

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Railway applications – Fixed installations – Traction transformers

Applications ferroviaires – Installations fixes – Transformateurs de traction



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2014 IEC, Geneva, Switzerland

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

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

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

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

About the IEC

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

About IEC publications

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

IEC Catalogue - webstore.iec.ch/catalogue

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

IEC publications search - www.iec.ch/searchpub

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 It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing more than 30 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in 14 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

IEC Glossary - std.iec.ch/glossary

More than 55 000 electrotechnical terminology entries in English and French extracted from the Terms and Definitions clause of IEC publications issued since 2002. Some entries have been collected from earlier publications of IEC TC 37, 77, 86 and CISPR.

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

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

A propos de l'IEC

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

A propos des publications IEC

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

Catalogue IEC - webstore.iec.ch/catalogue

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

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

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

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne de termes électroniques et électriques. Il contient plus de 30 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 14 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

Glossaire IEC - std.iec.ch/glossary

Plus de 55 000 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 – Fixed installations – Traction transformers

Applications ferroviaires – Installations fixes – Transformateurs de traction

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX

XA

ICS 45.060

ISBN 978-2-8322-1645-3

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.....	5
INTRODUCTION.....	7
1 Scope.....	8
2 Normative references.....	8
3 Terms, definitions and symbols.....	9
3.1 Terms and definitions.....	9
3.2 Symbols.....	14
4 Service conditions.....	15
5 General requirements for a traction transformer.....	16
5.1 Loading.....	16
5.1.1 General.....	16
5.1.2 Rated current.....	17
5.1.3 Rated current of accessories.....	17
5.2 Checking of the capability of the transformer to sustain the stipulated load cycle.....	17
5.2.1 General.....	17
5.2.2 Temperature rise measurement for liquid immersed transformers.....	18
5.2.3 Temperature rise measurement for dry-type transformers.....	18
5.2.4 Alternative criteria for determining temperature rise limits.....	18
5.3 Transferred overvoltages.....	19
5.4 Short circuit stresses.....	19
5.4.1 General.....	19
5.4.2 Short circuit withstand (when applicable).....	19
5.5 Insulation characteristics and test values.....	20
5.6 Other particular features.....	20
5.7 Requirements for the simulation test.....	21
5.8 Rating plate.....	21
6 Directly-coupled traction transformer.....	22
6.1 General.....	22
6.2 Dielectric tests for windings with $U_m < 300$ kV.....	22
6.2.1 General.....	22
6.2.2 Applied voltage test (routine test).....	22
6.2.3 Lightning impulse test (type test).....	22
6.2.4 Induced overvoltage withstand test (routine test).....	23
6.3 Dielectric tests for windings with $U_m \geq 300$ kV.....	23
6.3.1 General.....	23
6.3.2 Applied voltage test (routine test).....	23
6.3.3 Lightning impulse test (routine test).....	23
6.3.4 Switching impulse test (routine test).....	23
6.3.5 Induced overvoltage withstand test (routine test).....	23
7 Traction converter transformers.....	24
7.1 General.....	24
7.2 Short-circuit impedance and load loss.....	25
7.2.1 Total load loss calculation.....	25
7.2.2 Impedance.....	25
7.3 Tolerances.....	26

8	Auxiliary transformers	27
9	Traction auto-transformers.....	27
9.1	General.....	27
9.2	Loading.....	29
9.3	Checking of the capability of the auto-transformer to sustain the stipulated load cycle.....	29
9.4	Short-circuit stresses	29
10	Three-phase to two-phase conversion transformers	29
10.1	General.....	29
10.2	Scott connection transformer.....	30
10.2.1	General.....	30
10.2.2	Loading.....	31
10.2.3	Checking of the capability of the Scott connection transformer to sustain the stipulated load cycle	31
10.2.4	Short-circuit stresses	31
10.3	Modified Woodbridge transformer.....	31
10.3.1	General.....	31
10.3.2	Loading.....	34
10.3.3	Checking of the capability of the modified Woodbridge transformer to sustain the stipulated load cycle	34
10.3.4	Short-circuit stresses	34
10.4	Roof-delta connection transformer.....	34
10.4.1	General.....	34
10.4.2	Loading.....	36
10.4.3	Checking of the capability of the roof-delta connection transformer to sustain the stipulated load cycle	36
10.4.4	Short-circuit stresses	36
11	Other traction transformers	37
11.1	General.....	37
11.2	Booster transformer	37
11.3	Scalene Scott connection transformer	37
	Annex A (informative) Preferred duty classes	39
	Annex B (normative) Insulation characteristics and test values	44
	Annex C (normative) Determination of losses and of equivalent current by means of alternative methods.....	45
C.1	General.....	45
C.2	Definition of symbols used in loss calculation	45
C.3	Ratios between rated current and rated service current for traction converter transformers	45
C.4	Calculation of load losses based on loss measurements at two different frequencies for oil immersed transformers	48
C.5	Calculation of load losses based on two frequencies for dry type transformers	49
	Annex D (informative) Evaluation of traction transformer behaviour	50
D.1	Evaluation of losses	50
D.2	Magnetic information	50
	Annex E (informative) Information for tenders and orders	51
E.1	Information to be provided in a tender enquiry	51
E.1.1	General.....	51
E.1.2	Characteristics	51
E.1.3	Service conditions	51

E.1.4	Auxiliaries	52
E.1.5	Operation and fitting.....	52
E.1.6	Tests	52
E.2	Information to be provided in a tender	52
	Bibliography	53
Figure 1	– Example of scheme for connection Dd0y11 with earthed screen	22
Figure 2	– Typical arrangement of a traction auto-transformer	28
Figure 3	– Vector groups of traction auto-transformers	28
Figure 4	– Connection of Scott connection transformers	30
Figure 5	– Connection of modified Woodbridge transformers	32
Figure 6	– Phase A currents on modified Woodbridge transformer	33
Figure 7	– Phase B currents on modified Woodbridge transformer	33
Figure 8	– Connection of roof-delta connection transformers	35
Figure 9	– Phase currents on roof-delta connection transformer	36
Figure 10	– Booster transformer	37
Figure 11	– Scalene Scott connection transformer	38
Figure A.1	– Test cycle for duty classes IA to IF	40
Figure A.2	– Test cycle for duty classes V, VI, VII	41
Figure A.3	– Test cycle for duty classes VIII, IX and JP	42
Figure A.4	– Test cycle for duty class CN	43
Figure C.1	– Service current versus fundamental current	48
Table 1	– Tolerances for voltage ratio and impedances of traction converter transformers	26
Table A.1	– Preferred duty classes	39
Table B.1	– Insulation voltages and test values.....	44
Table C.1	– Connections of converter transformers	46
Table C.2	– Main harmonic contents for various converter connections.....	47
Table C.3	– Service current over rated current.....	47

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**RAILWAY APPLICATIONS –
FIXED INSTALLATIONS –
TRACTION TRANSFORMERS**
FOREWORD

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

International Standard IEC 62695 has been prepared by IEC technical committee 9: Electrical equipment and systems for railways.

This standard is derived from EN 50329:2003 and its amendment 1(2010).

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

FDIS	Report on voting
9/1916FDIS	9/1943/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.

INTRODUCTION

Transformers used in fixed installations of traction systems differ from other transformers. The transformer standards of IEC technical committee 14 deal mainly with three-phase transformers or single-phase units assembled to a three-phase bank.

Application of such standards to single- or bi-phase transformers as used in traction systems is not evident.

Moreover, IEC 61378-1 deals with converter transformers for industrial use which have loading characteristics different from traction transformers for converters.

Therefore, this standard is set up to clarify the particular aspects of traction transformers.

RAILWAY APPLICATIONS – FIXED INSTALLATIONS – TRACTION TRANSFORMERS

1 Scope

This International Standard covers specific characteristics of traction transformers as defined in 3.1.1, used in traction substations or along the track for the supply of power to a.c. and d.c. traction systems or to provide power to auxiliary services. Traction transformers are either

- single-phase traction transformers, or
- three-phase to two-phase traction transformers, or
- single-, three- or poly-phase rectifier-transformers or converter-/inverter-transformers for d.c. or a.c. traction systems, or
- single phase auto-transformers for traction power supply, or
- single-phase booster transformers, or
- single- or three-phase auxiliary transformers at traction supply voltage.

Traction transformers are generally covered by the Standards of the IEC 60076 series. The requirements given in IEC 60076 apply together with the additional requirements given in this standard.

Dependent on the selected technology specific parts of IEC 60076 apply:

- IEC 60076-1: Oil immersed transformers
- IEC 60076-11: Dry-type transformers
- IEC 60076-15: Gas-filled transformers

For transformers feeding contact lines through static converters IEC 61378-1 may assist, but modified or additional requirements are given in this standard.

Transformers mounted on-board traction vehicles are covered by IEC 60310 and are excluded from the scope of this standard.

Electromagnetic compatibility is ruled by IEC 60076-1, which states that a transformer may be considered a passive element in this respect. Some accessories, however, are subject to EMC requirements given in IEC 62236-5.

2 Normative references

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

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

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

IEC 60076-3:2013, *Power transformers – Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air*

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

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

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

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

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

IEC 60076-15:2008, *Power transformers – Part 15: Gas-filled power transformers*

IEC TR 60146-1-2:2011, *Semiconductor converters – General requirements and line commutated converters – Part 1-2: Application guide*

IEC 60850:2007, *Railway applications – Supply voltages of traction systems*

IEC 61000-2-12:2003, *Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 2-12: Environment – Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public medium-voltage power supply systems*

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

IEC 62497-1:2010, *Railway applications – Insulation coordination – Part 1: Basic requirements – Clearances and creepage distances for all electrical and electronic equipment*

IEC 62498-2:2010, *Railway applications – Environmental conditions for equipment – Part 2: Fixed electrical installations*

IEC 62505-1:2009, *Railway applications – Fixed installations – Particular requirements for a.c. switchgear – Part 1: Single-phase circuit-breakers with U_m above 1 kV*

IEC 62589:2010, *Railway applications – Fixed installations – Harmonisation of the rated values for converter groups and tests on converter groups*

IEC 62590:2010, *Railway applications – Fixed installations – Electronic power converters for substations*

3 Terms, definitions and symbols

3.1 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC 60076-1 and IEC 62590, as well as the following apply.

3.1.1

traction transformer

transformer (with separate or auto-connected windings) connected to an a.c. or d.c. contact line, directly or through a converter, used in fixed installations of railway applications

Note 1 to entry: The above definition relates to the contents of this standard and is introduced to simplify the following definitions, which, in most cases, are not valid for all transformers and autotransformers.

3.1.2

traction converter transformer

traction transformer on the supply side of a converter group and supplying contact line(s) through static converter(s)

3.1.3

traction inverter transformer

traction transformer on the traction (contact) line side of a converter group and supplied by a static converter(s) (inverter)

3.1.4

directly-coupled traction transformer

traction transformer supplying contact line(s) without the interposition of static converter(s)

3.1.5

rated value

numerical value for the electrical, thermal, mechanical and environmental rating assigned to the quantities which define the operation of a traction transformer in the conditions specified in accordance with this International Standard and on which the manufacturer's guarantees and tests are based

3.1.6

rated frequency

f_N

frequency at which the traction transformer is designed to operate

3.1.7

rated voltage on the supply side of a traction transformer

U_{NL}

r.m.s. value of the sinusoidal no-load voltage assigned to be applied to the supply side terminals of a traction transformer (for traction converter transformers)

3.1.8

rated voltage of a traction autotransformer

U_{OHL}

r.m.s. value of the sinusoidal no-load voltage between the overhead contact line and the line feeder in a traction autotransformer

3.1.9

rated intermediate voltage of a traction autotransformer

U_{rail}

r.m.s. value of the sinusoidal no-load voltage between the overhead contact line and the connection to the rail

3.1.10

rated voltage on the converter side(s) of a traction converter transformer and on the traction side of a directly-coupled traction transformer

U_{NS}

r.m.s. value of the no-load voltage at the line-to-line terminals of the converter side(s) of a traction converter transformer or of the traction side of a directly-coupled traction transformer, at the rated voltage on the supply side of the traction transformer

3.1.11

rated voltage on the inverter side of a traction inverter transformer

U_{NP}

r.m.s. value of the sinusoidal no-load voltage resulting at the inverter side terminals of a traction transformer

3.1.12**rated voltage on the traction side(s) of an inverter transformer** U_{NV}

r.m.s. value of the no-load voltage at the line-to-line terminals of the traction side(s) of an inverter transformer at the rated voltage on its inverter side

3.1.13**rated power of a winding** $S_{NL}, S_{NP}, S_{NSn}, S_{NV}$

conventional value of apparent power assigned to a winding, which, together with the rated voltage of the winding, determines its rated current. It is based on the fundamental components of voltage and current (see 3.1.7, 3.1.10, 3.1.12 and 3.1.14)

Note 1 to entry: “primary” and “secondary” are referred to the normal flow of energy from the supply side to the traction side.

Note 2 to entry: In the suffix “ S_n ” for secondary windings “n” is the assigned order number of the secondary winding. In a formula where any winding is separately considered, S_N indicates the rated power of the winding considered.

3.1.14**rated current on the primary side of the traction transformer** I_{NL}, I_{NP}

r.m.s. value of the fundamental component of the current flowing through a line terminal of the primary winding which is derived from the rated power S_N and rated voltage U_N for the winding

Note 1 to entry: The generic r.m.s. of fundamental component of an a.c. current is indicated as I and the generic rated current as I_N .

3.1.15**rated current in the series winding of a traction autotransformer** I_{OHL}

r.m.s. value of the current flowing between the contact line terminal of a traction autotransformer and rail terminal

3.1.16**rated current in the common winding of a traction autotransformer** I_{feed}

r.m.s. value of the current flowing between the line feeder terminal of a traction autotransformer and rail

3.1.17**rated service current on the primary side of the traction converter transformer** I_{NGL}

r.m.s. value of the current flowing through a line terminal of the supply side winding of a traction converter transformer which contains all harmonic components and whose fundamental component is the rated current I_{NL}

Note 1 to entry: In case of traction inverter transformers it is assumed that the service current is not sensibly different from sinusoidal current in all windings.

Note 2 to entry: The generic r.m.s. value of the service current is indicated as I_G .

Note 3 to entry: The generic r.m.s. value of the harmonic current of order h of an a.c. current is indicated as I_h .

Note 4 to entry: In formulas where any winding is separately considered, I_N indicates the rated current of the winding considered and I_{NG} its rated service current.

3.1.18**rated current on the secondary side of a traction transformer** I_{NS}, I_{NV}

r.m.s value of the fundamental component of the current flowing at the terminals of the secondary winding(s) of a traction transformer, which is derived from the rated power S_N and rated voltage U_N for the winding

Note 1 to entry: When the secondary windings of a converter transformer are more than one, even if the secondaries are intended to feed a single conversion bridge, the rated secondary current of each winding may differ from that of other winding(s) by small quantities. The tolerances in any case should be observed.

Note 2 to entry: In some cases, the secondary current(s) of a traction converter transformer are not equal to the input current of the converter due to the presence of an auxiliary transformer (see Clause 3 of IEC 62589:2010).

3.1.19**rated service current on the converter (valve) side of a traction converter transformer** I_{NGSn}

r.m.s value of the current flowing at the terminals of the secondary winding(s) of a traction converter transformer which contains all harmonic components and whose fundamental component is the rated current I_{NS}

Note 1 to entry: I_{NGSn} differs from I_{NS} . The latter is taken into account to determine loadability of given accessories such as bushing insulators. Loss and temperature rise calculations are based on the rated service current, considering also the additional eddy losses in the windings and structural parts produced by the harmonics.

Note 2 to entry: In some cases, the secondary current(s) of a traction converter transformer are not equal to the input current of the converter due to the presence of an auxiliary transformer (see Clause 3 of IEC 62589:2010).

Note 3 to entry: In a formula where any winding is separately considered, I_N indicates the rated current of the winding considered and I_{NG} its rated service current.

3.1.20**basic current** $I_{BL}, I_{BP}, I_{BS}, I_{BV}, I_{BGL}, I_{BGS}$

current value in a winding which, according to a given duty class (see 3.1.31), is assumed to last for longer periods and represents the load carried out continuously by the traction transformer and on which the overloads are imposed.

