alternatif

13.3.7.2.1 Généralités

Ces essais s'appliquent fondamentalement à des bobines d'inductance transportant du courant alternatif avec de faibles contenus harmoniques. Cette méthode d'essai peut

également être utilisée pour l'essai individuel de série d'un autre type de bobines d'inductance.

L'inductance appropriée à mesurer est l'inductance en courant alternatif déduite de la réactance, la tension et le courant étant tous deux exprimés sous forme de valeurs efficaces et la tension étant sinusoïdale (voir l'IEC 60076-6 en référence).

La mesure doit être réalisée rapidement de sorte que l'échauffement ne provoque pas d'erreur significative. Dans la mesure du possible, la résistance en courant continu des enroulements doit être mesurée indirectement, à partir de la mesure de pertes pendant l'enregistrement ou mesurée juste avant (pour référence) et immédiatement après l'enregistrement.

13.3.7.2.2 Essai de type

La bobine d'inductance doit être alimentée en courant alternatif (monophasé ou triphasé, selon le cas) à la fréquence assignée; les courbes d'impédance ou d'inductance en fonction du courant doivent être représentées graphiquement dans tout le domaine d'utilisation de la bobine d'inductance. Si l'acheteur l'exige, la courbe de saturation doit faire l'objet d'un accord entre l'acheteur et le fabricant avant le démarrage de la production de série.

Pour les bobines d'inductance dans l'air, l'essai doit être réalisé uniquement au courant assigné et au courant maximal.

Pour certaines bobines d'inductance, la détermination du facteur Q (voir l'IEC 60076-6:2007, 9.4.11) peut être exigée.

13.3.7.2.3 Essai individuel de série

L'impédance en courant alternatif doit être mesurée à un courant assigné et à une fréquence à convenir entre l'acheteur et le fabricant.

13.3.7.3 Mesure de l'inductance en courant pulsatoire

13.3.7.3.1 Généralités

Ces essais s'appliquent fondamentalement à des bobines d'inductance saturables transportant un courant continu avec des contenus harmoniques faibles ou significatifs (courant ondulé).

L'inductance à mesurer est l'inductance en courant pulsatoire déduite d'un enregistrement de la tension aux bornes lorsqu'un courant ondulé spécifié traverse la bobine d'inductance (voir l'IEC 60076-6 en référence).

La mesure doit être réalisée rapidement de sorte que l'échauffement ne provoque pas d'erreur significative en référence à 13.3.2. Dans la mesure du possible, la résistance en courant continu des enroulements doit être mesurée indirectement, à partir de la mesure de pertes pendant l'enregistrement ou mesurée juste avant (pour référence) et immédiatement après l'enregistrement.

13.3.7.3.2 Essai de type

L'inductance en courant pulsatoire doit être mesurée à la fréquence harmonique spécifiée avec une valeur représentative du courant superposé à différents courants continus dans la plage de courants spécifiée.

NOTE Lorsque les courants alternatifs sont faibles (inférieurs à 10 %) par rapport au courant continu, la valeur exacte du courant d'essai alternatif n'est pas critique pour la mesure.

D'autre part, l'inductance en différentielle peut être utilisée à la place de l'inductance en courant pulsatoire, sous réserve d'un accord entre le fabricant et l'acheteur.

Les courbes d'inductance en courant pulsatoire doivent être tracées en fonction du courant dans l'ensemble de la plage d'utilisation de l'inductance.

Si l'essai individuel de série doit être réalisé avec l'impédance en courant alternatif sur la bobine d'inductance qui a passé avec succès l'essai de type ci-dessus, l'impédance et l'inductance avec courant alternatif à une fréquence industrielle convenue doivent être enregistrées pour plusieurs valeurs du courant, de sorte que la tension ne puisse pas atteindre des valeurs dangereuses. L'acheteur et le fabricant doivent alors se mettre d'accord sur le choix d'un point de la courbe d'impédance ainsi obtenue. Ce point doit être adopté comme base pour les essais individuels de série ultérieurs.

Pour les bobines d'inductance dans l'air, l'essai doit être effectué uniquement au courant assigné et au courant maximal.

13.3.7.3.3 Essai individuel de série

Après accord entre l'acheteur et le fabricant, l'essai individuel de série peut être effectué en mesurant l'inductance en courant pulsatoire à un point unique (courant continu et courant ondulé) ou en mesurant l'impédance en courant alternatif au point unique défini ci-dessus.

13.3.7.4 Mesure de l'inductance différentielle

13.3.7.4.1 Généralités

Ces essais s'appliquent fondamentalement à des bobines d'inductance saturables transportant un courant alternatif ou continu avec un courant ondulé (contenus harmoniques élevés).

Cette méthode peut être utilisée pour les bobines d'inductance dans l'air.

L'inductance appropriée à mesurer est l'inductance différentielle déduite d'un enregistrement numérique de la tension et du courant instantanés dans la bobine d'inductance:

$$L_d(i) = \frac{d\psi(i)}{di} = \frac{u(t) - R \times i(t)}{di/dt}$$

NOTE Cette définition présente le plus large domaine d'application et décrit le mieux la caractéristique magnétique d'une bobine d'inductance saturable. Les autres définitions de l'inductance peuvent être déduites de cette caractéristique.

Pour obtenir des résultats précis:

- La tension doit être ajustée afin de générer un courant de crête suffisamment supérieur à la plage de courants spécifiée pour L_d et pour provoquer une saturation.
- Les mesures doivent être réalisées rapidement ou avec une faible énergie, de sorte que les échauffements ne provoquent pas d'erreurs significatives en référence à 13.3.2. Dans la mesure du possible, la résistance en courant continu des enroulements doit être mesurée indirectement, à partir de la mesure de pertes pendant l'enregistrement ou mesurée juste avant (pour référence) et immédiatement après l'enregistrement.
- L'enregistrement numérique brut doit être filtré de manière appropriée pour générer la caractéristique $L_d(i)$.

13.3.7.4.2 Essai de type

La tension et le courant instantanés (dans chaque phase pour des bobines d'inductance triphasées) doivent être enregistrés dans un enregistreur numérique. Pour chaque valeur de

courant dans la plage spécifiée, l'inductance différentielle doit être calculée selon la formule ci-dessus.

La méthode d'essai doit en outre être convenue entre l'acheteur et le fabricant. Les méthodes suggérées sont les suivantes:

Méthode 1: tension alternative.

Une tension alternative monophasée (ou triphasée) est appliquée aux bornes d'une bobine d'inductance à une fréquence de telle sorte que le courant de crête soit supérieur à la plage spécifiée pour L_d , et de manière à provoquer une saturation, mais telle que la tension ne dépasse pas la tension de service maximale.

Pour les méthodes 2 à 5, dans le cas de bobines d'inductance triphasées, le courant doit être injecté successivement dans chaque phase. En fonction du schéma des connexions, le courant doit être augmenté selon le facteur approprié afin de tenir compte de la contribution des autres phases en fonctionnement normal triphasé.

Méthode 2: injection de courant alternatif monophasé avec polarisation de courant continu.

Fondamentalement, cette méthode est la même que la mesure d'inductance en courant pulsatoire dans des bobines d'inductance en courant continu, mais sur la base de valeurs instantanées au lieu de valeurs efficaces.

L'inductance différentielle doit être mesurée à la fréquence harmonique spécifiée avec une valeur représentative du courant superposée à différents courants continus dans la plage de courants spécifiée.

Méthode 3: décharge de condensateur oscillant monophasé.

Un condensateur est déchargé dans la bobine d'inductance.