3.1.21**basic current on the primary side of a traction transformer** I_{BL}, I_{BP}

r.m.s. value of the fundamental component of the current flowing through a line terminal of the primary winding which is derived from the basic power S_B and rated voltage U_N for the winding

3.1.22**basic service current on the primary side of the traction converter transformer** I_{BGL}

r.m.s. value of the current flowing through a line terminal of the supply side winding of a traction converter transformer which contains all harmonic components and whose fundamental component is the basic current I_{BL}

3.1.23**basic current on the secondary side of a traction transformer** I_{BS}, I_{BV}

r.m.s. value of the fundamental component of the current flowing at the terminals of the secondary winding(s) of a traction transformer, which is derived from the basic power S_B and rated voltage U_N for the winding

3.1.24**basic service current on the converter (valve) side of a traction converter transformer** **I_{BGSn}**

r.m.s value of the current flowing at the terminals of the secondary winding(s) of a traction converter transformer which contains all harmonic components and whose fundamental component is the basic current I_{BS}

3.1.25**leakage reactance related to the primary winding** **X_p**

<for three winding transformer> difference between the mean of the short circuit reactance values measured between the primary winding and each secondary winding and one half of the short circuit reactance measured between the two secondary windings

$$X_p = \frac{X_{ccP/S1} + X_{ccP/S2}}{2} - \frac{X_{ccS1/S2}}{2}$$

3.1.26**leakage reactance related to each of the secondary windings** **X_{S1}, X_{S2}**

<for three winding transformer> sum of the half difference of the short circuit reactance values measured between the primary winding and each secondary winding and one half of the short circuit reactance measured between the two secondary windings

$$X_{S1} = \frac{X_{ccP/S1} - X_{ccP/S2}}{2} + \frac{X_{ccS1/S2}}{2}$$

$$X_{S2} = \frac{X_{ccP/S2} - X_{ccP/S1}}{2} + \frac{X_{ccS1/S2}}{2}$$

3.1.27**reactance ratio****coupling factor** **K**

ratio between the leakage reactance from primary side and the sum of the leakage reactance from primary and secondary side

Note 1 to entry: In case of a traction transformer with two secondary windings, used for a twelve-pulse reaction converter, the reactance ratio is designed to have the same no-load secondary voltages and the same impedance between the primary and each secondary winding, in order to obtain an even sharing of the current on both bridges in case the d.c. outputs are paralleled. Then $X_{S1} = X_{S2} = X_S$ and

$$K = X_p / (X_S + X_p)$$

3.1.28**current demand**

actual or expected load variation of the current absorbed by a traction line, whose root mean square value is the rated current. It is expressed by a load diagram

3.1.29**load diagram**

true demand of current by the traction circuit in the worse expected condition

3.1.30

load cycle

conventional representation of the current demand to a traction transformer expressed in per unit of the rated currents. It shows the repetitive variation of the loads with the time and, hence, the overloads and underloads the traction transformer is expected to carry, as well as the duration and intervals assumed

Note 1 to entry: Load cycles and duty classes are intended to allow testing of the traction transformers.

3.1.31

duty class

conventional classification of the current capability of a traction transformer expressed in per unit of the basic currents I_B .

Note 1 to entry: The duty classes, associated with other rated values, define the characteristics of a traction transformer.

Note 2 to entry: Annex A indicates preferred duty classes and the corresponding basic and rated values.

Note 3 to entry: The indication of a duty class is not compulsory.

3.1.32

long time overload

peak load in the load cycle lasting from 480 s up to 7 200 s

3.1.33

short time overload

peak load in the load cycle lasting up to and including 480 s

3.1.34

additional winding

winding required for connection of auxiliary devices such as harmonic filters

3.2 Symbols

See also Figure 1 of IEC 62589:2010.

f_N	rated frequency
I_B	basic current
I_{BL}	basic current on the supply side of a traction converter transformer
I_{BP}	basic current on the supply side of a traction inverter transformer
I_{BS}	basic current on the secondary side of a traction converter transformer
I_{BGL}	basic service current on the primary side of a traction converter transformer
I_{BGS}	basic service current on the converter (valve) side of a traction converter transformer
I_{BGSn}	basic service current on the converter (valve) side of a traction converter transformer
I_{BV}	basic current on the secondary side of a traction inverter transformer
I_{feed}	rated current in the common winding of a traction autotransformer
I_G	generic r.m.s. value of the service current
I_h	generic r.m.s. value of the harmonic current
I_{NG}	r.m.s. value of the rated service current
I_{NGL}	rated service current on the primary side of a traction converter transformer
I_{NGSn}	rated service current on the converter (valve) side of a traction converter transformer

I_{NL}	rated current on the supply side of a traction converter transformer
I_{NP}	rated current on the supply side of a traction inverter transformer
I_{NS}	rated current on the secondary side of a traction converter transformer
I_{NV}	rated current on the secondary side of a traction inverter transformer
I_{OHL}	rated current in the series winding of a traction autotransformer
K	coupling factor
q	continuous level of apparent charges
S_{NL}	rated power of the supply side winding of a traction transformer
S_{NP}	rated power on the inverter side winding of a traction inverter transformer
S_{NSn}	rated power of the converter side winding(s) of a traction converter transformer and on the traction side winding of a directly-coupled traction transformer
S_{NV}	rated power on the traction side winding(s) of an inverter transformer
U_m	highest voltage for equipment
U_{NL}	rated voltage on the supply side of a traction transformer
U_{NP}	rated voltage on the inverter side of a traction inverter transformer
U_{NS}	rated voltage of the converter side(s) of a traction converter transformer and on the traction side of a directly-coupled traction transformer
U_{NV}	rated voltage on the traction side(s) of an inverter transformer
U_{OHL}	rated voltage of a traction autotransformer
U_{rail}	rated intermediate voltage of a traction autotransformer
X_p	leakage reactance from primary side (for three winding transformer)
X_S	mean value of the leakage reactances from each of the secondary windings (for three winding transformer)
$X_{S1} X_{S2}$	leakage reactance from each of the secondary windings (for three winding transformer)
X_{ccPS1}	short circuit reactance between the primary winding and secondary winding 1 (for three winding transformer)
X_{ccPS2}	short circuit reactance between the primary winding and secondary winding 2 (for three winding transformer)

4 Service conditions

Depending on the type of transformer the normal service conditions given in the relevant part of IEC 60076 apply. However, in case the average yearly ambient temperature is considered to be equal to or lower + 10 °C and the maximum daily ambient temperature is considered to be + 30 °C, the temperature rise limits may be increased by 10 K. The ambient temperature shall then be indicated in the nameplate. For other requirements IEC 62498-2 applies.

For electrical service conditions the following operation ranges shall be considered:

- voltage variation in normal operation (steady state): $\pm 10 \%$;
- voltage variation which shall not cause harmful effects: $\pm 15 \%$; (short-time: 0,5 cycle to 30 cycles)
- frequency variations in normal operation: $\pm 1 \%$.

For directly-coupled substation transformers the voltage ranges according to IEC 60850 are not relevant as in a.c. contact line systems the minimum and maximum values of the contact line voltage apply only to the remote end of feeding sections.

5 General requirements for a traction transformer

5.1 Loading

5.1.1 General

The traction transformer is subject to loads with significant and rapid variations in amplitude and duration.

Therefore the expected load diagram shall in any case be determined by the purchaser before issuing a tender invitation for the traction transformer.

NOTE Depending on the variations during a daily cycle of the load, the quadratic mean value of the most severe load demand during a reasonable period is calculated. The load is given as apparent power or as current value at a fixed voltage

Thermal effects on the transformer resulting from high loads are compensated by low loads.

For testing purposes the use of a load diagram is not practicable. Therefore a conventional load cycle, equivalent to the load diagram, is determined. The quadratic mean of the load diagram and the load cycle are conceived to be the same as well as the effects of the overloads and underloads are concerned.

The representation of the load variation may be expressed either as a duty class or as a load cycle. When this conventional representation of the loading basically corresponds to one standardised duty class, this is preferable.

Annex A shows some conventional preferred duty classes. The purchaser, however, in case he is not in a position to accept one of the preferred duty classes given in Table A.1, is allowed to state his own load cycle.

The value of the long-time overloads, their duration, as well as the interval between successive peaks of this type shall be specified by the purchaser unless a duty class is specified. The time interval conventionally assumed is given in Annex A.

The value of short-time overloads, and their duration shall be specified by the purchaser, unless a duty class is specified. As specified by the duty class, they may occur when the traction transformer is either in any loading condition or is at its basic load. The time between two short-time peaks shall have a duration of at least 1 500 s. The purchaser is allowed to require shorter intervals, but without sufficient interval between two overloads, the loading has to be considered lasting for the sum of the adjacent overloads and the matter shall be object of consideration by the manufacturer.

Therefore is essential that the rated currents and power are considered along with the load cycle or duty class specified; being understood that the rated currents represent only the quadratic mean value of the currents flowing in the windings in order to assess a value for determining other rated values and to effect calculations on the life expectancies of the traction transformer.

The transformers under this standard are normally dimensioned from the duty class or load cycle specified by the purchaser.

In case the purchaser is in a position to take into account all phenomena related to the expected overloads, he is allowed, alternatively, to specify the rating of the traction transformer, without any further reference to the expected load cycle.

In traction converter transformers with connection 9 of the converter, the power of the converter side windings is increased, taking into account the current sharing between the two secondaries (see 6.7.3 of IEC 62590:2010).

Moreover, S_{NL} or S_{NP} may differ from the $\sum_1^n S_{NSn}$ (particularly in case of auxiliary windings) because the sum should be vectorial taking into account the $\cos \varphi_n$ of the secondary currents involved.

In case of tapped windings the rated values refer to the principal tapping.

5.1.2 Rated current

The rated current of the traction transformer shall be selected and specified not less than the quadratic mean of the fundamental component of the load current I over the load cycle:

$$I_N = \sqrt{\frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} I^2(t) dt}$$

where

I_N is the winding current = I_{NP} , I_{NL} , I_{NS} or I_{NV} ,

Δt is the duration of load cycle,

t_0 is the initial time.

It is to be noted that, unless specifically agreed between purchaser and supplier, the design of a traction transformer cannot be based only on the above rating (see 5.1.1).

5.1.3 Rated current of accessories

Bushing insulators, current transformers, connections, tap changers, if any, shall comply with the rated current, the overload requirements and the harmonic contribution, if any.

5.2 Checking of the capability of the transformer to sustain the stipulated load cycle

5.2.1 General

The temperature rise test shall be carried out in accordance with either IEC 60076-2 or IEC 60076-11 or IEC 60076-15 as applicable.

Basis for determining the temperature rises shall be the rated service current (the approximate relationship between the rated current and the rated service current is given in Table C.3).

Depending on the expected frequency and character of the overloads the resulting temperature rises after long-time overloads shall be within the limits of the temperature rises given in the relevant part of IEC 60076 under the stipulated ambient conditions and altitude.

The winding temperature rise after short-time overload conditions may exceed by 15 K the applicable temperature rise limits according to the relevant part of IEC 60076.

For transformers using high-temperature insulating material IEC 60076-14 may be used as a guideline and higher temperatures may be agreed between purchaser and supplier.

When determining the temperature rises the effect of the harmonics should be considered according to 5.2.2, 5.2.3 and 5.2.4.

5.2.2 Temperature rise measurement for liquid immersed transformers

The procedure of 7.3.2 of IEC 60076-2:2011 shall be applied with the exceptions mentioned here below. The specified duty class or load cycle shall be taken into account. For transformers designed according to a duty class recommended test cycles for the temperature rise tests are given in Annex A.

The transformer in short circuit conditions shall be injected with a current causing the total losses. In case of a traction converter transformer, the total losses are intended as the sum of the no-load loss and of the total load losses determined according to Annex C.

Total losses calculated on the service current in basic load condition (I_{BGL}) are injected until it reaches temperature steady-state conditions and then the long-term overload current is injected, for the specified duration of said overload according to the duty class or load cycle. The final top oil temperature rise shall be recorded.

For determining the temperature rises of windings, the transformer shall be subsequently loaded by service currents representing the basic load (including the effect of harmonics), for the time necessary to reach steady temperatures of the windings, and, for the respective durations, the service currents corresponding to long-time overloads, and, when practicable and agreed between purchaser and supplier, service currents corresponding to short-time overloads.

Measurements shall be taken at the end of the long-time overload duration and, when applicable, at the end of the short-time overload duration. When actual measurements are not possible, it may be agreed to carry out calculations on temperature variations along the short-time load duration, performed according to conventional methods.

IEC 60076-7 gives guidance for such a calculation.

5.2.3 Temperature rise measurement for dry-type transformers

The requirements given in Clause 23 of IEC 60076-11:2004 apply taking into account that in the second part of the test the losses attributable to the various stages of the current demand shall be calculated and successively applied and the overloads for the respective duration. Annex C allows determining total load losses.

Measurements shall be taken at the end of the long-time overload duration and, when applicable, at the end of the short-time overload duration. For transformers designed according to a duty class recommended test cycles for the temperature rise tests are given in Annex A.

When actual measurements are not possible, it may be agreed to carry out calculations on temperature variations along the short-time load duration, performed according to conventional methods.

IEC 60076-12 gives guidance for such a calculation.

5.2.4 Alternative criteria for determining temperature rise limits

On agreement between purchaser and manufacturer temperature limits and thermal ageing according to IEC 60076-7, IEC 60076-12 or IEC 60076-14 may be applied.

If the purchaser is able to define the load cycle in an extensive way as current demand, the capability of the transformer to sustain this current demand shall be checked as follows:

- temperature rise and loss measurements shall be performed at sinusoidal load with rated service current I_{NGL} ;

- based on these measurements, the top-oil temperature, the hot-spot temperatures of the windings and the relative loss of life for the given current demand shall be calculated. The loss of life calculation procedure of IEC 60076-7 may be used;
- the temperatures at the beginning of the load-cycle shall be set equal to those at the end of the load cycle to consider a steady state condition;
- the calculated relative loss of life for the load cycle based on the yearly average temperature shall be equal to or lower than 1;
- for conventional oil immersed transformers, the maximum occasional hot-spot- temperature shall be lower than 140 °C and the maximum top oil temperature shall be lower than 115 °C during the load cycle; for high-temperature insulation materials higher limits may be agreed;
- the influence of harmonics shall be considered as described in Annex C.

For transformers designed according to a duty class recommended test cycles for the temperature rise tests are given in Annex A.

5.3 Transferred overvoltages

The provisions of this subclause may be normally omitted in transformers supplying a.c. contact lines, especially if one of the LV terminals is connected to the return circuit.

Care shall be taken to avoid transmission of inadmissible voltage surges between primary and secondary windings and vice versa.

The manufacturer shall either give demonstration, if required by means of a type test with the recurrent impulse generator at low voltage or by means of high impedance device (e.g. oscilloscope probe), that phenomenon is negligible or agree with the purchaser the steps taken to minimise transferred overvoltages.

This protection can be achieved, for the transformers feeding semiconductor converters, either with an insulation level in excess of the expected overvoltages or by means of suitable screens. The latter solution should be used when the demonstration according to the previous paragraph is not possible. It should be considered that in some cases overvoltages can also be reduced with capacitors connected to the LV terminals.

5.4 Short circuit stresses

5.4.1 General

Traction transformers are subject to frequent short circuits and current shocks. The purchaser shall indicate the short circuit apparent power of the supply line at the transformer (in lack of such indication the regulations in IEC 60076-5 apply). The purchaser shall also inform the manufacturer regarding the reclosing procedure in use.

The manufacturer shall take particular care to these aspects in the mechanical design of the traction transformers.

Agreed calculations or the test procedure indicated in IEC 60076-5 (special test) may prove the suitability of the transformer to withstand such stresses. A short circuit type test may be agreed between purchaser and supplier at the time of ordering.

5.4.2 Short circuit withstand (when applicable)

Traction transformers shall be suitable to short circuit test carried out at the installation site and/or in a test laboratory.

For traction converter transformers the short circuit test should be carried out as combined transformer-converter test. The procedure for this test is given in 7.7 of IEC 62589:2010.

For directly coupled traction transformers, the following procedure may be agreed.

The transformer shall be fed by the rated voltage with a wave-shape as per IEC 61000-2-12. Its tap changer, if any, shall be placed in the principal tap position. Over-excitation of the transformer to ensure full short circuit current is not admitted in this case.

The reactance of the transformer before test shall be recorded. The short circuit shall be established on the low voltage side by a suitable short circuit maker, ensuring, when possible, an asymmetric short circuit, and cleared by the secondary circuit breaker. Other test connections such as switching in with an already short circuited winding may be required. The short circuit test may also be performed with a short circuit on the high voltage side.

In case an auto-reclose scheme is adopted for the said circuit breaker, a number of sequences (up to two) of opening and closing operations, in line with the requirements of IEC 62505-1 shall be agreed in the offering stage. The sequences of short circuits shall be carried out with an interval of 900 s.

The wave shape shall be exempted from distortions during breaking as far as applicable. For this reasons breakers introducing harmonics beyond the limits given in the fourth paragraph of 5.4.2 shall be avoided.

Oscillographic record shall be taken for voltage and current both on primary and secondary side.

The following measurements shall be normally taken:

- voltage and current during the fault;
- impedance at least before the test, just after the first short circuit sequence, immediately after the second sequence, one hour after the first measurement.

To show that the test object passed the test the impedance value measured after the second sequence shall not differ from that taken before the tests by more than 3 % of the impedance value.

5.5 Insulation characteristics and test values

Annex B gives the insulation levels (corresponding to highest voltage for equipment U_m according to IEC 60076-3) to be observed in the design of the insulation and test of the same.

These values are taken from IEC 60076-3 for voltages above 52 kV and from IEC 62497-1 for traction voltages.

For voltage values not covered in Annex B the values given in Table 2 or Table 3 of IEC 60076-3:2013 may be taken as applicable.

For clearances and creepage distances, refer to IEC 62497-1 for voltages up to 52 kV and to IEC 60076-3 for higher voltages.

5.6 Other particular features

Traction transformers may be required with a tertiary/additional winding, which may be used for ancillary services. In such cases the design of the said winding shall consider very carefully transfer of overvoltages and short circuit stresses.

The choice of the provision of particular accessories and features is left to the parties and are not covered in this standard.

5.7 Requirements for the simulation test

For assessment and for simulation works, the supplier shall, when required by the purchaser and stated in the enquiry specifications, give the information mentioned in Clause D.2 relating to the magnetic characteristics of the traction transformer.

5.8 Rating plate

Requirements of IEC 60076-1 (information to be given in all cases) and of IEC 60076-11 apply.

In addition the following information shall be given:

- a) kind of transformer:
 - traction converter transformer;
 - traction inverter transformer;
 - directly-coupled traction transformer;
 - traction auto-transformer;
 - traction auxiliary transformer;
- b) the number of this standard;
- c) duty class(es), referred to Annex A to this standard;
- d) cooling method;
- e) class of insulation material used;
- f) insulation levels of the windings, referred to Annex B to this standard;
- g) provision against transferred overvoltages (if any);
- h) no-load current;
- i) inrush current (peak and time constant);
- j) short circuit power factors;
- k) indoor/outdoor;
- l) service conditions which differ from standard conditions (i.e. lower ambient temperature);
- m) auxiliary power characteristics;
- n) scheme of connection with identification of terminals (typical example is given in Figure 1).

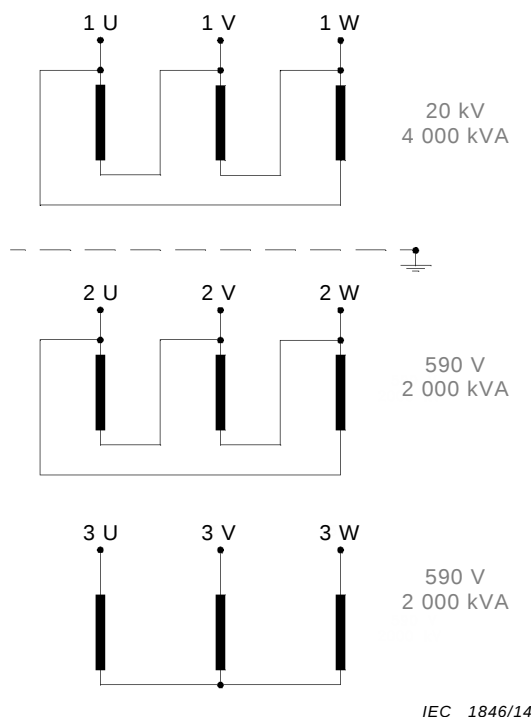


Figure 1 – Example of scheme for connection Dd0y11 with earthed screen

6 Directly-coupled traction transformer

6.1 General

This clause covers some specific testing procedures concerning single-phase traction transformers having both supply side terminals connected to two line conductors of a three-phase or single-phase system and unearthed.

Transformers with two traction side windings each having one terminal connected to contact line or to line feeder and the remaining one commonly connected to the running rails (in such cases the LV is designated $2 \times U_{ph}$) are considered for the voltage level U_m corresponding to U_{ph} if the rail is earthed.

6.2 Dielectric tests for windings with $U_m < 300$ kV

6.2.1 General

This subclause applies to transformers under 6.1 with $U_m < 300$ kV (see Clause 7 of IEC 60076-3:2013).

6.2.2 Applied voltage test (routine test)

Each winding shall be submitted to applied voltage test according to Clause 10 of IEC 60076-3:2013, but according to the insulation values given in Annex B.

6.2.3 Lightning impulse test (type test)

Each line terminal (both ends of each winding) shall be submitted to the lightning impulse test according to Clause 13 of IEC 60076-3:2013, but according to the insulation values given in Annex B. In case of tapped winding, the test shall be carried out on the principal tap, unless otherwise agreed between purchaser and manufacturer.

In addition, if agreed between purchaser and manufacturer, the lightning impulse test is carried out by impulsing the two line terminals connected together against the other winding(s), the core and the tank connected to earth.

6.2.4 Induced overvoltage withstand test (routine test)

The test voltage across the windings shall be twice the rated phase-to-phase voltage.

If in the HV winding the test voltage exceeds the value prescribed for the separate source withstand test, the voltage towards earth of the terminals may be limited by using appropriate devices connected between terminals and earth.

In case of tapped winding, the test shall be carried out on the principal tap, unless otherwise agreed between purchaser and manufacturer.

For remaining test modalities see Clause 11 of IEC 60076-3:2013.

NOTE In case of a three-phase winding, star connected, at $U_m = 245$ kV phase-to-phase, the winding is at 142 kV. The test voltage is, in any case not greater than 395 kV; the ratio between these voltages is 2,78. For single-phase transformers, connected between two line terminals, a voltage $U_m = 245$ kV is actually present across the winding. It is herein prescribed that a test voltage of 490 kV is induced to ensure a minimum test ratio of 2. Otherwise, according to IEC 60076-3, the test ratio would be only 1,61.

6.3 Dielectric tests for windings with $U_m \geq 300$ kV

6.3.1 General

This subclause applies to transformers according to 3.1 with $U_m \geq 300$ kV (see Clause 7 of IEC 60076-3:2013).

If agreed between purchaser and manufacturer, the applicability of 6.3 may be applied to transformers $U_n \geq 200$ kV.

6.3.2 Applied voltage test (routine test)

Each winding shall be submitted to applied voltage test according to IEC 60076-3:2013.

6.3.3 Lightning impulse test (routine test)

Each line terminal (both ends of each winding) shall be submitted to the lightning impulse test according to Annex B and Clause 13 of IEC 60076-3:2013.

In case of tapped winding, the test shall be carried out on the principal tap, unless otherwise agreed between purchaser and manufacturer.

6.3.4 Switching impulse test (routine test)

Each line terminal (both ends of each winding) shall be submitted to the switching impulse test according to Clause 14 of IEC 60076-3:2013. In case of tapped winding, the test shall be carried out on the principal tap, unless otherwise agreed between purchaser and manufacturer. The test may be required by the purchaser for transformer windings at voltages ≤ 300 kV U_m in case circuit breakers suitable to produce switching surges are used.

6.3.5 Induced overvoltage withstand test (routine test)

The test voltages across the windings shall be as follows:

- $U_1 = 1,7 \times U_m$ for $U_m < 200$ kV
 $2,0 \times U_m$ for $200 \text{ kV} \leq U_m < 300 \text{ kV}$
- $U_2 = 1,3 \times U_m$ with specified value of $q = 100$ pC.

If in the HV winding the test voltage exceeds the value prescribed for the separate source withstand test, the voltage towards earth of the terminals may be limited by using appropriate devices connected between terminals and earth.

In case of tapped winding, the test shall be carried out on the principal tap, unless otherwise agreed between purchaser and manufacturer.

For remaining test modalities see Clause 11 of IEC 60076-3:2013.

7 Traction converter transformers

7.1 General

The IEC 61378 series specifies requirements for converter transformers for industrial use. This clause specifies additional requirements for traction rectifier transformers of most common use in substations with semiconductor diode rectifiers. Traction converter transformers for controlled converters need additional considerations and shall be subject to special agreement between purchaser and supplier.

Transformers for 6-pulse three-phase bridge connections have one primary and one secondary winding.

Transformers for 12-pulse rectifier connections have one or two primary windings and two secondary windings with a 30° phase shift between the secondary windings. One secondary winding is commonly star connected and the other is delta connected. Three types of rectifier transformers are preferably used for 12-pulse traction rectifier groups:

- a) three-windings transformer with one primary winding and two closely coupled secondary windings: coupling factor $K \geq 0,9$;
- b) three-windings transformer with one primary winding and two loosely coupled secondary windings: coupling factor $0,2 \leq K < 0,9$;
- c) four-windings transformer with two primary windings and two uncoupled secondary windings: coupling factor $K < 0,2$.

Three-windings transformers with closely coupled secondary windings are the preferred type for 12-pulse series connections and they are also used for 12-pulse parallel connections. The 12-pulse parallel connection needs an interphase transformer between the two rectifier bridges.

NOTE At low secondary voltages as for example for series connected rectifier groups for nominal voltage 750 V d.c. it is practically impossible to reach a coupling factor $K \geq 0,9$ due to the inductance of busbars.

Three-windings transformers with loosely coupled secondary windings are used for 12-pulse parallel connections with interphase transformer where certain requirements regarding voltage characteristics and maximum short-circuit current exist.

Four-windings transformers are used for 12-pulse parallel connections without the need of an interphase transformer.

It is recommended that 12-pulse rectifier groups with uncoupled rectifier transformers are not used with interphase transformers. The impedance of the uncoupled transformer secondary windings performs a function similar to an interphase transformer.

Other types of traction rectifier transformers are

- transformers using zigzag connections for 24-pulse rectifier connections,
- transformers with compensating windings,
- transformers for six-phase double star connection with interphase transformer.

These transformers need additional considerations and the particular requirements are subject to agreement between purchaser and supplier.

It is assumed in IEC 60076 that transformers are tested in sinusoidal conditions of voltage and current, as applicable in the manufacturer's works or in a laboratory. The actual losses however are highly influenced by the harmonic contents of the current, which depends on the characteristics of the converter. To simplify, only the effect of the typical harmonics of each scheme is considered, without any reference to the voltage harmonics, due to external sources and to those harmonics, of negligible effect however, which appear in the actual operation of a converter. Refer to 7.6 of IEC 61378-1:2011 for testing methods to include such harmonic effects.

The neutral point of a secondary star winding feeding a converter shall not be earthed and normally needs not be brought out.

7.2 Short-circuit impedance and load loss

7.2.1 Total load loss calculation

The losses shall be guaranteed at rated service current (see 10.4 of IEC 60076-1:2011). On purchaser's request, as an alternative, the losses at basic service current may be guaranteed.

The load loss, which appears under normal service conditions, is considered composed of the loss in the winding resistance as measured by d.c. and the additional loss caused by eddy currents, as well as by the stray flux in the windings and in the constructive parts.

The additional stray losses caused by the harmonics depend on the construction of the transformer, on the firing angle and the commutation reactance and may vary in a wide range.

The calculation of total load loss of the traction transformer in converter operation (P_T) may be obtained through alternative methods; the purchaser shall state which method he intends to be applied at the tender invitation stage, otherwise the method will be stated by the manufacturer.

In Annex C alternative methods for the calculation of load loss in transformers during converter operation are given.

7.2.2 Impedance

NOTE For the definition of impedance see 3.7 of IEC 60076-1:2011.

The short-circuit impedance shall be measured and recorded between each pair of windings. The impedance values shall be within the tolerances stated in 7.3.

For three-windings transformers the percent impedance shall be measured and recorded

- for the whole transformer with the terminals of both secondary windings short-circuited, at rated current flowing in the primary winding, $z_{P/S}$
- between the primary winding and either secondary winding with the terminals of one secondary winding short-circuited and the terminals of the other secondary left open, at 50 % rated current flowing in the primary winding, $z_{P/S1}$ and $z_{P/S2}$
- between the two secondary windings with the terminals of one secondary winding short circuited and rated current flowing in the other secondary winding, $z_{S1/S2}$

For four-windings transformers the percent impedance shall be measured and recorded

- for the whole transformer with the terminals of both secondary windings short-circuited, and rated current flowing in the primary windings, $z_{P/S}$

- between either one primary winding and the relating secondary winding with the terminals of the secondary winding short-circuited and the terminals of the other secondary left open, at rated current of each primary winding, $z_{P1/S1}$ and $z_{P2/S2}$

In case of additional windings (for example for auxiliary supply) care shall be taken to avoid adverse effect of these windings on the impedance of the secondary windings.

7.3 Tolerances

For no-load loss and load loss the tolerances stated in Clause 9 of IEC 60076-1:2011 apply.

The permissible tolerances for voltage ratio and short circuit impedance of traction converter transformers depend on the connection of the converter group and on the requirements regarding inherent voltage regulation, short-circuit current and parallel working of converter groups.

For voltage ratio and short-circuit impedance the tolerances according to Table 1 apply.

NOTE The required tolerance values for voltage ratio and short-circuit impedances can be significantly lower than for distribution transformers.

Table 1 – Tolerances for voltage ratio and impedances of traction converter transformers

Item	Tolerance
1. Transformers with one primary and one secondary winding (three phase bridge connection no. 8) ^a	
Voltage ratio at no-load (on principal tapping)	± 0,5 % of the declared value
Short circuit impedance (on principal tapping)	± 10 % of the declared value ^b
2. Three-windings transformer with one primary and two secondary windings for 12-pulse parallel connection with interphase transformer (connection no. 9)	
Voltage ratio at no-load (on principal tapping)	
– between primary winding and either secondary winding	± 0,5 % of the declared value
– deviation of the two voltage ratios primary winding to either secondary winding from the mean value	± 0,2 % of the arithmetic mean value of both voltage ratios
Short-circuit impedance (on principal tapping) for:	
– primary winding and both secondary windings $z_{P/S}$	± 10 % of the declared value ^b
– primary winding and each individual secondary winding $z_{P/S1}$ and $z_{P/S2}$	± 10 % of the declared value ^b
– deviation of the impedance values $z_{P/S1}$ and $z_{P/S2}$ from the mean value of both impedances	± 1,5 % of the arithmetic mean value of both impedances
– one secondary winding to the other $z_{S1/S2}$	± 10 % of the declared value
3. Four-windings transformer with two primary and two secondary windings for 12-pulse parallel connection (connection no. 9 without interphase transformer) ^a	
Voltage ratio at no-load (on principal tapping)	
– between primary windings and secondary windings	± 0,5 % of the declared value
– deviation of the two voltage ratios primary winding to either secondary winding from the mean value	± 0,2 % of the arithmetic mean value of both voltage ratios
Short-circuit impedance (on principal tapping) for:	
– primary windings and both secondary windings $z_{P/S}$	± 10 % of the declared value ^b
– individual primary and secondary winding pairs $z_{P1/S1}$ and $z_{P2/S2}$	± 10 % of the declared value ^b
– deviation of the impedance values $z_{P1/S1}$ and $z_{P2/S2}$ from the mean value of both impedances	± 2,5 % of the arithmetic mean value of both impedances

Item	Tolerance
4. Three-windings transformer with one primary and two secondary windings for 12-pulse series connection (connection no. 12)	
Voltage ratio at no-load (on principal tapping) – between primary winding and either secondary winding	$\pm 0,5$ % of the declared value
Short-circuit impedance (on principal tapping) for: – primary winding and both secondary windings $z_{P/S}$ ^c – primary winding and each individual secondary winding $z_{P/S1}$ and $z_{P/S2}$ – deviation of the impedance values $z_{P/S1}$ and $z_{P/S2}$ from the mean value – one secondary winding to the other $z_{S1/S2}$	± 10 % of the declared value ^b ± 10 % of the declared value $\pm 2,5$ % of the arithmetic mean value of both impedances ± 10 % of the declared value
^a The tolerances for four-windings transformers are also applicable to the transformers of two parallel connected three-phase bridge rectifier groups (connection no. 8) with 30°-phase displaced transformer connections, both together forming a twelve-pulse substation. ^b Depending on the requirements for the voltage regulation of rectifier groups, lower tolerance values for short circuit impedance may be agreed between purchaser and supplier. This applies in particular where a new rectifier group shall be connected in parallel with one or several existing group(s). ^c This value is only correct if the current in the secondary windings is balanced during the test as it is during operation with a series rectifier. The current balance should be checked during measurement.	

8 Auxiliary transformers

Auxiliary transformers used in traction plants may have to be designed taking into account particular requirements as follows:

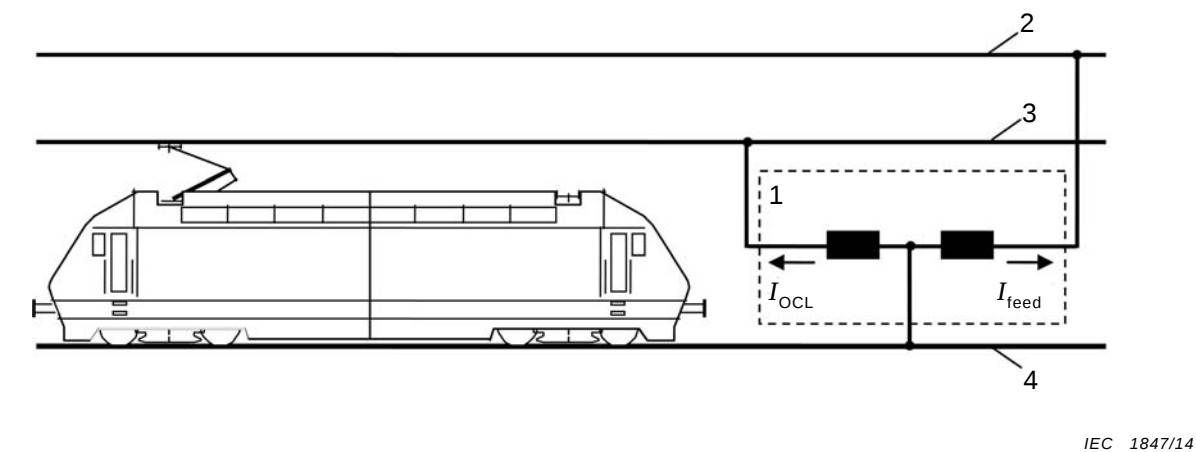
- the short circuit power upstream the transformer is in some cases higher than normal, because these transformers operate often close to supply sources of high power. This fact shall be brought by the purchaser to the attention of the supplier at the offer stage. The need of verifying short circuit withstand capability shall be considered;
- when the auxiliary transformers are subject to loads with high harmonic content this fact shall be brought by the purchaser to the attention of the supplier. In such cases it shall be agreed to follow either the provisions of Clause 4 or of IEC 61378-1:2011 (as applicable).

9 Traction auto-transformers

9.1 General

Traction auto-transformers are used in single-phase a.c. traction systems to reduce the voltage drop along the line with the possibility to increase traction power and the distance between substations (see Figure 2).

Because traction auto-transformers can also reduce the rail currents, reduction of inductive disturbance on telecommunication line may be possible.



Key

- 1 Traction autotransformer
- 2 Feeder line (Feed)
- 3 Overhead contact line (OCL)
- 4 Running rails (Rail)

I_{OCL} Winding current through OCL-winding of the autotransformer
 I_{feed} Winding current through Feeder-winding of the autotransformer

Figure 2 – Typical arrangement of a traction auto-transformer

Traction auto-transformers are connected between overhead contact line and feeder line with a mid point connection to the running rails (return circuit). The power from the feeder is transmitted with the voltage level defined by the voltage difference between overhead contact line and feeder line. Due to this higher voltage level smaller currents for the power transmission are necessary and the currents in the return circuit are reduced.