Les avantages de cette méthode sont les suivants:

- aucune source de courant et de puissance élevés n'est exigée;
- l'échauffement de l'enroulement est négligeable. Il suffit de mesurer la résistance en courant continu de l'enroulement avant (pour référence) et juste après l'enregistrement.

Méthode 4: impulsion de tension continue monophasée.

Une impulsion de tension continue est appliquée aux bornes de la bobine d'inductance. L'amplitude de tension et/ou la durée d'impulsion doivent être ajustées de manière à atteindre au moins le courant maximal spécifié.

Les avantages de cette méthode sont similaires à ceux de la méthode 3.

Méthode 5: charge-décharge de courant continu.

Voir l'IEC 60076-6:2007, Annexe B: l'essai est réalisé avec un courant continu au moyen d'une fermeture soudaine du circuit ou par un court-circuitage soudain de la bobine d'inductance.

Si l'essai individuel de série doit être réalisé avec l'impédance en courant alternatif, sur la bobine d'inductance qui a passé avec succès l'essai de type ci-dessus, l'impédance et l'inductance avec courant alternatif à une fréquence industrielle convenue doivent être enregistrées pour plusieurs valeurs du courant, de sorte que la tension ne puisse pas atteindre des valeurs dangereuses. L'acheteur et le fabricant doivent alors se mettre d'accord sur le choix d'un point de la courbe d'impédance ainsi obtenue. Ce point doit être adopté comme base pour les essais individuels de série ultérieurs.

13.3.7.4.3 Essai individuel de série

Après accord entre l'acheteur et le fabricant, l'essai individuel de série peut être effectué en mesurant l'inductance différentielle à un point unique ou en mesurant l'impédance en courant alternatif au point unique défini ci-dessus.

13.3.8 Essais d'échauffement (essais de type)

L'essai d'échauffement doit être réalisé conformément à 13.2.11.

13.3.9 Essai de résistance d'isolement (essai de type et essai individuel de série facultatifs)

Avant l'essai diélectrique, l'essai de résistance d'isolement doit être réalisé à l'aide d'un mégohmmètre 1 000 V entre enroulements et entre un enroulement et la terre. La température du fluide de refroidissement doit être enregistrée.

13.3.10 Essais diélectriques (essai de type et essai individuel de série)

13.3.10.1 Généralités

Les essais diélectriques sur de nouveaux types de bobines d'inductance doivent être réalisés chez le fabricant, les bobines d'inductance étant à la température ambiante et munies des accessoires qui pourraient avoir une influence sur ces essais.

Les essais diélectriques comprennent:

- un essai de tenue en tension de source séparée (voir 13.3.10.2);
- de plus, pour des bobines d'inductance de type sec, des essais diélectriques sous pluie peuvent être exigés par l'acheteur conformément à l'Annexe D (informative);
- un essai de tension de tenue aux chocs de foudre (voir 13.3.10.3);
- un essai de tenue à la tension entre bornes (voir 13.3.10.4);
- essai de décharge partielle (voir 13.3.11).

Toutes les pièces non soumises à essai telles que le noyau, le bâti, la cuve ou le boîtier de la bobine d'inductance, les capteurs de température, doivent être connectées à la terre.

13.3.10.2 Essai de tenue en tension de source séparée (essai de type et essai individuel de série)

L'essai de tenue en tension de source séparée doit être réalisé comme spécifié en 13.2.13.3.

13.3.10.3 Essai de tension de tenue aux chocs de foudre (essai de type)

L'essai de tension de tenue aux chocs de foudre doit être réalisé comme spécifié en 13.2.13.4.

13.3.10.4 Essai de tenue à la tension entre bornes (essai type et essai individuel de série)

Cet essai a pour principal objet de contrôler l'isolation entre les spires, les bobines et les prises, en particulier pour des enroulements soumis de façon répétée à des formes d'onde de tension à front raide.

Cet essai doit être réalisé sur des transformateurs/bobines d'inductance qui peuvent être exposés aux contraintes diélectriques entre bornes en service normal ou dans des conditions de défaillance.

Pendant cet essai, la cuve et les enroulements autres que celui soumis à essai doivent être connectés comme en service normal.

Plusieurs méthodes sont proposées ici afin de tenir compte des conditions de contrainte en service pour des transformateurs/bobines d'inductance. Le choix de la méthode d'essai et des conditions d'essais doit être convenu entre l'acheteur et le fabricant (voir le Tableau 12).

Tableau 12 – Méthode d'essai de tenue à la tension entre bornes

Méthodes d'essai / Conditions de service	Tensions pulsées (enroulements alimentés avec tension PWM, bobine d'inductance de hacheur, bobine d'inductance transitoire, bobine d'inductance de filtre 3ph, etc.)	Courant alternatif sinusoïdal (bobine d'inductance de filtre accordée, etc.)	Courant continu pur (bobine d'inductance de filtre accordée, etc.)
Essai aux ondes de choc: à sélectionner conformément au Tableau 8 en fonction de U_{Nm}	Réalisé 3 fois à U_{Ni}		
Oscillation de décharge du condensateur ^{a)}	Réalisé 3 fois à U_a		
Tension sinusoïdale avec ou sans augmentation de fréquence ^{b)}	$T = 120 \times f_{\text{assigné}} / f_{\text{essai}}$ à U_a (15 s minimum, 60 s maximum)		
Générateur d'impulsion de tension répétée avec front raide $\geq 5 \text{ kV}/\mu\text{s}^c$	$U = 2 \times U_{mG}$ $N \geq 3\,000$ impulsions	Sans objet	
^{a)} Voir l'IEC 60076-6:2007, Annexe E (selon l'amortissement, le nombre de cycles doit être convenu entre l'acheteur et le fabricant). ^{b)} Pour une faible valeur d'inductance, il se peut que la fréquence d'essai doive être augmentée afin de maintenir le courant suffisamment faible pour la source et la bobine d'inductance. T = durée de l'essai. f = fréquence. ^{c)} Il convient que dv/dt ne soit pas inférieur aux conditions de service spécifiées.			

13.3.11 Essai de décharge partielle (essai de type ou essai individuel de série facultatif pour le type sec)

L'essai de décharge partielle doit être réalisé comme spécifié en 13.2.14.

13.3.12 Essai de tenue au court-circuit (essai de type facultatif)

L'essai de court-circuit doit être réalisé comme spécifié en 13.2.15. Pour l'essai de court-circuit de bobines d'inductance de filtrage en courant continu, le passage par zéro de la tension d'alimentation n'est pas significatif. Le courant de court-circuit maximal et la durée doivent être spécifiés par l'acheteur.

Par accord entre l'acheteur et le fabricant, l'essai de court-circuit peut être effectué par décharge de condensateur.

13.3.13 Essai de chocs et de vibrations (essai de type facultatif)

L'essai de chocs et de vibrations doit être réalisé comme spécifié en 13.2.16.

13.3.14 Essai de vibrations avec circulation de courant (essai d'investigation)

Les caractéristiques de vibration pendant la circulation de courant doivent être mesurées pour déterminer les amplitudes d'accélération et le déplacement par application de courant à la bobine d'inductance seule. Les conditions d'essais doivent être convenues entre l'acheteur et le fabricant.

13.3.15 Mesure du bruit (essai de type)

L'essai de mesure du bruit doit être réalisé comme spécifié en 13.2.18.

13.3.16 Mesure de la densité de flux magnétique de fuite (essai de type facultatif)

La densité de flux magnétique de fuite doit être mesurée comme spécifié en 13.2.19.

Annexe A (informative)

Liste des points pour lesquels un accord entre l'acheteur et le fabricant est nécessaire ou pour lesquels des informations ou spécifications complémentaires doivent être fournies par l'acheteur ou par le fabricant

A.1 Points sujets à accord entre l'acheteur et le fabricant

A.1.1 Transformateurs et bobines d'inductance

- 1 Extension du domaine d'application de la norme.
- 5 Conditions spéciales de service.
- 10.2 Autres limites de température de l'isolation solide.
- 10.4 Température maximale de surface de la cuve.
- 11 Comportement mécanique prouvé par calcul FEA (méthode, étalonnage de modèle et limites de fatigue).
- 11 Coefficient de sécurité pour la conception mécanique.
- 12 Éléments sur les plaques signalétiques.
- 13.1.3 Remplacement des essais individuels de série par des essais de série sur prélèvement.
- 13.2.1 Essais en tant que matériel séparé pour des bobines d'inductance différentielles associées à un transformateur.
 - 13.2.11.1 Essai d'échauffement: détails des conditions d'essais.
 - 13.2.11.1 Essai d'échauffement dans les conditions de surcharge ou dans d'autres conditions.
 - 13.2.11.1 Essais à température spécifique.
 - 13.2.11.3 Transformateurs/bobines d'inductance immergé(e)s dans un liquide: températures du point chaud de l'enroulement déterminées par mesure directe.
 - 13.2.11.3 Essai avec des pertes plus faibles pour l'essai d'échauffement de liquide.
 - 13.2.11.3 Essai dans des conditions de surcharge spécifiées pour des essais d'échauffement de l'enroulement.
 - 13.2.11.4 Transformateurs/bobines d'inductance de type sec: position des capteurs de température.
 - 13.2.11.4 Autres étapes de l'essai d'échauffement.
 - 13.2.11.4 Essai d'injection de courant avec pertes inférieures.
 - 13.2.11.6 Critères d'essais d'échauffement à puissance/courant assigné(e).
- 13.2.13 Configuration des connexions pour l'essai diélectrique dans chaque cas particulier.
 - 13.2.13.4.1 Essai de tension de tenue aux chocs de foudre: valeur de crête de la tension appliquée autre que celles spécifiées au Tableau 8.

- 13.2.13.4.1 Tolérances plus larges de la forme du choc obtenue.
- 13.2.14 Essai de décharge partielle: niveau admissible Q_{MAX} .
- 13.2.14 Essai de décharge partielle dans des conditions froides: tensions d'essais supérieure et inférieure (U_1, U_2).
- 13.2.15.3 Partie active non enlevée de la cuve.
- 13.2.16.1 Vérification du comportement du transformateur avec fixation résiliente intégrée sur le véhicule.
- 13.2.16.2.3 Autres essais de qualification après essais de chocs et de vibrations facultatifs.
- 13.2.19 Points et limites de mesure de la densité de flux magnétique de fuite.
- B.4.4 Position des capteurs de température à l'intérieur des enroulements pour un transformateur/une bobine d'inductance de type sec.
- D.2 Essai diélectrique sous pluie facultatif 1 pour des transformateurs et des bobines d'inductance de type sec: essai de trempage basé sur un échantillonnage.
- D.3 Essai sous pluie facultatif 2: durée d'application de la tension de source séparée humide.
- D.4.2 Essai sous pluie facultatif 3: conditions d'injection de courant.
- D.5 Essais diélectriques sous pluie facultatifs: acceptation d'un arc bref, non répétitif au même point.
- D.5 Valeur du critère de résistance d'isolement ($R_{IS-DRY-24H}$).
- D.5 Variation maximale du courant de fuite.
- D.5 Valeur minimale de la résistance d'isolement ($R_{IS-WET-0}$ et $R_{IS-WET-1}$).
- D.5 Acceptation d'un écart quelconque par rapport aux critères cibles.
- A.1.2 Transformateurs
 - 7.1 Tension assignée côté réseau autre que la tension nominale du système de traction.
 - 13.2.1 Tableau 5: liste des essais à réaliser.
 - 13.2.2 Tableau 6: tolérance plus faible sur la tension de court-circuit pour la prise principale.
 - 13.2.3 Essais de type fonctionnel et essais individuels de série facultatifs.
 - 13.2.7.2 Autres valeurs de tensions côté réseau pour la mesure du courant et des pertes à vide.
 - 13.2.8.1 Toutes les combinaisons dans des paires d'enroulements pour la mesure de tension de court-circuit.
 - 13.2.8.1 Mesures supplémentaires sur l'autre prise ou dans d'autres combinaisons d'enroulements pour la mesure de tension de court-circuit.
 - 13.2.10 Autre méthode de calcul des pertes dues aux fréquences harmoniques.
 - 13.2.10 Pertes associées à la charge calorifique du train.

- 13.2.11.3 Transformateurs de type immergé: essai d'échauffement appliquant une tension et un courant assignés par connexion à une charge adaptée.
 - 13.2.11.3 Méthode d'opposition pour l'essai d'échauffement.
 - 13.2.11.4 Transformateurs de type sec: essai d'échauffement appliquant une tension et un courant assignés par connexion à une charge adaptée.
 - 13.2.11.4 Méthode d'opposition.
 - 13.2.12 Valeur minimale de la résistance d'isolement.
 - 13.2.13 Tableau 8: tensions d'essais diélectriques pour des valeurs de U_{Nm} plus élevées.
 - 13.2.13.1 Essai diélectrique sous pluie facultatif.
 - 13.2.13.2 Essai de tenue en tension induite: tensions d'essais autres que celles indiquées au Tableau 8.
 - 13.2.13.3 Essai de tenue en tension de source séparée: tensions d'essais autres que celles indiquées au Tableau 8 pour des enroulements à isolation non uniforme.
 - 13.2.13.4.1 Essai de tension de tenue aux chocs de foudre de l'enroulement basse tension: soumis à essai avec des surtensions transférées depuis l'enroulement haute tension.
 - 13.2.14 Essais d'investigation de décharge partielle facultatifs pour transformateurs de type immergé.
 - 13.2.15.1 Essai de tenue au court-circuit facultatif.
 - 13.2.15.3 Résultats de mesures FRA avant et après les essais de court-circuit.
 - 13.2.15.3 Variation réduite de réactance de court-circuit au-dessous de 7,5 % pour des bobines concentriques non circulaires.
 - 13.2.16.2.3 Résultats des mesures FRA avant et après les essais de chocs et de vibrations.
 - 13.2.20 Analyse de la réponse en fréquence électrique (FRA): méthode de mesure détaillée.
 - 13.2.21 Courant d'appel primaire: critères d'acceptation (facultatif).
- A.1.3 Bobines d'inductance
- 13.3.1 Tableau 10: liste des essais à réaliser.
 - 13.3.2 Tableau 11: autres tolérances sur l'inductance.
 - 13.3.6 Pertes n'étant pas mesurées avec une fréquence et/ou une forme d'onde aussi proches que possible des conditions de service.
 - 13.3.7.1 Valeur d'inductance à utiliser pour les essais individuels de série.
 - 13.3.7.2.2 Mesure d'inductance en courant alternatif: courbe de saturation.
 - 13.3.7.2.3 Fréquence pour la mesure de l'impédance en courant alternatif.
 - 13.3.7.3.2 Mesure de l'inductance en courant pulsatoire: inductance différentielle utilisée à la place de l'inductance en courant pulsatoire.