The centre tap connection can be made either internally or externally. The relating vector groups are Ia0 and Ii0 (see Figure 3).

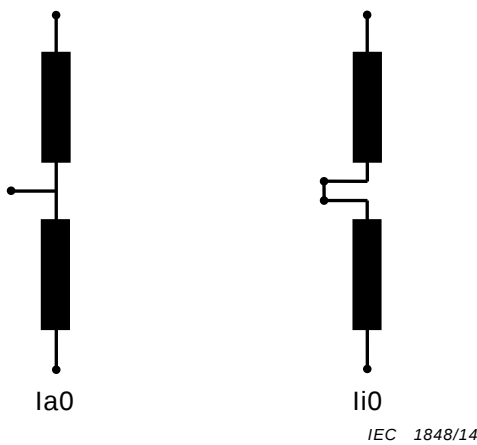


Figure 3 – Vector groups of traction auto-transformers

The most common voltage ratio is:

$$\frac{U_{\text{OCL-feed}}}{U_{\text{OCL-rail}}} = 2$$

where

$U_{\text{OCL-feed}}$ is the voltage between the overhead contact line and the line feeder,

$U_{\text{OCL-rail}}$ is the voltage between the overhead contact line and the return circuit.

Other voltage ratios are also in use.

The power of a traction auto-transformer is given as throughput power (rated power) S_N and as equivalent power S_E .

$$S_N = S_E \times \frac{U_{\text{OCL-feed}}}{U_{\text{OCL-feed}} - U_{\text{OCL-rail}}}$$

$$S_E = I_{\text{OCL}} \times U_{\text{OCL-rail}}$$

NOTE The equivalent power S_E is mainly of interest for the manufacturer of the traction auto-transformer.

The purchaser shall specify to the supplier

- the rated power S_N and/or the equivalent power S_E ,
- the voltages $U_{\text{OCL-feed}}$ and $U_{\text{OCL-rail}}$,
- the short circuit withstand currents for the windings and for the centre tap,
- the connection of the centre tap.

9.2 Loading

Subclause 5.1 applies.

9.3 Checking of the capability of the auto-transformer to sustain the stipulated load cycle

Subclause 5.2 applies.

9.4 Short-circuit stresses

Subclause 5.4 applies.

The short-circuit current level is defined by the system characteristics rather than by the auto-transformer impedance, therefore the short circuit current levels specified by the purchaser shall be applied.

10 Three-phase to two-phase conversion transformers

10.1 General

Three-phase to two-phase conversion transformers mentioned in this clause are used in a.c. traction systems for ensuring balanced load on the three-phase side.

10.2 Scott connection transformer

10.2.1 General

Scott connection transformers convert three-phase to two-phase using the connection seen in Figure 4.

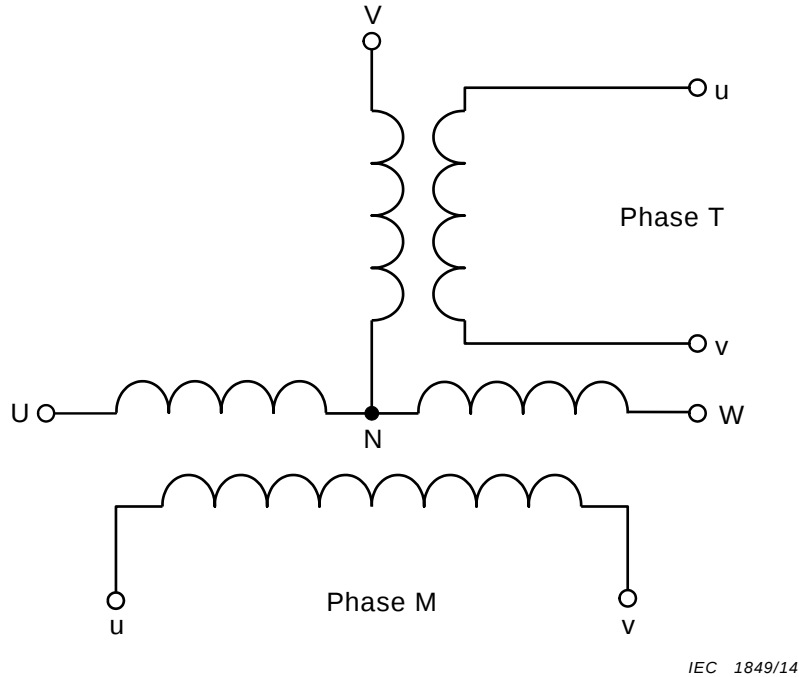


Figure 4 – Connection of Scott connection transformers

The ratio of voltages and currents between the primary side and the secondary side are given in the following formulas.

NOTE 1 Prerequisite conditions of leakage impedances or excitation impedances are omitted.

a) Voltage ratio

$$\text{Phase M} \quad \frac{\overline{U_{UW}}}{U_M} = \frac{U_1}{U_2} = m$$

$$\text{Phase T} \quad \frac{U_{VN}}{U_T} = \frac{(\sqrt{3}/2) \times U_1}{U_2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times m$$

where

- U_1 is the primary voltage (line to line);
- U_2 is the secondary voltage ($U_2 = |U_M| = |U_T|$);
- U_M is the phase M secondary voltage;
- U_T is the phase T secondary voltage.

b) Phase current (line voltage base)

$$I_U = I_W = \sqrt{I_{UM}^2 + I_{UT}^2}$$

$$I_V = I_{VT}$$

$$I_{UT} = \frac{1}{2} \times I_{VT} = \frac{1}{2} \times \frac{2}{\sqrt{3} \times m} \times I_T$$

$$I_{VT} = \frac{2}{\sqrt{3} \times m} \times I_T$$

where

I_U, I_V, I_W is the primary current;

I_M, I_T is the secondary current;

I_{UM} is the phase U primary current caused by loading on phase M;

I_{UT} is the phase U primary current caused by loading on phase T;

I_{VT} is the phase V primary current caused by loading on phase T.

NOTE 2 There are no phase V primary currents caused by loading on phase M.

10.2.2 Loading

Subclause 5.1 applies.

10.2.3 Checking of the capability of the Scott connection transformer to sustain the stipulated load cycle

Subclause 5.2 applies.

10.2.4 Short-circuit stresses

Subclause 5.4 applies.

The short-circuit current level is defined by the system characteristics rather than by the Scott connection transformer impedance. Therefore the short circuit current levels specified by the purchaser shall be applied.

10.3 Modified Woodbridge transformer

10.3.1 General

Because the neutral point of the primary winding of modified Woodbridge transformers can be earthed, modified Woodbridge transformers are used in ultra high voltage systems. Modified Woodbridge transformers are in particular used in high speed railways. The connection of modified Woodbridge transformers is shown in Figure 5.

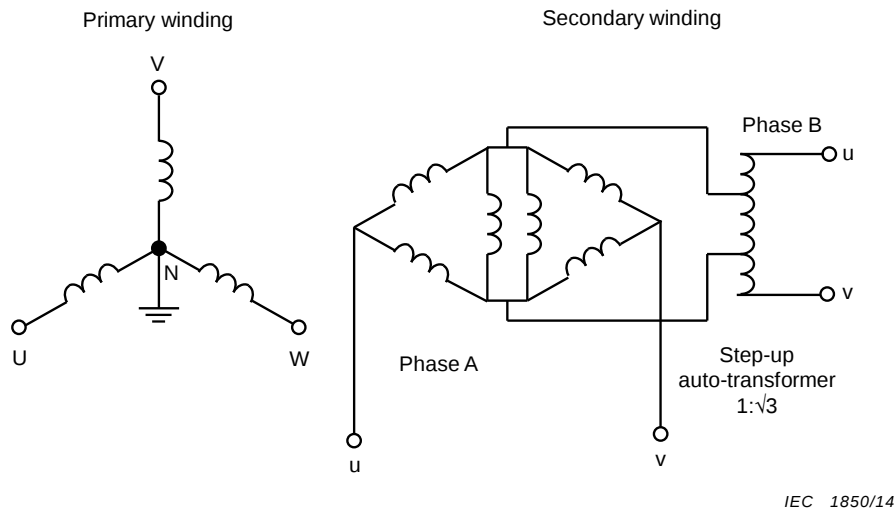


Figure 5 – Connection of modified Woodbridge transformers

The relationship of voltages and currents between the primary side and the secondary side are shown in the following formulas.

NOTE Prerequisite condition of leakage impedances or excitation impedances are omitted.

a) Voltage ratio

$$\text{Phase A} \quad \frac{\overline{U_{UW}}}{U_A} = \frac{U_1}{U_2} = m$$

$$\text{Phase B} \quad \frac{\overline{U_{VN}}}{U_B} = \frac{\frac{1}{\sqrt{3}} \times U_1}{U_2} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times m$$

where

- U_1 is the primary voltage;
- U_2 is the secondary voltage ($U_2 = |U_A| = |U_B|$);
- U_A is the phase A secondary voltage;
- U_B is the phase B secondary voltage.

b) Phase current (line voltage base)

Phase A currents are shown in Figure 6.

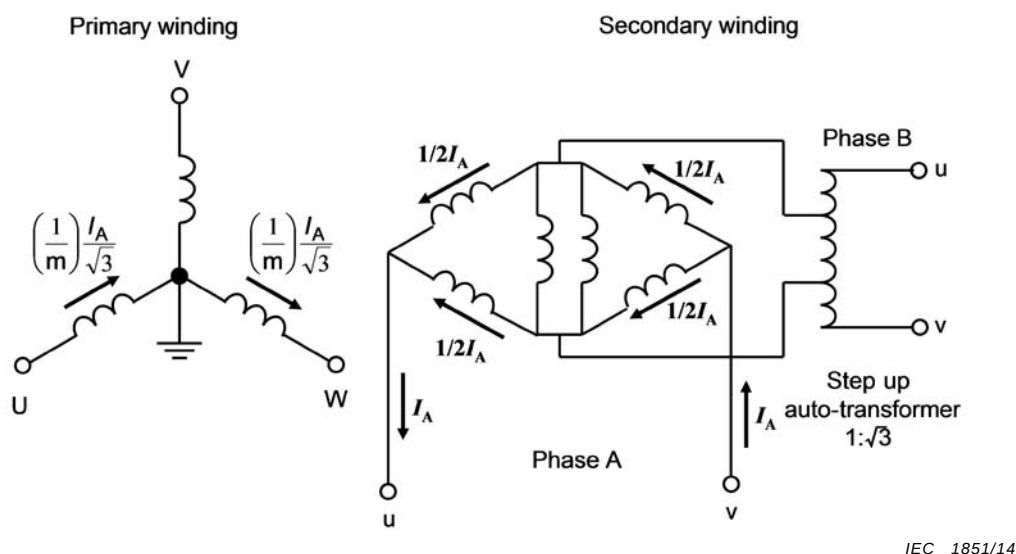


Figure 6 – Phase A currents on modified Woodbridge transformer

where:

I_A is the phase A secondary current.

Phase B currents are shown in Figure 7.

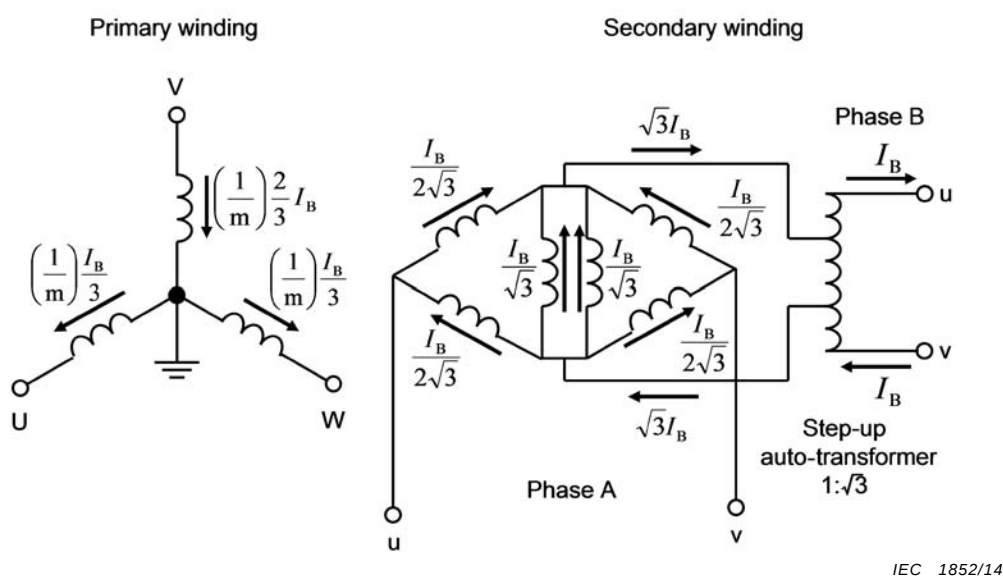


Figure 7 – Phase B currents on modified Woodbridge transformer

where

I_B is the phase B secondary current.

The above mentioned relationship gives the following formulas.

$$m \times \dot{I}_U = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \dot{I}_A - \frac{1}{3} \times \dot{I}_B$$

$$m \times \dot{I}_V = \frac{2}{3} \times \dot{I}_B$$

$$m \times \dot{I}_W = -\frac{1}{\sqrt{3}} \times \dot{I}_A - \frac{1}{3} \times \dot{I}_B$$

where

I_U, I_V, I_W is the primary current.

The current of phase A leads by 90 degrees over the current of phase B. If the phase currents of phase A and phase B are equal, the following formulas are given.

$$I_A = jI_B$$

$$m \times \dot{I}_U = \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \times \frac{2}{3} \times \dot{I}_B$$

$$m \times \dot{I}_V = \frac{2}{3} \times \dot{I}_B$$

$$m \times \dot{I}_W = \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \times \frac{2}{3} \times \dot{I}_B$$

Under the condition that the phase currents of phase A and phase B are equal, there are no currents at the neutral point of the primary winding because primary currents of three phases are balanced.

10.3.2 Loading

Subclause 5.1 applies.

10.3.3 Checking of the capability of the modified Woodbridge transformer to sustain the stipulated load cycle

Subclause 5.2 applies.

10.3.4 Short-circuit stresses

Subclause 5.4 applies.

The short-circuit current level is defined by the system characteristics rather than by the modified Woodbridge transformer impedance. Therefore the short circuit current levels specified by the purchaser shall be applied.

10.4 Roof-delta connection transformer

10.4.1 General

The neutral point of the primary winding of roof-delta connection transformers can be earthed as for modified Woodbridge transformers. In comparison to modified Woodbridge transformers, the construction of roof-delta connection transformers is simpler because the step-up auto-transformer is not necessary. The connection of roof-delta connection transformers is shown in Figure 8.

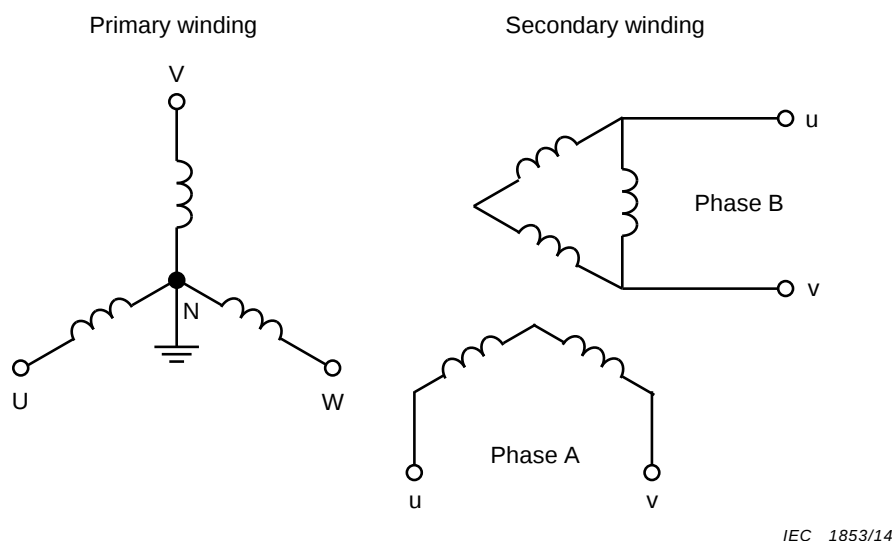


Figure 8 – Connection of roof-delta connection transformers

The relationship of voltages and currents between the primary side and the secondary side are shown in the following formulas.

NOTE Prerequisite conditions of leakage impedances or excitation impedances are omitted.

a) Voltage ratio

$$\text{Phase A} \quad \frac{\overline{U_{UW}}}{U_A} = \frac{U_1}{U_2} = m$$

$$\text{Phase B} \quad \frac{\overline{U_{VN}}}{U_B} = \frac{\frac{1}{\sqrt{3}} U_1}{U_2} = \frac{1}{\sqrt{3}} m$$

where

U_1 is the primary voltage;

U_2 is the secondary voltage ($U_2 = |U_A| = |U_B|$);

U_A is the phase A secondary voltage;

U_B is the phase B secondary voltage.

b) Phase current (line voltage base)

Phase currents are shown in Figure 9.