- 13.3.7.3.2 Fréquence industrielle pour la mesure de l'impédance et de l'inductance avec courant alternatif dans un essai de type.
- 13.3.7.3.2 Choix d'un certain point sur la courbe d'impédance pour les essais de type.
- 13.3.7.3.3 Essai individuel de série par mesure de l'inductance en courant pulsatoire en un point unique ou par mesure de l'impédance en courant alternatif au point unique défini.
- 13.3.7.4.2 Mesure de l'inductance différentielle: méthode d'essai de type.
- 13.3.7.4.2 Fréquence industrielle pour la mesure de l'impédance et de l'inductance avec courant alternatif dans un essai de type.
- 13.3.7.4.2 Choix d'un certain point sur la courbe d'impédance pour les essais de type.
- 13.3.7.4.3 Essai individuel de série par mesure de l'inductance différentielle en un point unique ou par mesure de l'impédance en courant alternatif au point unique défini.
- 13.3.10.1 Essai diélectrique sous pluie facultatif.
- 13.3.10.4 Essai de tenue à la tension entre bornes: choix de la méthode d'essai et des conditions d'essais.
- 13.3.12 Essai de court-circuit par décharge de condensateur.
- 13.3.14 Conditions d'essais de vibrations avec circulation de courant.

A.2 Informations à donner par l'acheteur au fabricant

A.2.1 Transformateurs et bobines d'inductance

- 6.1 Profil de charge.
- 6.1 Spectre des fréquences de courant.
- 6.2 Température de référence pour la charge continue ou histogramme de température.
- 8 Prises intermédiaires.
- 9.2.3 Débit d'air pour refroidissement par air forcé externe ou déplacement de véhicule.
- 13.1.2 Essais de type facultatifs.
- 13.1.4 Essais d'investigation.
- 13.1.4 Acceptation du matériel après les essais d'investigation.
- 13.2.11.1 Température du fluide de refroidissement à l'interface externe du transformateur/de la bobine d'inductance.
- 13.2.12 Répétition de l'essai de résistance d'isolement à l'issue de l'essai.
- 13.2.13 Pour tous les enroulements connectés à un convertisseur de puissance générant des ondes de tension raides: amplitudes de tension de crête répétitive (U_{mT} et U_{mG}), tension continue de boucle, taux d'élévation de tension et fréquence de répétition.
- 13.2.15.1 Exigence facultative de mesure de la résistance pour les positions correspondant aux prises auxquelles l'essai de court-circuit est réalisé.

- 13.2.15.3 Exigence facultative d'essai de tenue aux chocs de foudre après l'essai de court-circuit.
- 13.2.15.3 Exigence facultative d'essai diélectrique sous pluie après l'essai de court-circuit.
- 13.2.16.2.1 Essai de chocs et vibrations de type facultatif: spécification de catégorie 1 de classe A ou B pour l'essai de durée de vie simulé à des niveaux de vibrations aléatoires augmentés.
- 13.2.16.2.3 Exigence facultative d'essais diélectriques sous pluie pour le transformateur/la bobine d'inductance de type sec après les essais de chocs et de vibrations.
- 13.2.18 Niveau de précision pour la mesure de bruit.
- B.4.1 Courant au cours du temps, c'est-à-dire profils de charge, et spectre des fréquences de courant.
- B.4.2 Histogramme de température du fluide de refroidissement à l'interface externe du transformateur/de la bobine d'inductance. Ou température de référence du fluide de refroidissement pour les calculs de durée de vie.
- C.3.2 Conditions de fonctionnement pour les calculs d'endurance thermique.
- Annexe E Profil de charge: durée et fréquence de fonctionnement en surcharge.
- A.2.2 Transformateurs
 - 13.2.1 Tableau 5 – Liste des exigences pour les essais facultatifs ou les essais d'investigation.
 - 13.2.7.2 Exigence facultative d'enregistrement des formes d'onde de tension et de courant à vide et d'analyse de leurs contenus harmoniques.
 - 13.2.8.2 Exigence facultative de mesure de l'inductance différentielle pour les caractéristiques d'inductance de court-circuit non linéaires.
 - 13.2.8.2 Exigence facultative de mesure de la variation de l'impédance (résistance et inductance) en fonction de la fréquence.
 - 13.2.10 Autres conditions de calcul des pertes totales pour des transformateurs autres que des transformateurs de traction.
 - 13.2.13.2 Temps d'essai à pleine tension d'essai autre que 60 s.
 - 13.2.13.2 Tension induite autre que $2 \times U_N$ (tension assignée) pour des transformateurs auxiliaires.
 - 13.2.14 Décharge partielle.
Exigence facultative pour des transformateurs de type sec en tant qu'essai individuel de série.
Exigence facultative pour le type immergé en tant qu'essai d'investigation.
 - 13.2.15.1 Exigence facultative pour l'essai de tenue au court-circuit en tant qu'essai de type.
 - 13.2.15.1 Puissance apparente de court-circuit du système.
 - 13.2.15.1 Valeur maximale de la puissance de court-circuit disponible à l'entrée du véhicule.
 - 13.2.17 Schéma des connexions pour le choix de la configuration pour les essais VTR.

13.2.17 Valeur maximale de VTR.

A.2.3 Bobines d'inductance

13.2.15.1 Courant de court-circuit pour bobines d'inductance.

13.3.1 Tableau 10 – Liste des exigences pour les essais facultatifs ou les essais d'investigation.

13.3.6 Forme d'onde du courant pour la détermination des pertes.

13.3.7.1 Exigence facultative de mesure de l'inductance mutuelle en tant qu'essai de type pour des bobines d'inductance couplées.

13.3.7.1 Exigence facultative d'essais de type supplémentaires: mesure de la variation d'inductance en fonction de la fréquence et de la température.

13.3.7.2.2 Exigence facultative pour déterminer le facteur Q .

13.3.11 Décharge partielle.
Exigence facultative pour des bobines d'inductance de type sec en tant qu'essai individuel de série.

13.3.11 Exigence facultative pour l'essai de tenue au court-circuit en tant qu'essai de type.

13.3.12 Courant de court-circuit maximal et durée.

13.3.14 Exigence facultative pour l'essai de vibrations avec circulation de courant en tant qu'essai d'investigation.

A.3 Informations à donner par le fabricant à l'acheteur

A.3.1 Transformateurs et bobines d'inductance

6.1 Spectre des fréquences de courant.

6.2 Température de référence calculée pour charge continue.

9.1 Type de fluide de refroidissement.

9.2.1 Caractéristiques assignées et symboles de refroidissement pour chaque méthode de refroidissement.

10.1 Classe thermique de l'isolation solide.

11 Calculs FEA pour le comportement mécanique: le chemin de refroidissement liquide a été simulé.

13.1.2 Certificats des essais de type déjà réalisés sur un matériel identique construit précédemment.

13.2.11.2 Méthode de calcul de température et résultats d'essais sur un transformateur/une bobine d'inductance similaire à celui/celle utilisé(e) en tant que référence.

13.2.11.3 Résultats d'une étude concernant l'emplacement des points chauds, et la relation entre la température de point chaud et la température moyenne de l'enroulement.

13.2.11.3 Essai d'échauffement du transformateur/de la bobine d'inductance de type immergé: consolidation des essais et rapport d'évaluation de conformité.

- 13.2.11.4 Essai d'échauffement des transformateurs/bobines d'inductance de type sec: consolidation des essais et rapport d'évaluation de conformité.
- B.4.2 Température de référence calculée du fluide de refroidissement pour le calcul de durée de vie.
- B.5 Conformité du système d'isolation pour l'application spécifiée.
- B.6 Critère de fin de vie: explication de l'acceptation si CEP > 100 %.
- Annexe C Calcul de l'endurance thermique.
- C.3.3 Caractéristiques d'endurance thermique.
- D.5 Essais diélectriques sous pluie: résultats d'investigation en cas d'écart par rapport aux critères cibles.
- A.3.2 Transformateurs
 - 13.2.2 Tableau 6: Tolérance plus faible sur la résistance des enroulements pour la production en série.
 - 13.2.16.1 Démonstration de l'absence de changement de l'état fonctionnel survenant pendant les essais de chocs.
- A.3.3 Bobines d'inductance
 - 13.3.2 Tableau 11: Tolérance plus faible sur la résistance des enroulements pour la production en série.

Annexe B (informative)

Vieillessement thermique et durée de vie de l'isolation

B.1 Durée de vie de l'isolation et vieillissement thermique

La durée de vie de l'isolation est définie comme étant la durée totale entre l'état initial pour lequel l'isolation de composant normale est considérée comme neuve et l'état final dans lequel, en raison de nombreux facteurs qui sont rencontrés ou surviennent en service normal, il existe un risque élevé de défaut électrique.

Les facteurs de vieillissement sont décrits dans l'IEC 60505 (Évaluation et qualification des systèmes d'isolation électrique): vieillissement thermique, contraintes diélectriques et mécaniques (vibrations, cyclage thermique, etc.), atmosphères délétères et produits chimiques, humidité, impuretés, rayonnement, etc.

Étant donné que la température est très souvent le facteur de vieillissement dominant, des normes ont défini des classes thermiques (IEC 60085) et des méthodes pour caractériser les propriétés d'endurance thermique (IEC 60216-1).

Les matériaux (MIE) ou systèmes (SIE) isolants électriques sont caractérisés par des propriétés d'endurance thermique (résistance mécanique et diélectrique, résistance au cyclage thermique, performance d'étanchéité, etc.) qui sont décrites par deux facteurs: l'indice thermique (TI) et l'intervalle de division par deux (HIC).

L'endurance thermique d'un MIE est toujours donnée pour une propriété et un point limite spécifiques. Si celle-ci est ignorée, toute référence aux propriétés d'endurance thermique n'a plus de signification étant donné que les propriétés d'un matériau soumis à vieillissement thermique peuvent ne pas se dégrader toutes à la même vitesse. Par conséquent, plusieurs indices de température ou intervalles de division par deux dérivés peuvent être attribués à un matériau, par exemple, à partir de la mesure de différentes propriétés.

La description d'un transformateur/d'une bobine d'inductance comme étant d'une classe thermique particulière ne signifie pas, et ne doit pas être considérée comme impliquant, que chaque MIE utilisé dans sa construction a la même endurance thermique.

- Toutes les pièces de transformateur/bobine d'inductance ne sont pas exposées à la même température et n'exigent pas nécessairement des matériaux de la même classe thermique.
- La classe thermique pour un SIE peut ne pas être directement liée à l'endurance thermique du MIE individuel compris dans celui-ci.
- Il convient également de ne pas prendre comme hypothèse que la classe thermique du système est nécessairement par défaut celle de la classe de température la plus basse des composants individuels du système. Au contraire, la capacité thermique favorise souvent le composant ayant la température la plus élevée. Cependant, il convient que la classe thermique de composant individuel guide le choix et le positionnement des différents matériaux dans la conception de l'isolation.

La vitesse de dégradation de matériau est la plus élevée dans les zones à température élevée. Ces zones atteignent le point limite en premier et déterminent la fiabilité de service du transformateur ou bobine d'inductance dans son ensemble. Les calculs d'endurance thermique sont basés sur les températures de point chaud.

B.2 Définitions d'endurance thermique

Dans le contexte de ce document, les termes et définitions suivants de caractéristiques d'endurance thermique d'un matériau ou système isolant s'appliquent.

B.2.1

endurance thermique

temps nécessaire pour que la dégradation d'une propriété sélectionnée (électrique, mécanique, etc.) atteigne un point limite spécifié à une température donnée. Un point limite de 50 % de la valeur initiale de la propriété est utilisé (sauf spécification contraire)

Note 1 à l'article: Un matériau isolant assure principalement les performances électriques (rigidité diélectrique) de l'isolation de conducteur, alors que l'imprégnation, le moulage, l'obturation, le revêtement, etc., des matériaux assurent principalement les performances mécaniques des enroulements (étanchéité à l'eau, résistance au cyclage et aux chocs thermiques, résistance aux vibrations ou aux chocs, conduction thermique, etc.).

B.2.2

indice de température

TI

valeur numérique de la température (en degrés Celsius) déduite de la relation de l'endurance thermique à un temps de 20 000 h (sauf spécification contraire)

Note 1 à l'article: TI fait référence aux indices d'endurance thermique relatifs (RTE) ou d'endurance thermique évalués (ATE) utilisés dans l'IEC 60216-5.

B.2.3

intervalle de division par deux

HIC

valeur numérique de l'intervalle de température (en kelvins), qui exprime la division par deux du temps pour atteindre le point limite à la température égale à TI

B.3 Calculs d'endurance thermique

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

NOTE En ce qui concerne les calculs d'endurance thermique, l'IEC 60076-12 donne une explication des principes fondamentaux du vieillissement et des moyens pour estimer la vitesse de vieillissement et la consommation de durée de vie d'isolation du transformateur/de la bobine d'inductance en fonction de la température, du temps et de la charge de fonctionnement. La température de point chaud est utilisée pour estimer le nombre d'heures de durée de vie consommées pendant une période de charge particulière.

B.3.1

endurance thermique en fonctionnement continu

ECO

pour une température de point chaud donnée θ_{HS} (°C), l'endurance thermique en fonctionnement continu est déduite de la formule simplifiée du tracé d'Arrhenius (basé sur TI et HIC), comme suit:

$$ECO(h) = 20000 \times 2^{\frac{TI - \theta_{HS}}{HIC}}$$

cette formule simplifiée est très pratique pour comprendre le concept de TI et HIC. Cependant, cette formule produit des résultats légèrement pessimistes par rapport à la formule exacte.

Dans la mesure du possible, il convient d'utiliser la formule d'Arrhenius exacte déduite du graphique d'endurance (constantes A et B), où $E(h)$ est l'endurance thermique et $T_{HS}(K) = \theta_{HS} (°C) + 273,15$ est la température thermodynamique (absolue) du point chaud:

$$\log E(h) = \log A + \frac{B}{T_{HS}(K)}$$

qui représente le graphique d'endurance thermique, ou

$$E(h) = a \times \exp\left(\frac{b}{T_{HS}}\right)$$

qui exprime directement la valeur d'endurance thermique.

B.3.2

temps de fonctionnement réel

AOT

temps réel (en heures) pendant lequel le système d'isolation fonctionne à la température de point chaud donnée

B.3.3

potentiel d'endurance consommé

CEP

$$CEP(\%) = \frac{AOT}{ECO} \times 100$$

pour une température de point chaud donnée

B.4 Considérations particulières pour la conception et l'essai thermique

B.4.1 Généralités

Pour les considérations d'endurance thermique, il est important de garder à l'esprit les points suivants.

- La durée de vie est liée à la température par une fonction exponentielle inverse.
Exemple: si HIC est égal à 10 K, chaque augmentation de température de 10 °C réduit la durée de vie d'un facteur 2.
- La température d'enroulement est directement affectée par la température du fluide de refroidissement à l'interface externe.
- L'échauffement d'enroulement est approximativement proportionnel aux pertes dues à la charge. Les pertes dues à la charge sont constituées de pertes ohmiques et additionnelles. Les pertes ohmiques sont directement proportionnelles au carré du courant et à la résistance en courant continu. Les pertes supplémentaires sont liées au spectre des fréquences de courant et sont inversement proportionnelles à la résistance en courant continu. La résistance en courant continu de l'enroulement est proportionnelle à la température.