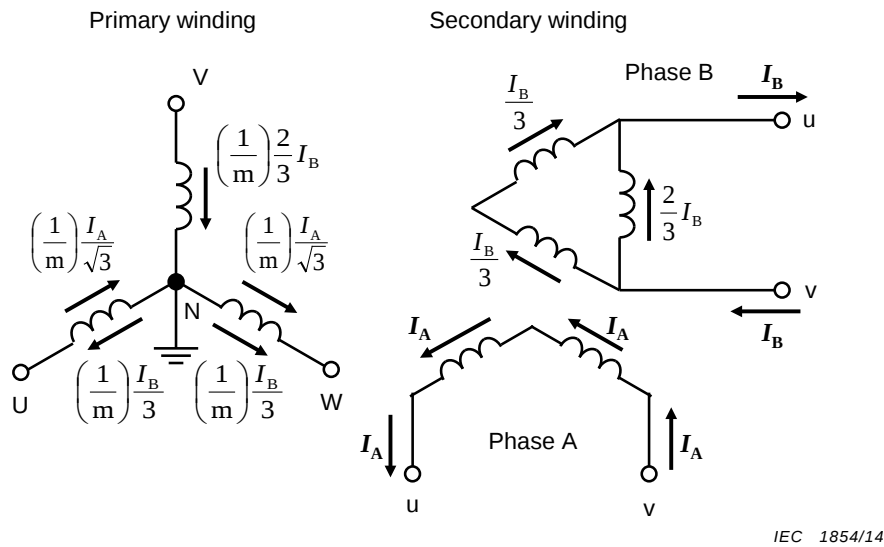


Figure 9 – Phase currents on roof-delta connection transformer

where

I_A is the phase A secondary current;

I_B is the phase B secondary current.

The above mentioned relationship gives the following formulas.

$$m \times \dot{I}_U = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \dot{I}_A - \frac{1}{3} \times \dot{I}_B$$

$$m \times \dot{I}_V = \frac{2}{3} \times \dot{I}_B$$

$$m \times \dot{I}_W = -\frac{1}{\sqrt{3}} \times \dot{I}_A - \frac{1}{3} \times \dot{I}_B$$

where

I_U, I_V, I_W is the primary current.

The relationship between voltages and currents is similar to the modified Woodbridge transformers.

10.4.2 Loading

Subclause 5.1 applies.

10.4.3 Checking of the capability of the roof-delta connection transformer to sustain the stipulated load cycle

Subclause 5.2 applies.

10.4.4 Short-circuit stresses

Subclause 5.4 applies.

The short-circuit current level is defined by the system characteristics rather than by the roof-delta connection transformer impedance. Therefore the short circuit current levels specified by the purchaser shall be applied.

11 Other traction transformers

11.1 General

There are many types of traction transformers besides the transformers as mentioned in the above clauses. Some types are mentioned in this clause.

11.2 Booster transformer

The main configuration of an a.c. traction power supply system using a booster transformer (BT) is shown in Figure 10. BT is used to reduce the return currents through rails and earth where high electric currents and difficult earthing conditions could lead to unacceptable interference and rail potentials. In BT systems, the return conductors are connected to the running rails at the midpoint between the BT locations.

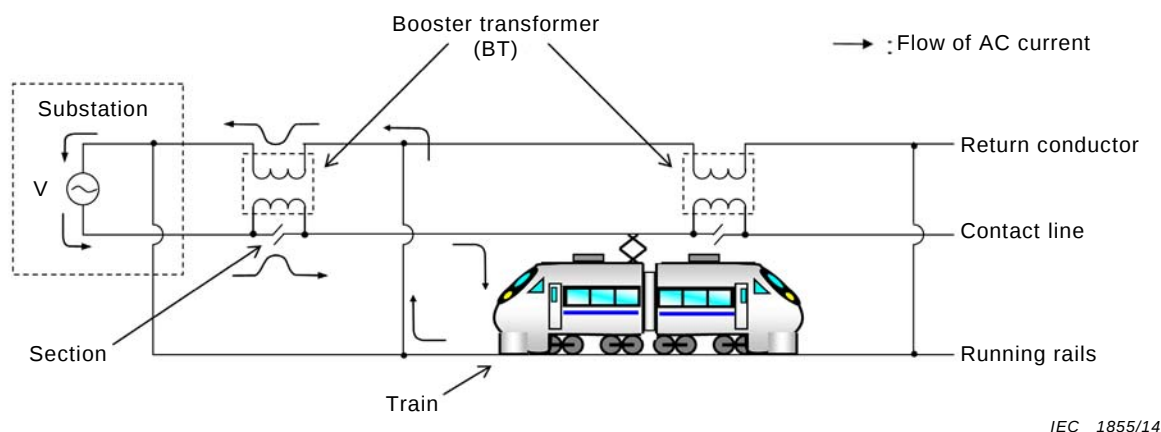
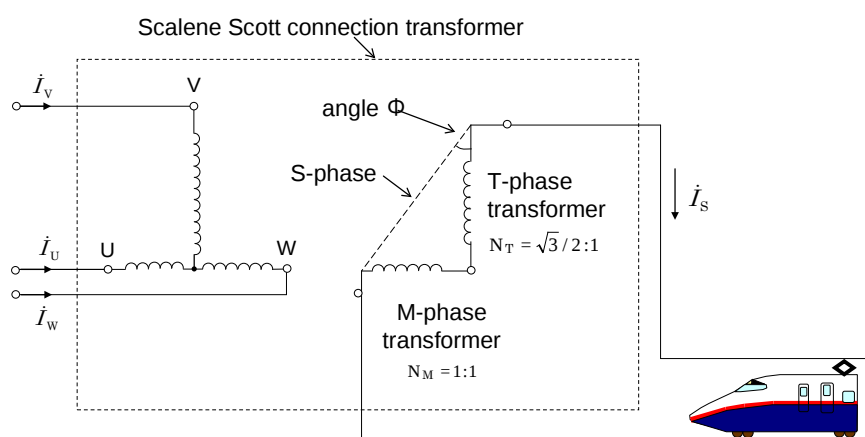


Figure 10 – Booster transformer

The requirements of Clause 4 and Clause 5 are also applicable to this type of traction transformer. Additional requirements are subject to agreement between purchaser and supplier.

11.3 Scalene Scott connection transformer

The Scott connection transformer as described in 10.2 for conversion from three-phase to two-phase has the same secondary voltage (phase M and phase T) in order to feed two single phase feeding sections. On the other hand the Scalene Scott connection transformer feeds one single section (for example in a car depot) of single phase feeding circuit by connecting its secondary windings in series. The connection is shown in Figure 11. This single phase is called “phase S”. The voltages of phase M and phase T are not always equal. Therefore, the triangle of secondary voltage vectors becomes scalene. The angle “ Φ ” indicated in Figure 11 is called the “Scott angle”. The power supply of the transformer can be balanced by connecting a reactor for phase M and a capacitor for phase T.



IEC 1856/14

Figure 11 – Scalene Scott connection transformer

The requirements of Clause 4 and Clause 5 are also applicable to Scalene Scott connection transformers. Additional requirements are subject to agreement between purchaser and supplier.

Annex A (informative)

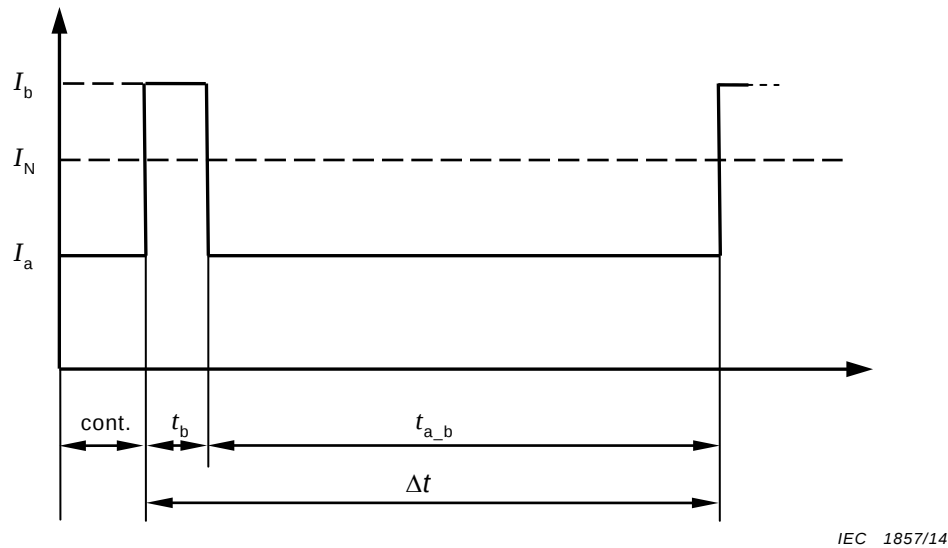
Preferred duty classes

Table A.1 gives the preferred duty classes for the design of traction transformers.

Table A.1 – Preferred duty classes

Duty class	Id.	p.u. of I_B	p.u. of I_N	Initial condition	Duration	Cool down period	Typical application	Note
I	-	1	1	-	Cont.	-	a.c. systems	
IA	a	1	0,9	-	Cont.	-	a.c. systems	
	b	1,7	1,494	a	480 s	3 120 s		
IB	a	1	0,873	-	Cont.	-	a.c. systems	
	b	2,2	1,903	a	300 s	3 300 s		
IC	a	1	0,691	-	Cont.	-	a.c. systems	
	b	2,7	1,901	a	300 s	1 500 s		
ID	a	1	0,668	-	Cont.	-	a.c. systems	
	b	3,7	2,446	a	180 s	1 620 s		
IE	a	1	0,652	-	Cont.	-	a.c. systems	
	b	4,6	3,007	a	120 s	1 680 s		
IF	A	1	0,959	-	Cont.	-	a.c. systems	
	b	3	2,876	a	120 s	3 h		
V	a	1	0,827	-	Cont.	-	mass rapid transit trolley buses	
	b	1,5	1,240	a	2 h	3 h		
	c	2	1,654	a	60 s	1 800 s		
VI	a	1	0,823	-	Cont.	-	mainline railways mass rapid transit trolley buses	
	b	1,5	1,234	a	2 h	3 h		
	c	3	2,468	a	60 s	1 800 s		
VII	a	1	0,825	-	Cont.	-	light railways tramways	
	b	1,5	1,238	a	2 h	3 h		
	c	4,5	3,716	a	15 s	1 800 s		
VIII	a	1	0,814	-	Cont.	-	mass rapid transit trolley buses	cumulative
	b	1,5	1,221	a	2 h	-		
	c	2	1,628	b	60 s	3 h		
IXA	a	1	0,785	-	Cont.	-	mainline railways	cumulative
	b	1,5	1,177	a	2 h	-		
	c	3	2,355	b	300 s	3 h		
IXB	a	1	0,658	-	Cont.	-	mainline railways	cumulative
	b	2	1,315	a	2 h	-		
	c	3	1,973	b	300 s	3 h		
JP	a	1	0,912	-	Cont.	-	mainline railways	cumulative
	b	1,2	1,095	a	2 h	-		
	c	3	2,736	b	60 s	3 h		
CN	a	1	0,8	-	354 min	-	mainline railways	cumulative 24 h – cycle
	b	2	2	a	60 min	-		
	c	3	3	b	2 min	300 min		

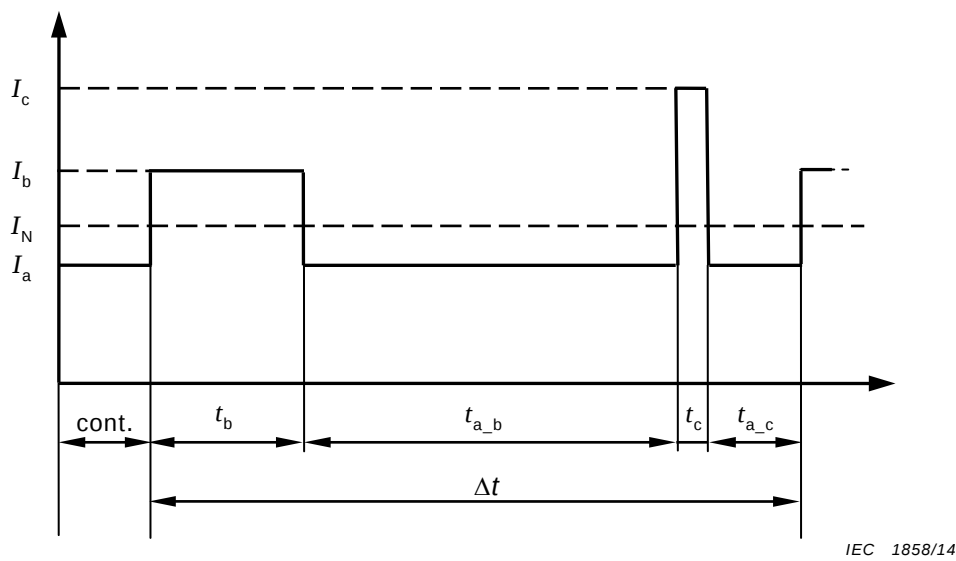
Figures A.1 to A.4 give recommended test cycles for the temperature-rise tests of traction transformers, designed according to a duty class.



Key

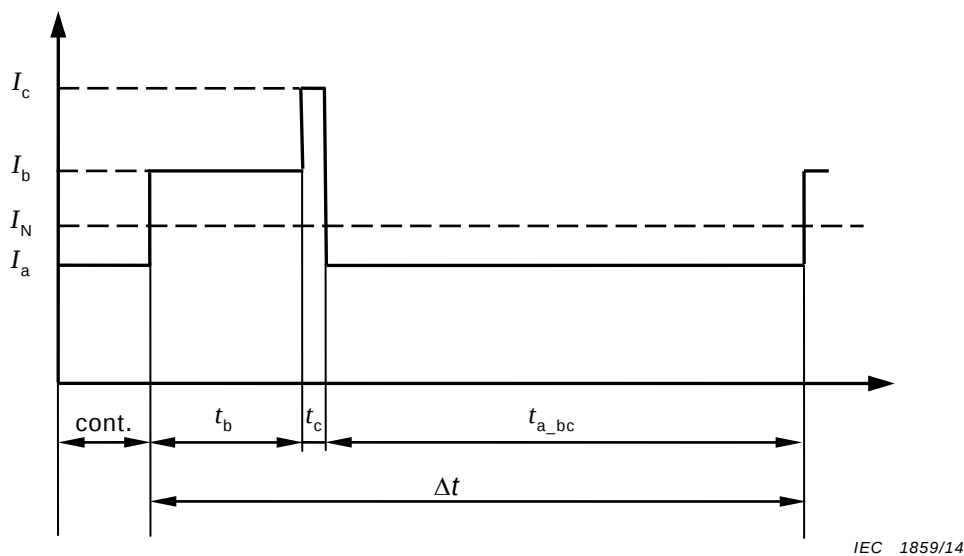
- cont. pre-heating period, injection of current until steady-state temperatures of windings at I_a are reached
- I_a service current in basic load condition
- I_b overload current b
- I_N rated current
- t_{a_b} cool down period at current I_a after overload at current I_b
- t_b duration of overload current I_b
- Δt duration of the test cycle consisting of overload and cool down period

Figure A.1 – Test cycle for duty classes IA to IF



Key	
cont.	pre-heating period, injection of current until steady-state temperatures of windings at I_a are reached
I_a	service current in basic load condition
I_b	overload current b
I_c	overload current c
I_N	rated current
t_{a_b}	cool down period at current I_a after overload at current I_b
t_{a_c}	cool down period at current I_a after overload at current I_c
t_b	duration of overload current I_b
t_c	duration of overload current I_c
Δt	duration of the test cycle consisting of overloads and cool down periods

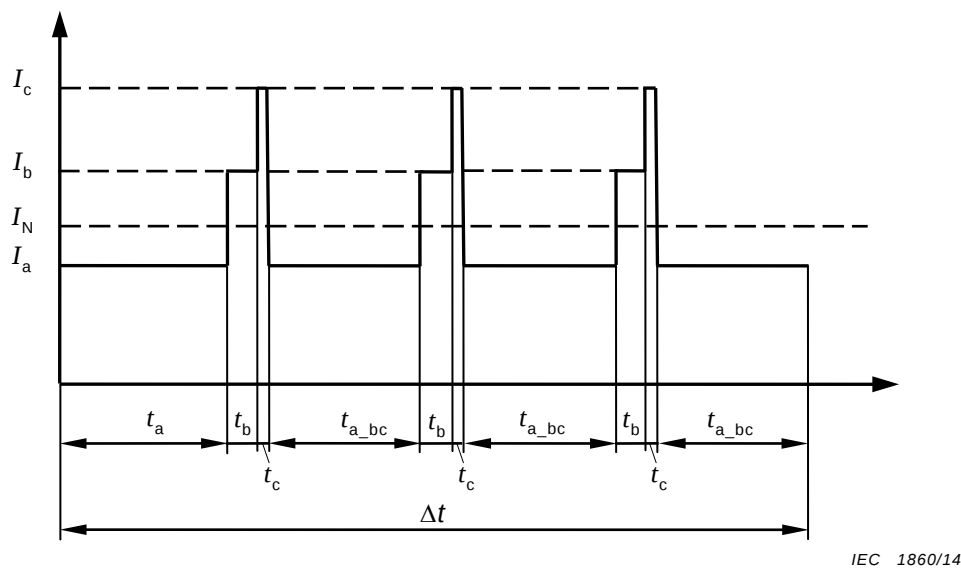
Figure A.2 – Test cycle for duty classes V, VI, VII



Key

- cont. pre-heating period, injection of current until steady-state temperatures of windings at I_a are reached
- I_a service current in basic load condition
- I_b overload current b
- I_c overload current c
- I_N rated current
- t_{a_bc} cool down period at current I_a after cumulative overload at currents I_b and I_c
- t_b duration of overload current I_b
- t_c duration of overload current I_c
- Δt duration of the test cycle consisting of overloads and cool down period

Figure A.3 – Test cycle for duty classes VIII, IX and JP



Key

- I_a service current in basic load condition
- I_b overload current b
- I_c overload current c
- I_N rated current
- t_a duration of pre-heating period at current I_a
- t_{a_bc} cool down period at current I_a after cumulative overload at currents I_b and I_c
- t_b duration of overload current I_b
- t_c duration of overload current I_c
- Δt duration of the test cycle consisting of overloads and cool down periods

Figure A.4 – Test cycle for duty class CN

Annex B (normative)

Insulation characteristics and test values

Table B.1 – Insulation voltages and test values

Insulation level (Rated insulation voltage) kV	Rated short-duration power- frequency withstand voltage (60 s r.m.s. value) kV		Rated lightning full wave impulse withstand voltage (peak value) (1,2/50 μ s peak) kV	
	A (OV3)	B (OV4)	A (OV3)	B (OV4)
0,05	0,42	0,7	0,8	1,5
0,10	0,7	1,2	1,5	2,5
0,15	1,2	1,9	2,5	4
0,3	1,9	2,8	4	6
0,9	2,8	3,6	6	8
1,2	3,6	5,5	8	12
1,8	4,6	6,9	10	15
2,3	5,5	8,3	12	18
3	6,9	9,2	15	20
3,6	11,5	14	25	30
4,8	14	18,5	30	40
6,5	18,5	23	40	50
8,3	23	27,5	50	60
10	27,5	34,5	60	75
17	44	50	95	125
17	(70)		(170)	
24	70	80	145	170
27,5	80	95	170	200
36	95	95	200	250
52	95	140	250	[325]
60	115	115	280	280
72,5	140	140	325	325
100	150	185	380	450
123	185	230	450	550
145	230	275	550	650
170	275	325	650	750
245	360	395	850	950
300	395	460	950	1 050
362	460	510	1 050	1 175
420	510	570	1 175	1 300

NOTE 1 Values in round brackets are not standard; the value in square brackets is not in line with other values although given in IEC 62497-1.