L'acheteur peut spécifier le courant au cours du temps, c'est-à-dire le profil de charge, y compris son spectre de fréquences, et l'histogramme de température à l'interface de refroidissement externe.

Mais les pertes et les échauffements dans le transformateur/la bobine d'inductance dépendent de la conception du fabricant.

Pour les essais d'échauffement, il est important de définir correctement la température de référence du fluide de refroidissement et le courant continu nominal de chaque enroulement afin de pouvoir vérifier la conformité à la durée de vie spécifiée.

B.4.2 Température du fluide de refroidissement à l'interface externe

Histogramme de température du fluide de refroidissement:

- il convient qu'un histogramme de température soit fourni par l'acheteur pour le fluide de refroidissement à l'interface externe du transformateur/de la bobine d'inductance. Sinon, l'acheteur doit fournir directement la température de référence du fluide de refroidissement pour les calculs de durée de vie.

Température de référence du fluide de refroidissement pour le calcul de durée de vie:

- la température de référence du fluide de refroidissement à l'interface externe du transformateur/de la bobine d'inductance, dans le contexte du calcul de durée de vie, est la température permanente pour laquelle les effets sur le vieillissement du matériau sont équivalents à ceux de l'histogramme de température spécifié pendant la durée de vie;
- soit cette température de référence doit être calculée par le fabricant, soit elle doit être fournie par l'acheteur.

NOTE Le vieillissement thermique est une fonction exponentielle de la température, c'est-à-dire que la température de référence pour le calcul de la durée de vie est une moyenne pondérée de façon exponentielle basée sur la température de l'enroulement. Elle est supérieure à la moyenne arithmétique de la température.

B.4.3 Courant assigné

Le courant assigné d'un enroulement est le courant que cet enroulement peut supporter en permanence, à la température de référence du fluide de refroidissement pour le calcul de durée de vie, pour lequel les effets sur le vieillissement de matériau sont équivalents à ceux des profils de charge spécifiés pendant la durée de vie.

NOTE Le courant assigné est une moyenne pondérée de façon exponentielle basée sur la température de l'enroulement.

B.4.4 Essai d'échauffement du transformateur/de la bobine d'inductance de type sec

Pour la mesure directe de la température, des capteurs de température doivent être installés à l'intérieur des enroulements à des positions, à convenir entre le fabricant et l'acheteur, auxquelles les points chauds sont supposés être situés.

B.5 Conformité thermique des systèmes d'isolation

Il convient que la conformité du système d'isolation pour l'application spécifiée soit démontrée par le fabricant par des calculs d'endurance thermique basés sur les caractéristiques d'endurance thermique du système d'isolation (tracé et constantes de formule d'Arrhenius ou, au moins, ATE ou RTE et HIC, conformément à l'IEC 60216-1 et l'IEC 60216-5) pour les performances associées (mécaniques, électriques).

Voir un exemple de calculs détaillés à l'Annexe C (informative).

B.6 Critère de fin de vie

La définition de points limites dans l'IEC 60216-1 est essentiellement conventionnelle et n'est pas fonctionnelle. La dégradation du matériau se produit progressivement. Le point limite ne représente pas une limite tranchée entre la "vie" et la "mort" du composant. Dans les essais d'endurance thermique, le point limite est atteint lorsque la moitié des échantillons soumis à l'essai n'a pas satisfait au critère sélectionné (50 % de la tension de claquage initiale, par exemple). Il revient au fabricant de tenir compte de cette réduction dans ses règles de conception pour obtenir la durée de vie spécifiée avec la fiabilité spécifiée.

Dans ces conditions, un transformateur ou une bobine d'inductance est jugé(e) acceptable du point de vue de l'endurance thermique si la somme du potentiel d'endurance consommé

(CEP) pour toutes les conditions de service et les propriétés électriques et mécaniques est inférieure ou approximativement égale à 100 %. Dans le cas où les 100 % sont dépassés, le fabricant doit expliquer les raisons pour lesquelles ce résultat peut être acceptable.

Annexe C (informative)

Exemple de calcul d'endurance thermique pour démontrer la conformité d'un système d'isolation pour une application spécifiée

C.1 Préliminaire

Ce qui suit ne correspond qu'à des exemples visant à faciliter la compréhension de la méthode de calcul décrite à l'Annexe B (informative).

Ceux-ci sont basés sur des caractéristiques d'endurance thermique purement indicatives et il convient de ne pas les utiliser en tant que référence pour des applications réelles si elles ne sont pas étayées par des données d'essais d'endurance thermique réelles.

La formule d'Arrhenius simplifiée a été utilisée pour faciliter la compréhension.

C.2 Exemple 1 – Limites de température pour un transformateur/une bobine d'inductance de type sec

Dans les exemples du Tableau C.1, deux systèmes d'isolation de classes différentes sont considérés qui ont un TI à la limite inférieure de leur classe thermique et avec le HIC décrit.

Tableau C.1 – Limites de température et durée de vie prévue pour un transformateur ou une bobine d'inductance de type sec (exemples)

Classe thermique	Caractéristiques d'endurance thermique pour les exemples		Fonctionnement de courte durée à la température de point chaud maximale (NOTE 1)		Fonctionnement continu (210 000 h) (NOTE 2)
	TI	HIC	Température de point chaud maximale °C	Durée de vie prévue h	Température de point chaud maximale °C
105 (A)	105	6	130	1 100	85
180 (H)	180	11	205	4 100	143

NOTE 1 La colonne 5 présente la durée de vie prévue si le système d'isolation fonctionne en continu à la température de point chaud maximale conformément au Tableau 3. La durée de vie prévue est calculée pour 100 % CEP.

NOTE 2 La colonne 6 présente la température maximale pour le fonctionnement continu du système d'isolation pendant une durée de vie spécifiée de 210 000 h (c'est-à-dire 30 ans, 7 000 h par an).

C.3 Exemple 2 – Calcul d'endurance thermique

C.3.1 Généralités

Le fonctionnement d'un transformateur de traction ou d'une bobine d'inductance peut souvent être divisé en conditions de charge équivalente simples grâce à leur constante de temps thermique généralement élevée par rapport au cycle de fonctionnement du véhicule ferroviaire. Ce processus conduit à des histogrammes de cycle de charge et des histogrammes de température du fluide de refroidissement simplifiés.

Cet exemple prend en compte une bobine d'inductance de filtrage en courant, de type sec pour une application traction, dans l'air et refroidie par ventilation d'air forcé.

C.3.2 Conditions de fonctionnement à fournir par l'acheteur

Heures de fonctionnement totales au cours de la durée de vie: 180 000 h (30 ans à raison de 16 h par jour).

Histogramme de cycle de charge. Deux conditions électriques principales définissent l'échauffement de la bobine d'inductance par le courant circulant dans celle-ci: les conditions normales et les conditions de surcharge avec la distribution spécifiée du temps de fonctionnement au cours de la durée de vie indiquée au Tableau C.2.

Tableau C.2 – Histogramme de cycle de charge

Cycle de charge	Courant A_{eff}	Fonctionnement au cours de la durée de vie	
		Distribution %	AOT h
Normal	425	90	162 000
Surcharge	495	10	18 000
Total		100	180 000

Histogramme de température de fluide de refroidissement à l'interface externe. L'histogramme de température de l'air de refroidissement au côté entrée de la bobine d'inductance est décrit au Tableau C.3.

Tableau C.3 – Histogramme de température

$\theta_{\text{COOL AIR}}$ °C	Fonctionnement au cours de la durée de vie	
	Distribution %	AOT h
20	50	90 000
30	35	63 000
40	15	27 000
Total	100	180 000

C.3.3 Caractéristiques d'endurance thermique à fournir par le fabricant

- Informations relatives au système d'isolation de référence et au système d'isolation réellement utilisé conformément à l'IEC 60216-5: type générique des matériaux, certificats d'essais.
- Classe thermique, graphique d'endurance (constantes de la formule d'Arrhenius, ATE ou RTE, HIC).
Dans l'exemple, l'indice ATE ou RTE est pris pour TI dans les calculs avec les valeurs suivantes: $T_I = 180$ °C et $HIC = 11$ K.

C.3.4 Résultats des essais d'échauffement

Le Tableau C.4 présente les températures et échauffements moyens et du point chaud, mesurés pendant l'essai d'échauffement réalisé au courant et à la température d'air de refroidissement indiqués ($\theta_{\text{COOL AIR}}$).

Tableau C.4 – Résultats d'essais d'échauffement

Cycle de charge	Courant A_{eff}	Échauffement		Température	
				à $\theta_{COOL AIR} = 20\text{ °C}$	
		Moyen K	Point chaud K	Moyenne °C	Point chaud °C
Normal	425	52	97	72	117
Surcharge	495	78	140	98	160

NOTE 1 Dans cet exemple, à cause de la conception de la bobine d'inductance, la température du point chaud est significativement supérieure à la température moyenne de l'enroulement.

NOTE 2 À cause de l'augmentation de la résistance en courant continu de l'enroulement avec la température, la variation d'échauffement entre les conditions normales et les conditions de surcharge est plus que proportionnelle au carré du courant.

C.3.5 Calculs

Le Tableau C.5 présente l'effet de la température d'air de refroidissement ($\theta_{COOL AIR}$) sur le vieillissement de la bobine d'inductance pour les deux cycles de charge.

Ce tableau est déduit du Tableau C.4 par calcul. Les températures d'enroulement sont extrapolées à d'autres températures d'air de refroidissement par application de la méthode itérative décrite en 13.2.11.5 pour correction de la température du fluide de refroidissement.

Tableau C.5 – Calcul de l'endurance thermique

Cycle de charge	$\theta_{\text{COOL AIR}}$ °C	Fonctionnement au cours de la durée de vie		Température		Endurance thermique	
		Distribution % (NOTE 1)	AOT h	Moyenne °C	Point chaud °C	ECO h	CEP %
Normal	20	45,0	81 000	72	117	1 089 000	7,4
	30	31,5	56 700	85	130	456 000	12,4
	40	13,5	24 300	97	144	191 000	12,7
Sous-total		90,0	162 000				32,5
Surcharge	20	5,0	9 000	98	160	69 000	13,0
	30	3,5	6 300	112	176	25 900	24,3
	40	1,5	2 700	125	191	9 700	27,7
Sous-total		10,0	18 000				65,0
Total		100	180 000				97,5

NOTE 1 Dans ce tableau, la distribution de fonctionnement est le résultat de la multiplication de la distribution de l'histogramme de cycle de charge (Tableau C.2) par la distribution de l'histogramme de température (Tableau C.3).

NOTE 2 En raison de la conception de la bobine d'inductance choisie pour cet exemple, bien que le fonctionnement en surcharge soit limité à 10 % de la durée de vie spécifiée, celui-ci consomme 65 % du potentiel de durée de vie du système d'isolation.

Le potentiel d'endurance consommé (CEP, *Consumed Endurance Potential*) total est inférieur à 100 %: cette bobine d'inductance est acceptable du point de vue de l'endurance thermique.

Sur la base du Tableau C.5, un courant équivalent et une température équivalente consommant le même potentiel d'endurance thermique peuvent être calculés. Cela donne le courant assigné (I_{RATED}) et la température de référence du fluide de refroidissement pour le calcul de durée de vie ($\theta_{\text{COOL_AIR_REF}}$): les résultats sont présentés au Tableau C.6.

Le Tableau C.6 est généré à partir du Tableau C.5 en deux étapes:

- étape 1 – une température unique $\theta_{\text{COOL_AIR_REF}}$ pour les deux cycles de charge est déterminée, qui consomme le même CEP global. Cela est effectué par des calculs itératifs en utilisant la même méthode que pour le Tableau C.5;
- étape 2 – un courant unique I_{RATED} est ensuite déterminé, qui consomme le même CEP global à $\theta_{\text{COOL_AIR_REF}}$. Cela est effectué en appliquant la méthode itérative de 13.2.11.5 pour la correction de puissance ou de courant.

Tableau C.6 – Courant et températures équivalents

I_{RATED} A_{eff}	$\theta_{COOL_AIR_REF}$ °C	Fonctionnement (au cours de la durée de vie)		Température		Endurance thermique	
		Distribution %	AOT h	Moyenne °C	Point chaud °C	ECO h	CEP %
451	29,3	100	180 000	93	145	184 500	97,5

Annexe D (informative)

Essais diélectriques humides pour des transformateurs et des bobines d'inductance de type sec

D.1 Généralités

Des défaillances diélectriques de composants bobinés de puissance de type sec surviennent parfois après quelques années de service dans des conditions humides, telles que:

- brumisation (fines gouttelettes d'eau) les jours de pluie ou pendant des opérations de lavage de véhicule;
- neige fine aspirée par l'air forcé et fondant sur l'enroulement;
- condensation, par exemple, en entrant dans des tunnels pendant la saison froide, temps chaud et humide après des jours froids et secs;
- hiver froid avec opérations de dégivrage.

Ces défaillances surviennent bien que ces composants bobinés aient passé avec succès les essais diélectriques secs.

Cette annexe a pour objet de proposer des essais facultatifs basés sur le retour d'expérience pour évaluer la capacité à fonctionner dans des conditions humides au cours de la durée de vie exigée.

Le principe consiste à ajouter des essais de tenue en tension de source séparée:

- dans des conditions générant ou simulant la brumisation d'eau;
- avant et après un choc thermique;
- et après trempage dans l'eau.

Les essais diélectriques humides 1 à 3 décrits ont un niveau de sévérité croissant. Le degré de pollution conformément à l'IEC 62497-1 peut être utilisé en tant que ligne directrice pour exiger (ou non) un essai humide en tant qu'essai d'investigation, essai de type ou essai individuel de série suivant l'environnement fonctionnel spécifié en termes d'exposition à l'humidité et à la poussière. Si plus d'un essai est exigé, les essais doivent être effectués selon la séquence 1, 2 et 3.

Des procédures et critères détaillés sont décrits ci-dessous.

Sauf indication contraire, le composant bobiné soumis à essai, ou l'eau utilisée pour l'essai doivent être froids, c'est-à-dire, à température ambiante.

La tension d'essai diélectrique et l'essai de résistance d'isolement sont appliqués aux enroulements de façon similaire aux essais par tension de source séparée à fréquence industrielle.

D.2 Essai humide 1 (essai de type ou essai individuel de série facultatifs): trempage court

Après l'essai de tenue en tension de source séparée sec de 13.2.13.3, chaque composant bobiné froid doit être totalement immergé dans de l'eau courante froide pendant la durée spécifiée. Ensuite, le composant bobiné doit être retiré de l'eau, et soumis aux essais de résistance d'isolement et par tension de source séparée humide, dans la position

d'installation normale, et en une durée totale inférieure à 10 min. La tension doit être appliquée pendant 1 min.

S'il est exigé en tant qu'essai individuel de série, et si une stabilité élevée du processus de fabrication a été démontrée par un essai individuel de série après quelques lots, cet essai de trempage peut être effectué sur une base d'échantillonnage, après accord.