NOTE 2 The above values are taken from IEC 62497-1 for rated insulation voltages up to and including 52 kV and from other IEC documents for insulation voltages above 52 kV.

NOTE 3 According to railway application practice the term “rated insulation voltage” is herein preferred to the equivalent term “highest voltage for equipment”. It is a point-to-point (e.g. line-to-earth) voltage and not a system voltage.

Annex C (normative)

Determination of losses and of equivalent current by means of alternative methods

C.1 General

In the following clauses two conventional methods for estimating the total load losses in converter duty are given. They are based on load measurements at two different frequencies and are

- calculation of losses for oil immersed transformers (see Clause C.4),
- calculation of losses for dry type transformers (see Clause C.5).

C.2 Definition of symbols used in loss calculation

P_T	Total load loss in a traction transformer at rated load
f_1	$= f_N$ Rated frequency
f_2	Increased frequency
r	f_2 / f_1
P_1	Total load loss measured at rated frequency at sinusoidal voltage
P_2	Total load loss measured at increased frequency at sinusoidal voltage
P_Ω	Load loss due to the ohmic resistance of the winding based on service current, determined from d.c. measurement
P_{WE1}	Eddy losses of the windings at frequency f_1
P_{WE2}	Eddy losses of the windings at f_2
P_{SE1}	Stray losses in structural parts, excluding windings, at frequency f_1 and in windings when not depending on the frequency
P_{SE2}	Stray losses in structural parts, excluding windings, at f_2 and in windings when not depending on the frequency
P_{F1}	Eddy losses varying with the square of the frequency and determined at f_1
P_{F2}	Eddy losses varying with the square of the frequency and determined at f_2
P_k	Eddy losses independent from frequency
I_{GT}	$= I_{GL}$ or I_{GV} : rated service current of the winding concerned
h	Harmonic order
i_h	Amplitude of the given harmonic current
I_N	Rated current at fundamental frequency of the winding concerned

C.3 Ratios between rated current and rated service current for traction converter transformers

Basing on tests made on transformers connected to different converter connections (see Table C.1) the main values of current harmonic contents, in per unit of fundamental current, are conventionally given by Table C.2.

Table C.1 – Connections of converter transformers

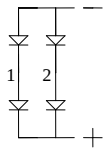
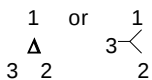
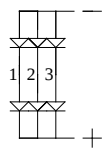
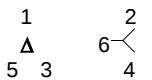
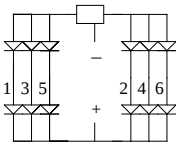
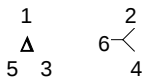
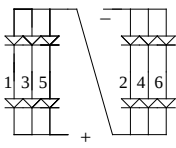
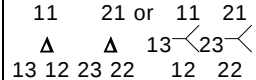
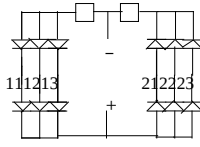
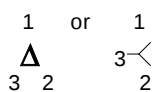
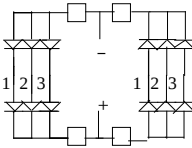
Connection	Transformer connection valve side	Valve connection
1	3	4
7		
8		
9		
12		
18		
19		

Table C.2 – Main harmonic contents for various converter connections

Harmonic order	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27
Frequencies Hz	16,7 50 60	50 150 180	83 ¹ / ₃ 250 300	117 350 420	150 450 540	183 550 660	217 650 780	250 750 900	283 850 1 020	317 950 1 140	350 1 050 1 260	383 1 150 1 380	417 1 250 1 500	450 1 350 1 620
Bridge connection (see Table C.1)	Harmonic contents in per unit of fundamental component Informative values for non-controlled converters (based on rated load conditions)													
7	1	0,310	0,175	0,111	0,086	0,045	0,029	0,021	0,015	0,010	0,009	0,009	0,008	0,007
8 9, 12 LV 9,12 HV (4 winding)	1		0,175	0,111		0,045	0,029		0,015	0,010		0,009	0,008	
9 HV (3 winding)	1					0,045	0,029					0,009	0,008	
12 HV (3 winding)	1					0,045	0,029					0,009	0,008	
Bridge connection (see Table C.1)	Harmonic contents in per unit of fundamental component Theoretical values for rectangular wave-shape													
7	1	0,333	0,2	0,143	0,111	0,091	0,077	0,067	0,059	0,052	0,047	0,044	0,040	0,036
8 9, 12 LV 9,12 HV (4 winding)	1		0,2	0,143		0,091	0,077		0,059	0,052		0,044	0,040	
9 HV (3 winding)	1					0,091	0,077					0,044	0,040	
12 HV (3 winding)	1					0,091	0,077					0,044	0,040	

For controlled converters the harmonic current depends on the trigger delay angle α and can be calculated as shown in 5.5.2 of IEC TR 60146-1-2:2011. Alternatively the theoretical value indicated in Table C.2 may be assumed.

Considering the full range of harmonics and using the formula $I_{GT} = \sqrt{\sum_{h=1}^n i_h^2}$ the ratios between the r.m.s. values of the service current over the rated (fundamental) current as given in Table C.3 may be assumed:

Table C.3 – Service current over rated current

Connection of bridge	Applicability	I_{NG}/I_N for non-controlled converters	I_{NG}/I_N theoretical
7	Primary and secondary	1,070	1,10
8	Primary and secondary	1,023	1,05
9, 12	Primary	1,001	1,01
9, 12	Secondaries	1,023	1,05

With transformers with two secondaries used in connection 9 and 12, when the transformer has the secondary windings and the primary winding in stack, with the two parts of the primary connected in parallel, the factor for every part of primary is 1,05 as the factor of the relative secondary. At the primary terminals the factor decreases to 1,01 (see Figure C.1).

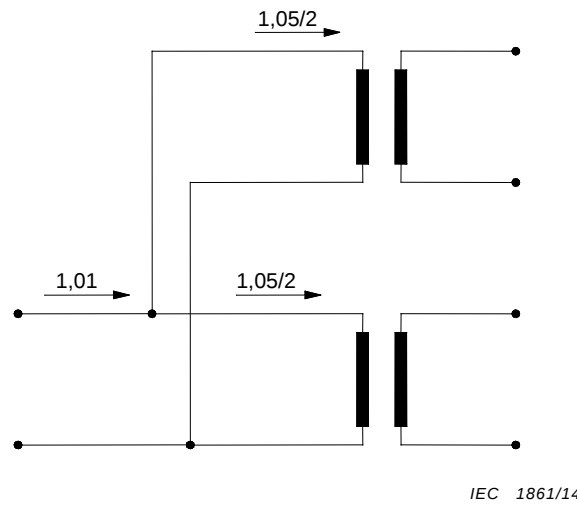


Figure C.1 – Service current versus fundamental current

C.4 Calculation of load losses based on loss measurements at two different frequencies for oil immersed transformers

The load losses are measured at two different frequencies with practical sinusoidal wave shape according to 10.4 of IEC 60076-1:2011. One measurement P_1 should be made at rated frequency $f_1 = f_N$ (16,7 Hz; 50 Hz; 60 Hz) and the other P_2 at a frequency $f_2 \geq 2 f_1$. Moreover, a measurement shall be made according to the traditional method at d.c., to determine the value of the ohmic losses at rated current.

The load losses P_1 are given by the following formula:

$$P_1 = P_{\Omega} + P_{WE1} + P_{SE1} \quad (C.1)$$

See Clause C.2 for symbols.

The load losses P_2 are given by the following formula:

$$P_2 = P_{\Omega} + P_{WE2} + P_{SE2} = P_{\Omega} + P_{WE1} \times r^2 + P_{SE1} \times r^{0,8} \quad (C.2)$$

The last measurement may be made with 10 % to 20 % of the rated current, but the measured losses shall be recalculated to rated current.

Solving (C.1) and (C.2) gives:

$$P_{WE1} = \frac{-P_2 + P_{\Omega} + r^{0,8} \times (P_1 - P_{\Omega})}{r^{0,8} - r^2}$$

$$P_{SE1} = \frac{P_2 - P_{\Omega} - r^2 \times (P_1 - P_{\Omega})}{r^{0,8} - r^2}$$

Based on the given harmonic current spectrum (see Clause C.3) the load losses in rectifier duty (P_T) can be calculated simplified:

$$P_T = P_\Omega + P_{WE1} \times \frac{\sum_{h=1}^n i_h^2 \times h^2}{I_{NT}^2} + P_{SE1} \sum_{h=1}^n \left(\left(\frac{i_h}{I_N} \right)^2 \times (h)^{0,8} \right)$$

C.5 Calculation of load losses based on two frequencies for dry type transformers

The method is based on the determination of the load losses of a transformer as a sum of the respective amount due to ohmic resistance of the winding and of the two portions of eddy losses which vary with the square of the frequency or are independent from frequency.

To obtain this determination of losses three tests shall be made:

- a traditional measurement at d.c. to assess the value of the ohmic resistance and hence the ohmic loss (P_Ω) at the rated current;
- a traditional measurement carried out as stated in IEC 60076 and made taking into account the fundamental component of the currents at the rated frequency f_1 (16,7 Hz, 50 Hz, 60 Hz). The value of the losses P_1 will be obtained:

$$P_1 = P_\Omega + P_{F1} + P_K$$

- a measurement as above but made at a frequency $f_2 \geq 2 f_1$; the value of the losses P_2 will be obtained:

$$P_2 = P_\Omega + P_{F2} + P_K = P_\Omega + r^2 \times P_{F1} + P_K$$

This measurement may be made with 10 % to 20 % of the rated current, but the measured losses shall be recalculated to the rated current.

Solving the two components of the load eddy losses result:

$$P_{F1} = \frac{P_2 - P_1}{r^2 - 1}$$

$$P_K = \frac{P_1 r^2 - P_2 + P_\Omega \times (1 - r^2)}{r^2 - 1}$$

and then the load losses P_T in rectifier duty at the rated service current can be calculated simplified:

$$P_T = (P_\Omega + P_K) \times \left(\frac{I_{NT}}{I_N} \right)^2 + P_{F1} \times \sum_{h=1}^n h^2 \times \left(\frac{I_h}{I_N} \right)^2$$

The portion of eddy losses varying with the square of the frequency and being independent from frequency shall be taken into account into temperature extrapolation of the losses.

Losses depending on the square of the frequency shall be considered varying indirectly to temperature and additional losses independent from frequency shall be considered varying directly with the temperature as ohmic losses.

Annex D (informative)

Evaluation of traction transformer behaviour

D.1 Evaluation of losses

The traction transformers are subject to heavy overloads, but may also be operated in underload conditions for long periods. This fact should be brought to the attention of the manufacturer who should attribute to load and non-load loss proper figures to meet purchaser's needs. The purchaser should give an indication in this respect; for this purpose a capitalisation formula can be indicated in the tender; the formula may include the following terms:

$$C_t = C_1 + A \times P_0 + B \times P_I$$

where

- C_t is the capitalised transformer price,
- C_1 is the tendered transformer price,
- A, B are the factors (kilowatt monetary value) stated in tender enquiry,
- P_0 is the guaranteed no-load loss in kilowatts,
- P_I is the guaranteed load (I^2R + stray) loss in kilowatt (see IEC 60076 and 4.2, as applicable).

D.2 Magnetic information

According to 5.7 the following information may assist in the design of the installation and should be given when required:

a) Parameters

- mean relative permeability μ ;
- equivalent length of the magnetic circuit l [m];
- mean section of magnetic circuit s [m²];
- magnetic coupling factor Ξ (required 10^{-6} accuracy);
- mutual inductance M [H].

For definitions refer to IEC 60050-121.

b) Characteristics of the magnetic circuit

- characteristics of the electrical steel (designation and thickness);
- maximum specific losses (W/kg) for 1,5 T and 1,7 T at 50 Hz.

Annex E (informative)

Information for tenders and orders

E.1 Information to be provided in a tender enquiry

E.1.1 General

- a) standard applicable (confirmation of this standard);
- b) type of traction transformer (see Clause 1);
- c) rated power of primary and secondary windings [kVA or MVA];
- d) vector groups and connections (number of secondaries);
- e) dry type, liquid immersed or oil immersed.

E.1.2 Characteristics

- a) rated frequency;
- b) rated voltage on the primary side;
- c) rated voltage(s) on the secondary side(s);
- d) rated insulation voltage on the primary side;
- e) rated insulation voltage on the secondary side(s);
- f) power frequency withstand voltage on primary side;
- g) power frequency withstand voltage on secondary side(s);
- h) tapping on primary or secondary side and type of tap changing (on-load, off-circuit or terminal board);
- i) duty class or load cycle;
- j) impedance voltage for each pair of windings;
- k) short circuit level on the supply side network;
- l) short circuit level from the traction side network in reverse flow of power (if applicable);
- m) type of converter and converter connection if the transformer is feeding a converter;
- n) requirements concerning noise level;
- o) tolerance on impedance between the primary and each secondary;
- p) maximum unbalance between the primary and each secondary winding;
- q) tolerance on voltage ratio between the primary and each secondary;
- r) maximum unbalance between the primary and each secondary winding;
- s) request of protection against transferred overvoltages;
- t) requirements on winding insulation classes.

E.1.3 Service conditions

- a) indoor / outdoor;
- b) service conditions differing from normal conditions according to Clause 4;
- c) other environmental conditions if differing from those specified in IEC 60076-1;
- d) voltage range of supply;
- e) frequency range of supply;
- f) earthing arrangement.

E.1.4 Auxiliaries

- a) characteristics (voltage, a.c. or d.c., available power, short circuit level, etc.) of the auxiliary supply(ies);
- b) which auxiliary equipment or fittings are to be included in the supply;
- c) transport utilities (rollers, skid underbase, feet).

E.1.5 Operation and fitting

- a) type of cooling;
- b) different loads required for partial cooling;
- c) fire requirements (for dry-type transformers);
- d) type of terminations to be provided, i.e. bushings, cable boxes, and details of cables, gland sizes, bending radii;
- e) fittings required and their position, i.e. tapping switches, winding temperature indicators, etc.;
- f) special conditions, if any, e.g. dimensional restrictions and transport limitations.

E.1.6 Tests

- a) list of tests in addition to routine tests (type and additional/special tests);
- b) for traction converter transformers methods of calculation of losses;
- c) method of assessment of temperature rises during short-time overloads.

E.2 Information to be provided in a tender

The tenderer should supply a confirmation of the required characteristics and should supply the following details if so required:

- a) impedance between each pair of windings within stated tolerances (guaranteed);
- b) resistance of each winding (tolerances to be stated) (guaranteed);
- c) windings materials;
- d) windings insulation classes;
- e) no-load losses;
- f) load losses in the windings at rated current or, alternatively, basic current (for traction converter transformers, with additional losses due to harmonic contents; for transformers with two secondaries, the losses should be referred to the secondary rated current);
- g) oil weight (when applicable);
- h) shipping dimensions and weights;
- i) no-load current;
- j) inrush current;
- k) short-circuit power factor;
- l) diagrams and equivalent diagrams as suitable to show relationship between electrical parameters.