D.3 Essai humide 2 (essai d'investigation ou essai de type facultatif): brumisation

Le composant bobiné froid doit être placé dans une enceinte ventilée, dans la position d'installation normale, et pulvérisée avec de l'eau en utilisant un appareil de brumisation (nébuliseur). Cela n'est pas équivalent à la pulvérisation d'eau directement sur le composant bobiné. Par exemple, de l'eau est injectée via une buse de pulvérisation placée entre un ventilateur et le composant bobiné, afin de générer une brume d'eau fine. Ce dispositif doit être laissé en fonctionnement pendant 2 h au minimum jusqu'à ce que la surface totale du composant bobiné soit recouverte d'une couche continue de gouttelettes d'eau très fines. Le ventilateur et l'injection d'eau doivent ensuite être arrêtés, et le composant bobiné doit être soumis à l'essai de résistance d'isolement et la tension de source séparée humide doit être appliquée pendant une durée à convenir entre l'acheteur et le fabricant (au moins 1 min).

Pour investigation, il convient de mesurer les tensions d'apparition et d'extinction de décharge partielle comme spécifié en 13.2.14, avant et après l'essai de tenue en tension de source séparée.

D.4 Essai humide 3 (essai d'investigation): choc thermique – trempage long – brumisation

D.4.1 Généralités

Cet essai est utilisé pour simuler les effets du cyclage thermique combiné à l'accumulation de poussière et d'humidité.

D.4.2 Conditionnement en température

Le composant bobiné est, dans un premier temps, chauffé par injection de courant dans des conditions à convenir (par exemple à deux fois le courant assigné conformément à l'IEC 60076-11 pour l'essai de choc thermique). La température moyenne de chaque enroulement doit être vérifiée en mesurant la variation de résistance en courant continu juste avant le trempage pour choc thermique. La température moyenne de chaque enroulement doit être:

- la classe de température moins 30 °C, avec une tolérance de ± 15 °C (par exemple, 150 °C \pm 15 °C pour un système d'isolation de classe 180);
- ou, si elle est plus élevée, la température moyenne de l'enroulement en service effectif (± 15 °C), dans les conditions assignées à la température de référence du fluide de refroidissement pour le calcul de durée de vie.

D.4.3 Choc thermique

Lorsqu'il est chaud, le composant doit être immédiatement (dans un délai de 15 min après la fin de l'échauffement), brusquement et totalement immergé dans de l'eau de distribution froide. La cuve doit contenir une masse d'eau au moins égale à la moitié de la masse du composant bobiné et un volume suffisamment élevé pour le submerger totalement.

NOTE Par exemple, pour un composant de noyau fermé en fer, les deux conditions sont satisfaites si chaque dimension de la cuve est au moins 20 % plus grande que celle correspondante du composant bobiné, et si la cuve est complètement remplie d'eau.

D.4.4 Essai diélectrique

Après la durée de trempage spécifiée, le composant bobiné froid doit être enlevé de l'eau et soumis à l'essai de brumisation tel que spécifié à l'Article D.3.

D.5 Procédure d'essai commune et critères pour les essais diélectriques humides

Après avoir enlevé le composant bobiné de l'eau, il peut être égoutté et incliné pendant 1 min afin d'éliminer l'excès d'eau. Toutefois, aucune partie de celui-ci ne peut être essuyée ou séchée avant de procéder aux essais de résistance d'isolement et aux essais de tenue de tension de source séparée sous pluie ou à l'étape suivante de l'essai sous pluie.

La résistance d'isolement doit être mesurée, juste avant ($R_{IS-WET-0}$) et après ($R_{IS-WET-1}$) l'essai de tenue de tension de source séparée sous pluie.

Le courant de fuite doit être mesuré régulièrement (toutes les 30 s, par exemple) pendant l'essai diélectrique: après l'établissement de la tension d'essai.

La tension d'essai de source séparée sous pluie doit être égale à 80 % de la tension d'essai à sec.

Critères d'acceptation:

- il ne doit pas se produire de formation d'arc visible ou audible pendant l'essai diélectrique. Cependant, un arc bref, non répétitif au même point, peut être acceptable après accord de l'acheteur.
- si $R_{IS-WET-1}$ est inférieur au critère de $R_{IS-DRY-24H}$ (à convenir entre l'acheteur et le fabricant), la résistance d'isolement doit être de nouveau mesurée, à intervalles réguliers, jusqu'à 24 h au maximum de séchage naturel dans des conditions ambiantes. La pièce doit être rejetée si la résistance d'isolement est toujours plus faible que le critère $R_{IS-DRY-24H}$ indiqué.

Critère cible:

- il convient que la variation du courant de fuite pendant l'essai ou entre des pièces soit inférieure à une valeur à convenir entre l'acheteur et le fabricant;
- il convient que les résistances d'isolement ($R_{IS-WET-0}$ et $R_{IS-WET-1}$) soient supérieures à une valeur à convenir entre l'acheteur et le fabricant.

Si un critère cible n'est pas satisfait, le composant ne doit pas être automatiquement rejeté. Cependant, avant que l'acceptation puisse être décidée, le fabricant doit examiner et discuter les raisons d'un écart et les points suivants avec l'acheteur:

- l'amplitude de variation de I_{LEAK} pendant chaque essai et l'étalement de sa valeur moyenne I_{LEAK_AVG} , à l'intérieur des lots et entre eux;
- la stabilité de $R_{IS-WET-0}$ et $R_{IS-WET-1}$, à l'intérieur des lots et entre eux.

Annexe E (informative)

Profils de charge

Il convient que le profil de charge soit spécifié compte tenu des conditions de fonctionnement suivantes:

- les profils de charge normaux sont définis lorsque tous les matériels fonctionnent correctement;
- profil de surcharge. Dans le cas d'un système de traction ou d'alimentation auxiliaire produisant une redondance, si un sous-système est défaillant, l'autre (les autres) doit (doivent) fournir une puissance/un courant plus élevés que dans des conditions normales. L'acheteur doit spécifier la durée et la fréquence d'un fonctionnement en surcharge;
- puissance/courant transitoire (ou surtension) de crête. Cette capacité de surcharge est définie par un courant de courte durée maximal (par exemple, le démarrage d'un compresseur), délivré dans des conditions normales et de surcharge. L'acheteur doit spécifier la durée et la fréquence d'un fonctionnement transitoire;
- les profils de charge de courant/puissance d'hiver et d'été en fonction de la plage de températures du fluide de refroidissement correspondante;
- la vitesse de l'air pour les transformateurs/bobines d'inductance AN;
- la gestion du ventilateur (fonctionnement à vitesse variable ou fonctionnement discontinu) et la vitesse maximale du train pour les transformateurs/bobines d'inductance AF.

Bibliographie

IEC 60050-421, *Vocabulaire électrotechnique International – Chapitre 421: Transformateurs de puissance et bobines d'inductance*

IEC 60216-1, *Matériaux isolants électriques – Propriétés d'endurance thermique – Partie 1: Méthodes de vieillissement et évaluation des résultats d'essais*

IEC 60216-5, *Matériaux isolants électriques – Propriétés d'endurance thermique – Partie 5: Détermination de l'indice d'endurance thermique relatif (RTE) d'un matériau isolant*

IEC 60505, *Évaluation et qualification des systèmes d'isolation électrique*

IEC 61287-1, *Applications ferroviaires – Convertisseurs de puissance embarqués sur le matériel roulant – Partie 1: Caractéristiques et méthodes d'essais*

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

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

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