Bibliography

IEC 60050(all parts), *International Electrotechnical Vocabulary (IEV)*

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

IEC 62236-5:2008, *Railway applications – Electromagnetic compatibility – Part 5: Emission and immunity of fixed power supply installations and apparatus*

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	57
INTRODUCTION	59
1 Domaine d'application	60
2 Références normatives	60
3 Termes, définitions et symboles	62
3.1 Termes et définitions	62
3.2 Symboles	67
4 Conditions de service	68
5 Exigences générales pour un transformateur de traction	68
5.1 Chargement	68
5.1.1 Généralités	68
5.1.2 Courant assigné	69
5.1.3 Courant assigné des accessoires	70
5.2 Vérification de la capacité du transformateur à supporter le cycle de charge stipulé	70
5.2.1 Généralités	70
5.2.2 Mesures des échauffements des transformateurs immergés dans un liquide	70
5.2.3 Mesure d'échauffement des transformateurs de type sec	71
5.2.4 Autres critères pour la détermination des limites d'échauffement	71
5.3 Transfert des surtensions	72
5.4 Contraintes dues aux courts-circuits	72
5.4.1 Généralités	72
5.4.2 Tenue au court-circuit (si applicable)	72
5.5 Caractéristiques d'isolement et valeurs d'essai	73
5.6 Autres caractéristiques particulières	73
5.7 Exigences pour l'essai de simulation	74
5.8 Plaque signalétique	74
6 Transformateur de traction à couplage direct	75
6.1 Généralités	75
6.2 Essais diélectriques pour enroulements avec $U_m < 300$ kV	75
6.2.1 Généralités	75
6.2.2 Essai de tension appliquée (essai individuel)	75
6.2.3 Essai au choc de foudre (essai de type)	75
6.2.4 Essai de tenue aux surtensions induites (essai individuel)	76
6.3 Essais diélectriques pour enroulements avec $U_m \geq 300$ kV	76
6.3.1 Généralités	76
6.3.2 Essai de tension appliquée (essai individuel)	76
6.3.3 Essai au choc de foudre (essai individuel)	76
6.3.4 Essai au choc de manœuvre (essai individuel)	76
6.3.5 Essai de tenue aux surtensions induites (essai individuel)	76
7 Transformateur convertisseur de traction	77
7.1 Généralités	77
7.2 Impédance de court-circuit et pertes en charge	78
7.2.1 Calcul des pertes en charge totales	78
7.2.2 Impédance	78

7.3	Tolérances	79
8	Transformateurs auxiliaires.....	81
9	Autotransformateurs de traction	81
9.1	Généralités	81
9.2	Chargement	83
9.3	Vérification de la capacité de l'autotransformateur à supporter le cycle de charge stipulé	83
9.4	Contraintes dues aux courts-circuits	83
10	Transformateurs de conversion biphasés ou triphasés	83
10.1	Généralités	83
10.2	Transformateurs à montage Scott.....	83
10.2.1	Généralités	83
10.2.2	Chargement	84
10.2.3	Vérification de la capacité du transformateur à montage Scott à supporter le cycle de charge stipulé.....	84
10.2.4	Contraintes dues aux courts-circuits	85
10.3	Transformateur Woodbridge modifié.....	85
10.3.1	Généralités	85
10.3.2	Chargement	88
10.3.3	Vérification de la capacité du transformateur Woodbridge modifié à supporter le cycle de charge stipulé.....	88
10.3.4	Contraintes dues aux courts-circuits	88
10.4	Transformateur à montage étoile-triangle	88
10.4.1	Généralités	88
10.4.2	Chargement	90
10.4.3	Vérification de la capacité du transformateur à montage étoile-triangle à supporter le cycle de charge stipulé.....	91
10.4.4	Contraintes dues aux courts-circuits	91
11	Autres transformateurs de traction	91
11.1	Généralités	91
11.2	Transformateurs survolteurs.....	91
11.3	Transformateurs à montage Scalene Scott	92
Annexe A (informative)	Classes de service préférentielles	93
Annexe B (normative)	Caractéristiques d'isolement et valeurs d'essai.....	98
Annexe C (normative)	Détermination des pertes et du courant équivalent par différentes méthodes.....	99
C.1	Généralités	99
C.2	Définitions des symboles utilisés dans le calcul des pertes	99
C.3	Rapports entre le courant assigné et le courant de service assigné des transformateurs convertisseurs de traction	100
C.4	Calcul des pertes en charge des transformateurs immergés dans l'huile basé sur des mesures de perte à deux fréquences différentes	102
C.5	Calcul des pertes en charge des transformateurs de type sec basé sur des mesures de perte à deux fréquences différentes.....	103
Annexe D (informative)	Evaluation du comportement du transformateur de traction	105
D.1	Evaluation des pertes.....	105
D.2	Propriétés magnétiques.....	105
Annexe E (informative)	Informations pour les offres et les commandes.....	106
E.1	Informations à fournir dans l'appel d'offres	106
E.1.1	Généralités	106

E.1.2	Caractéristiques	106
E.1.3	Conditions de service	106
E.1.4	Auxiliaires	107
E.1.5	Fonctionnement et accessoires	107
E.1.6	Essais	107
E.2	Informations à fournir dans l'offre	107
	Bibliographie	108
Figure 1	Exemple de schéma du couplage Dd0y11 avec écran à la terre	75
Figure 2	Disposition type d'un autotransformateur de traction	81
Figure 3	Groupes de vecteurs pour les autotransformateurs de traction	82
Figure 4	Connexion des transformateurs à montage Scott	83
Figure 5	Connexion des transformateurs Woodbridge modifiés	85
Figure 6	Courant de la phase A sur un transformateur Woodbridge modifié	86
Figure 7	Courant de la phase B sur un transformateur Woodbridge modifié	87
Figure 8	Connexion des transformateurs à montage étoile-triangle	89
Figure 9	Courants de phase pour les transformateurs à montage étoile-triangle	90
Figure 10	Transformateur survolteur	91
Figure 11	Transformateur à montage Scalene Scott	92
Figure A.1	Cycle d'essai pour les classes de service IA à IF	94
Figure A.2	Cycle d'essai pour les classes de service V, VI et VII	95
Figure A.3	Cycle d'essai pour les classes de service VIII, IX et JP	96
Figure A.4	Cycle d'essai pour la classe de service CN	97
Figure C.1	Courant de service en fonction du courant fondamental	102
Tableau 1	Tolérances pour le rapport de tension et l'impédance des transformateurs convertisseurs de traction	79
Tableau A.1	Classes de service préférentielles	93
Tableau B.1	Tensions d'isolement et valeurs d'essai	98
Tableau C.1	Montages des transformateurs convertisseurs	100
Tableau C.2	Principaux résidus harmoniques pour les différents montages de convertisseur	101
Tableau C.3	Rapports du courant de service au courant assigné	101

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

APPLICATIONS FERROVIAIRES – INSTALLATIONS FIXES – TRANSFORMATEURS DE TRACTION

AVANT-PROPOS

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

La Norme internationale IEC 62695 a été établie par le comité d'études 9 de l'IEC: Matériels et systèmes électriques ferroviaires.

La présente norme est dérivée de l'EN 50329:2003 ainsi que de son amendement 1(2010).

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
9/1916/FDIS	9/1943/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.

INTRODUCTION

Les transformateurs utilisés dans les installations fixes des systèmes de traction diffèrent des autres transformateurs. Les normes de transformateur du comité d'études 14 de l'IEC traitent principalement des transformateurs triphasés ou des unités monophasées assemblées pour réaliser un groupe triphasé.

L'application de telles normes aux transformateurs monophasés ou biphasés utilisés dans les systèmes de traction n'est pas évidente.

De plus, l'IEC 61378-1 traite des transformateurs convertisseurs à usage industriel qui ont des caractéristiques de charges différentes des transformateurs de traction pour convertisseurs.

Par conséquent, la présente norme est élaborée pour clarifier les aspects spécifiques des transformateurs de traction.

APPLICATIONS FERROVIAIRES – INSTALLATIONS FIXES – TRANSFORMATEURS DE TRACTION

1 Domaine d'application

La présente Norme internationale couvre les caractéristiques spécifiques des transformateurs de traction définis en 3.1.1 et utilisés dans les sous-stations de traction ou le long de la voie pour l'alimentation de puissance des systèmes de traction à courant alternatif et à courant continu ou pour fournir de la puissance aux services auxiliaires. Les transformateurs de traction sont:

- soit des transformateurs de traction monophasés,
- soit des transformateurs de traction biphasés ou triphasés,
- soit des transformateurs redresseurs mono, tri ou polyphasés ou bien des transformateurs convertisseurs/onduleurs pour systèmes de traction à courant continu ou à courant alternatif,
- soit des autotransformateurs monophasés pour l'alimentation de traction,
- soit des transformateurs survolteurs monophasés,
- soit des transformateurs auxiliaires mono ou triphasés à la tension d'alimentation de traction.

Les transformateurs de traction sont généralement couverts par les normes de la série IEC 60076. Les exigences fournies dans l'IEC 60076 s'appliquent en plus des exigences supplémentaires données dans la présente norme.

Selon la technologie choisie, des parties spécifiques de l'IEC 60076 s'appliquent:

- IEC 60076-1 (transformateurs immergés dans l'huile)
- IEC 60076-11 (transformateurs de type sec)
- IEC 60076-15 (transformateurs à isolation gazeuse)

L'IEC 61378-1 peut être une aide pour les transformateurs alimentant des lignes de contact à travers des convertisseurs statiques, mais la présente norme donne des exigences supplémentaires ou modifiées.

Les transformateurs montés à bord des véhicules de traction sont couverts par l'IEC 60310 et sont exclus du domaine d'application de la présente norme.

La compatibilité électromagnétique (CEM) est réglementée par l'IEC 60076-1 qui stipule qu'un transformateur peut être considéré de ce point de vue comme un élément passif. Certains accessoires sont toutefois soumis aux exigences CEM données dans l'IEC 62236-5.

2 Références normatives

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

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

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

IEC 60076-3:2013, *Transformateurs de puissance – Partie 3: Niveaux d'isolement, essais diélectriques et distances d'isolement dans l'air*

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

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

IEC 60076-11:2004, *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 60076-14:2013, *Transformateurs de puissance – Partie 14: Transformateurs de puissance immergés dans du liquide utilisant des matériaux isolants haute température*

IEC 60076-15:2008, *Transformateurs de puissance – Partie 15: Transformateurs de puissance à isolation gazeuse*

IEC TR 60146-1-2:2011, *Semiconductor converters – General requirements and line commutated converters – Part 1-2: Application guide* (disponible en anglais uniquement)

IEC 60850:2007, *Applications ferroviaires – Tensions d'alimentation des systèmes de traction*

IEC 61000-2-12:2003, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 2-12: Environnement – Niveaux de compatibilité pour les perturbations conduites à basse fréquence et la transmission des signaux sur les réseaux publics d'alimentation moyenne tension*

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

IEC 62497-1:2010, *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 62498-2:2010, *Applications ferroviaires – Conditions d'environnement pour le matériel – Partie 2: Installations électriques fixes*

IEC 62505-1:2009, *Applications ferroviaires – Installations fixes – Exigences particulières pour appareillage à courant alternatif – Partie 1: Disjoncteurs monophasés avec U_m supérieur à 1 kV*

IEC 62589:2010, *Applications ferroviaires – Installations fixes – Harmonisation des valeurs assignées pour les groupes convertisseurs et essais sur les groupes convertisseurs*

IEC 62590:2010, *Applications ferroviaires – Installations fixes – Convertisseurs électroniques de puissance pour sous-stations*

3 Termes, définitions et symboles

3.1 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions donnés dans l'IEC 60076-1 et l'IEC 62590, ainsi que les suivants s'appliquent.

3.1.1

transformateur de traction

transformateur (avec enroulements séparés ou auto-couplés) utilisé dans les installations fixes ferroviaires, qui est connecté directement ou à travers un convertisseur, à une ligne de contact en courant alternatif ou en courant continu

Note 1 à l'article: La définition mentionnée ci-dessus se rapporte au contenu de la présente norme et est introduite pour simplifier les définitions suivantes, qui ne sont pas valables pour l'ensemble des transformateurs et autotransformateurs dans la plupart des cas.

3.1.2

transformateur convertisseur de traction

transformateur de traction situé côté alimentation d'un groupe convertisseur, qui alimente une ou plusieurs lignes de contact à travers un ou plusieurs convertisseurs statiques

3.1.3

transformateur onduleur de traction

transformateur de traction, situé côté traction (ligne de contact) d'un groupe convertisseur, qui est alimenté par un ou plusieurs convertisseurs statiques (onduleurs)

3.1.4

transformateur de traction à couplage direct

transformateur de traction qui alimente une ou plusieurs lignes de contact, sans interposition d'un ou de plusieurs convertisseurs statiques

3.1.5

valeur assignée

valeur numérique des caractéristiques environnementales, électriques, mécaniques et thermiques attribuées aux grandeurs, qui définissent le fonctionnement d'un transformateur de traction dans les conditions spécifiées conformément à la présente Norme internationale et sur lesquelles sont basés les garanties du constructeur et les essais

3.1.6

fréquence assignée

f_N

fréquence à laquelle le transformateur de traction est conçu pour fonctionner

3.1.7

tension assignée côté alimentation d'un transformateur de traction

U_{NL}

valeur efficace de la tension sinusoïdale à vide, destinée à être appliquée aux bornes d'alimentation d'un transformateur de traction (pour les transformateurs convertisseurs de traction)

3.1.8

tension assignée d'un autotransformateur de traction

U_{OHL}

valeur efficace de la tension sinusoïdale à vide entre la ligne aérienne de contact et la ligne d'alimentation dans un autotransformateur de traction

3.1.9**tension intermédiaire assignée d'un autotransformateur de traction** U_{rail}

valeur efficace de la tension sinusoïdale à vide entre la ligne aérienne de contact et la connexion au rail

3.1.10**tension assignée côté(s) convertisseur d'un transformateur convertisseur de traction et côté traction d'un transformateur de traction à couplage direct** U_{NS}

valeur efficace de la tension à vide entre phases côté(s) convertisseur d'un transformateur convertisseur de traction ou côté traction d'un transformateur de traction à couplage direct, à la tension d'alimentation assignée du transformateur de traction

3.1.11**tension assignée côté onduleur d'un transformateur onduleur de traction** U_{NP}

valeur efficace de la tension sinusoïdale à vide résultante aux bornes côté onduleur d'un transformateur de traction

3.1.12**tension assignée côté(s) traction d'un transformateur onduleur** U_{NV}

valeur efficace de la tension à vide entre phases côté(s) traction d'un transformateur onduleur, le côté onduleur étant à la tension assignée

3.1.13**puissance assignée d'un enroulement** $S_{\text{NL}}, S_{\text{NP}}, S_{\text{NSn}}, S_{\text{NV}}$

valeur conventionnelle de la puissance apparente assignée à un enroulement, qui, avec la tension assignée de l'enroulement, détermine son courant assigné. Elle est basée sur les composantes fondamentales de la tension et du courant (voir 3.1.7, 3.1.10, 3.1.12 et 3.1.14)

Note 1 à l'article: Les termes «primaire» et «secondaire» se réfèrent au sens normal de l'énergie depuis l'alimentation à la traction.

Note 2 à l'article: Le «n» du suffixe S_n est le numéro d'ordre attribué à l'enroulement secondaire. Dans une formule où l'on considère séparément n'importe quel enroulement, S_N indique la puissance assignée de l'enroulement considéré.

3.1.14**courant assigné côté primaire d'un transformateur de traction** $I_{\text{NL}}, I_{\text{NP}}$

valeur efficace de la composante fondamentale du courant traversant une borne de ligne de l'enroulement primaire, qui est dérivée de la puissance assignée S_N et de la tension assignée U_N de l'enroulement

Note 1 à l'article: I désigne la valeur efficace générique de la composante fondamentale d'un courant alternatif et I_N le courant générique assigné.

3.1.15**courant assigné dans l'enroulement série d'un autotransformateur de traction** I_{OHL}

valeur efficace du courant circulant entre la borne de ligne de contact d'un autotransformateur de traction et la borne du rail

3.1.16**courant assigné dans l'enroulement commun d'un autotransformateur de traction** I_{feed}

valeur efficace du courant circulant entre la borne de ligne d'alimentation d'un autotransformateur de traction et le rail

3.1.17

courant de service assigné côté primaire d'un transformateur convertisseur de traction

I_{NGL}

valeur efficace du courant traversant une borne de ligne de l'enroulement côté alimentation d'un transformateur convertisseur de traction, qui contient toutes les composantes harmoniques et dont la composante fondamentale est le courant assigné I_{NL}

Note 1 à l'article: Dans le cas de transformateurs onduleurs de traction, il est supposé que le courant de service n'est pas sensiblement différent du courant sinusoïdal dans tous les enroulements.

Note 2 à l'article: I_G désigne la valeur efficace générique du courant de service.

Note 3 à l'article: I_h désigne la valeur efficace générique du courant harmonique d'ordre h d'un courant alternatif.

Note 4 à l'article: Dans les formules où l'on considère séparément n'importe quel enroulement, I_N désigne le courant assigné de l'enroulement considéré et I_{NG} son courant de service assigné.

3.1.18

courant assigné côté secondaire d'un transformateur de traction

I_{NS}, I_{NV}

valeur efficace de la composante fondamentale du courant circulant aux bornes des enroulements secondaires d'un transformateur de traction, qui est dérivée de la puissance assignée S_N et de la tension assignée U_N de l'enroulement

Note 1 à l'article: Lorsqu'un transformateur convertisseur possède plusieurs enroulements secondaires, même si les secondaires sont destinés à alimenter un seul pont de conversion, il est admis que le courant secondaire assigné de chaque enroulement diffère légèrement de celui des autres enroulements. Dans tous les cas, il convient de respecter les tolérances.

Note 2 à l'article: Dans certains cas, le ou les courants secondaires d'un transformateur convertisseur de traction ne sont pas égaux au courant d'entrée du convertisseur du fait de la présence d'un transformateur auxiliaire (voir Article 3 de l'IEC 62589:2010).

3.1.19

courant de service assigné côté convertisseur (valve) d'un transformateur convertisseur de traction

I_{NGSn}

valeur efficace du courant circulant aux bornes des enroulements secondaires d'un transformateur convertisseur de traction, qui contient toutes les composantes harmoniques et dont la composante fondamentale est le courant assigné I_{NS}

Note 1 à l'article: La valeur I_{NGS} diffère de la valeur I_{NS} . Cette dernière est prise en compte pour la détermination de la capacité de charge des accessoires donnés comme les traversées isolantes. Les calculs des pertes et des échauffements sont basés sur le courant de service assigné, en considérant également le fait que les harmoniques produisent des pertes par courants de Foucault supplémentaires dans les enroulements et les parties structurales.

Note 2 à l'article: Dans certains cas, le ou les courants secondaires d'un transformateur convertisseur de traction ne sont pas égaux au courant d'entrée du convertisseur du fait de la présence d'un transformateur auxiliaire (voir Article 3 de l'IEC 62589:2010).

Note 3 à l'article: Dans une formule où l'on considère séparément n'importe quel enroulement, I_N désigne le courant assigné de l'enroulement considéré et I_{NG} son courant de service assigné.

3.1.20

courant de base

$I_{BL}, I_{BP}, I_{BS}, I_{BV}, I_{BGL}, I_{BGS}$

valeur du courant dans un enroulement qui, selon une classe de service donnée (voir 3.1.31), est supposée durer pendant de plus longues périodes et représente la charge permanente transitée par le transformateur de traction et sur laquelle on impose les surcharges

3.1.21**courant de base côté primaire d'un transformateur de traction** **I_{BL}, I_{BP}**

valeur efficace de la composante fondamentale du courant traversant une borne de ligne de l'enroulement primaire, qui est dérivée de la puissance de base S_B et de la tension assignée U_N de l'enroulement

3.1.22**courant de service de base côté primaire d'un transformateur convertisseur de traction** **I_{BGL}**

valeur efficace du courant traversant une borne de ligne de l'enroulement côté alimentation d'un transformateur convertisseur de traction, qui contient toutes les composantes harmoniques et dont la composante fondamentale est le courant de base I_{BL}

3.1.23**courant de base côté secondaire d'un transformateur de traction** **I_{BS}, I_{BV}**

valeur efficace de la composante fondamentale du courant circulant aux bornes des enroulements secondaires d'un transformateur de traction, qui est dérivée de la puissance de base S_B et de la tension assignée U_N de l'enroulement

3.1.24**courant de service de base côté convertisseur (valve) d'un transformateur convertisseur de traction** **I_{BGSn}**

valeur efficace du courant circulant aux bornes des enroulements secondaires d'un transformateur convertisseur de traction, qui contient toutes les composantes harmoniques et dont la composante fondamentale est le courant de base I_{BS}

3.1.25**réactance de fuite de l'enroulement primaire** **X_p**

<dans le cas d'un transformateur à trois enroulements> différence entre la moyenne des valeurs des réactances de court-circuit mesurées entre l'enroulement primaire et chaque enroulement secondaire et la moitié de la réactance de court-circuit mesurée entre les deux enroulements secondaires

$$X_p = \frac{X_{ccP/S1} + X_{ccP/S2}}{2} - \frac{X_{ccS1/S2}}{2}$$

3.1.26**réactance de fuite de chacun des enroulements secondaires** **X_{S1}, X_{S2}**

<dans le cas d'un transformateur à trois enroulements> somme de la moitié de la différence de la réactance de court-circuit mesurée entre l'enroulement primaire et chaque enroulement secondaire et la moitié de la réactance de court-circuit mesurée entre les deux enroulements secondaires

$$X_{S1} = \frac{X_{ccP/S1} - X_{ccP/S2}}{2} + \frac{X_{ccS1/S2}}{2}$$

$$X_{S2} = \frac{X_{ccP/S2} - X_{ccP/S1}}{2} + \frac{X_{ccS1/S2}}{2}$$

3.1.27**rapport de réactance
facteur de couplage** **K**

rapport entre la réactance de fuite du côté primaire et la somme de la réactance de fuite des côtés primaire et secondaire

Note 1 à l'article: Dans le cas d'un transformateur de traction à deux enroulements secondaires utilisé pour un convertisseur à 12 impulsions, le rapport de réactance est conçu pour avoir les mêmes tensions secondaires à vide et la même impédance entre l'enroulement primaire et chaque enroulement secondaire afin d'obtenir une répartition égale du courant sur les deux ponts au cas où les sorties en courant continu sont couplées en parallèle. Alors $X_{S1} = X_{S2} = X_S$ et

$$K = X_p / (X_S + X_p)$$

3.1.28**demande de courant**

variation réelle ou prévue de la charge du courant absorbé par une ligne de traction dont la valeur efficace est le courant assigné. Elle est exprimée par un diagramme de charge

3.1.29**diagramme de charge**

demande réelle de courant par le circuit de traction dans la pire des conditions prévues

3.1.30**cycle de charge**

représentation conventionnelle de la demande de courant à un transformateur de traction exprimée en valeur réduite des courants assignés. Elle représente la variation répétitive des charges dans le temps et par conséquent les surcharges et sous-charges susceptibles d'être supportées par le transformateur de traction, de même que la durée et les intervalles supposés

Note 1 à l'article: Les cycles de charge et les classes de service sont prévus pour permettre les essais des transformateurs de traction.

3.1.31**classe de service**

classification conventionnelle du courant admissible d'un transformateur de traction exprimée en valeur réduite des courants de base I_B .

Note 1 à l'article: Les classes de service, associées aux autres valeurs assignées, définissent les caractéristiques d'un transformateur de traction.

Note 2 à l'article: L'Annexe A indique les classes de service préférentielles, ainsi que les valeurs de base et assignées correspondantes.

Note 3 à l'article: L'indication d'une classe de service n'est pas obligatoire.

3.1.32**surcharge de longue durée**

valeur crête de la charge dans le cycle de charge de durée comprise entre 480 s et 7 200 s

3.1.33**surcharge de courte durée**

valeur crête de la charge dans le cycle de charge de durée inférieure ou égale à 480 s

3.1.34**enroulement supplémentaire**

enroulement exigé pour le raccordement d'appareils auxiliaires tels que des filtres d'harmoniques

3.2 Symboles

Voir également la Figure 1 de l'IEC 62589:2010.

f_N	fréquence assignée
I_B	courant de base
I_{BL}	courant de base côté alimentation d'un transformateur convertisseur de traction
I_{BP}	courant de base côté alimentation d'un transformateur onduleur de traction
I_{BS}	courant de base côté secondaire d'un transformateur convertisseur de traction
I_{BGL}	courant de service de base côté primaire d'un transformateur convertisseur de traction
I_{BGS}	courant de service de base côté convertisseur (valve) d'un transformateur convertisseur de traction
I_{BGSn}	courant de service de base côté convertisseur (valve) d'un transformateur convertisseur de traction
I_{BV}	courant de base côté secondaire d'un transformateur onduleur de traction
I_{feed}	courant assigné dans l'enroulement commun d'un autotransformateur de traction
I_G	valeur efficace générique du courant de service
I_h	valeur efficace générique du courant harmonique
I_{NG}	valeur efficace du courant de service assigné
I_{NGL}	courant de service assigné côté primaire d'un transformateur convertisseur de traction
I_{NGSn}	courant de service assigné côté convertisseur (valve) d'un transformateur convertisseur de traction
I_{NL}	courant assigné côté alimentation d'un transformateur convertisseur de traction
I_{NP}	courant assigné côté alimentation d'un transformateur onduleur de traction
I_{NS}	courant assigné côté secondaire d'un transformateur convertisseur de traction
I_{NV}	courant assigné côté secondaire d'un transformateur onduleur de traction
I_{OHL}	courant assigné dans l'enroulement série d'un autotransformateur de traction
K	facteur de couplage
q	niveau continu de charges apparentes
S_{NL}	puissance assignée de l'enroulement côté alimentation d'un transformateur de traction
S_{NP}	puissance assignée de l'enroulement côté onduleur d'un transformateur onduleur de traction
S_{NSn}	puissance assignée des enroulements côté convertisseur d'un transformateur convertisseur de traction et de l'enroulement côté traction d'un transformateur de traction à couplage direct
S_{NV}	puissance assignée des enroulements côté traction d'un transformateur onduleur
U_m	tension la plus élevée pour l'équipement
U_{NL}	tension assignée côté alimentation d'un transformateur de traction
U_{NP}	tension assignée côté onduleur d'un transformateur onduleur de traction
U_{NS}	tension assignée côté(s) convertisseur d'un transformateur convertisseur de traction et côté traction d'un transformateur de traction à couplage direct
U_{NV}	tension assignée côté(s) traction d'un transformateur onduleur
U_{OHL}	tension assignée d'un autotransformateur de traction
U_{rail}	tension intermédiaire assignée d'un autotransformateur de traction

X_p	réactance de fuite de l'enroulement primaire (dans le cas d'un transformateur à trois enroulements)
X_S	valeur moyenne des réactances de fuite de chacun des enroulements secondaires (dans le cas d'un transformateur à trois enroulements)
$X_{S1} X_{S2}$	réactance de fuite de chacun des enroulements secondaires (dans le cas d'un transformateur à trois enroulements)
X_{ccPS1}	réactance de court-circuit mesurée entre l'enroulement primaire et l'enroulement secondaire 1 (dans le cas d'un transformateur à trois enroulements)
X_{ccPS2}	réactance de court-circuit mesurée entre l'enroulement primaire et l'enroulement secondaire 2 (dans le cas d'un transformateur à trois enroulements)

4 Conditions de service

Selon le type de transformateur, les conditions normales de service indiquées dans la partie applicable de l'IEC 60076 s'appliquent. Au cas où la température ambiante annuelle moyenne est considérée inférieure ou égale à + 10 °C et que la température ambiante journalière maximale est considérée égale à + 30 °C, il est néanmoins permis d'augmenter les limites d'échauffement de 10 K. La température ambiante doit être alors indiquée sur la plaque signalétique. Pour les autres exigences, l'IEC 62498-2 s'applique.

En ce qui concerne les conditions de service électriques, les plages de fonctionnement suivantes doivent être prises en compte:

- variation de tension en fonctionnement normal (régime établi): $\pm 10 \%$;
- variation de tension ne devant pas occasionner d'effets nuisibles: $\pm 15 \%$; (courte durée: 0,5 cycle à 30 cycles)
- variations de fréquence en fonctionnement normal: $\pm 1 \%$.

Pour les transformateurs de sous-station à couplage direct, les plages de tension selon l'IEC 60850 ne sont pas appropriées puisque dans les systèmes de ligne de contact à courant alternatif, les valeurs minimale et maximale de la tension de ligne de contact s'appliquent seulement aux extrémités éloignées des sections d'alimentation.

5 Exigences générales pour un transformateur de traction

5.1 Chargement

5.1.1 Généralités

Le transformateur de traction est soumis à des variations de charge importantes et rapides en amplitude et en durée.

Par conséquent, l'acheteur doit dans tous les cas déterminer le diagramme de charge prévu avant de publier l'appel d'offres concernant le transformateur de traction.

NOTE Selon les variations pendant un cycle journalier de charge, la valeur quadratique moyenne de la demande de charge la plus sévère pendant une période raisonnable est calculée. La charge est donnée comme la puissance apparente ou comme une valeur de courant à une tension fixée.

Les effets thermiques sur le transformateur consécutifs aux charges élevées sont compensés par les charges faibles.

L'utilisation d'un diagramme de charge n'est pas réalisable pour les essais. C'est pourquoi on détermine un cycle conventionnel de charge, équivalent au diagramme de charge. La valeur

quadratique moyenne du diagramme de charge et le cycle de charge sont conçus pour être identiques aux effets des surcharges et sous-charges.

La représentation de la variation de charge peut être exprimée, soit comme une classe de service, soit comme un cycle de charge. Il est préférable que cette représentation conventionnelle de la charge corresponde basiquement à une classe de service normalisée.

L'Annexe A montre quelques classes de service conventionnelles préférentielles. Cependant, au cas où l'acheteur n'est pas à même d'accepter une des classes de service préférentielles données dans le Tableau A.1, il est permis de formuler son propre cycle de charge.

A moins qu'une classe de service ne soit spécifiée, l'acheteur doit spécifier la valeur des surcharges de longue durée, leur durée ainsi que l'intervalle entre les crêtes successives de ce type. L'Annexe A donne l'intervalle de temps conventionnel supposé.

A moins qu'une classe de service ne soit spécifiée, l'acheteur doit spécifier la valeur des surcharges de courte durée ainsi que leur durée. Comme le spécifie la classe de service, elles peuvent survenir lorsque le transformateur de traction se trouve soit dans une condition de charge, soit à sa charge de base. La durée entre deux pointes de courte durée doit être d'au moins 1 500 s. Il est permis à l'acheteur d'exiger des intervalles plus courts, mais en l'absence d'intervalle suffisant entre deux surcharges, on doit considérer que la durée de la charge est égale à la somme des surcharges adjacentes et le constructeur doit en tenir compte.

Il est donc essentiel que les courants et la puissance assignés soient considérés avec la classe de service ou le cycle de charge spécifié; étant entendu que les courants assignés ne représentent que la valeur quadratique moyenne des courants circulant dans les enroulements afin d'évaluer une valeur permettant de déterminer les autres valeurs assignées et de calculer la durée de vie du transformateur de traction.

Les transformateurs relevant de la présente norme sont normalement dimensionnés à partir de la classe de service ou du cycle de charge spécifié par l'acheteur.

Au cas où l'acheteur est à même de tenir compte de tous les phénomènes relatifs aux surcharges prévues, il peut également spécifier les caractéristiques assignées du transformateur de traction, sans faire de quelconque référence au cycle de charge prévu.

Dans les transformateurs convertisseurs de traction avec le convertisseur couplé selon le montage n° 9, la puissance des enroulements côté convertisseur est augmentée en tenant compte de la répartition du courant entre les deux courants secondaires (voir 6.7.3 de l'IEC 62590:2010).

En outre, S_{NL} ou S_{NP} peut différer de $\sum_1^n S_{NSn}$ (en particulier en cas d'enroulements auxiliaires) parce qu'il convient que la somme vectorielle tienne compte du $\cos \varphi_n$ des courants secondaires concernés.

En cas d'enroulements à prises, les valeurs assignées se réfèrent à la prise principale.

5.1.2 Courant assigné

Concernant le courant assigné du transformateur de traction, la valeur choisie et spécifiée ne doit pas être inférieure à la valeur quadratique moyenne de la composante fondamentale du courant de charge I pendant le cycle de charge:

$$I_N = \sqrt{\frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} I^2(t) dt}$$

où

I_N est le courant dans l'enroulement = I_{NP} , I_{NL} , I_{NS} ou I_{NV} ,

Δt est la durée du cycle de charge,

t_0 est le temps initial.

Sauf accord particulier entre l'acheteur et le fournisseur, on doit noter que la conception d'un transformateur de traction ne peut pas être seulement basée sur les caractéristiques assignées mentionnées ci-dessus (voir 5.1.1).

5.1.3 Courant assigné des accessoires

Si des accessoires sont présents (traversées isolantes, transformateurs de courant, connexions, changeurs de prises), ils doivent être conformes au courant assigné, aux exigences de surcharge ainsi qu'à la contribution harmonique éventuellement spécifiés.

5.2 Vérification de la capacité du transformateur à supporter le cycle de charge stipulé

5.2.1 Généralités

L'essai d'échauffement doit être exécuté conformément à l'IEC 60076-2, l'IEC 60076-11 ou l'IEC 60076-15 selon le cas.

La détermination des échauffements doit être fondée sur le courant de service assigné (la relation approximative entre le courant assigné et le courant de service assigné est donnée dans le Tableau C.3).

Selon la fréquence et le caractère prévus concernant les surcharges, les échauffements résultant des surcharges de longue durée doivent se situer dans les limites d'échauffement indiquées dans la partie applicable de l'IEC 60076 pour l'altitude et les conditions ambiantes stipulées.

Il est permis que l'échauffement des enroulements après des surcharges de courte durée dépasse de 15 K les limites d'échauffement applicables selon la partie concernée de l'IEC 60076.

Dans le cas de transformateurs utilisant un isolant pour température élevée, l'IEC 60076-14 peut être utilisée comme guide et des températures supérieures peuvent être convenues entre l'acheteur et le fournisseur.

Lors de la détermination des échauffements, il convient de considérer l'effet des harmoniques comme indiqué en 5.2.2, en 5.2.3 et en 5.2.4.

5.2.2 Mesures des échauffements des transformateurs immergés dans un liquide

La procédure donnée en 7.3.2 de l'IEC 60076-2:2011 doit être appliquée, en plus des exceptions mentionnées ci-dessous. La classe de service ou le cycle de charge spécifié doit être pris en compte. Dans le cas de transformateurs conçus selon une classe de service, les cycles d'essai recommandés pour les essais d'échauffement sont donnés à l'Annexe A.

Le courant occasionnant les pertes totales doit être injecté dans le transformateur en court-circuit. Dans le cas d'un transformateur convertisseur de traction, les pertes totales sont normalement égales à la somme de la perte à vide et des pertes en charge totales déterminées selon l'Annexe C.

Les pertes totales calculées avec le courant de service à la charge de base (I_{BGL}) sont injectées jusqu'à ce que les conditions de température en régime établi soient atteintes, après quoi le courant de surcharge de longue durée est injecté pendant la durée spécifiée pour ladite

surcharge d'après la classe de service ou le cycle de charge donné. L'échauffement final à la surface de l'huile doit être enregistré.

Pour déterminer les échauffements des enroulements, on doit appliquer au transformateur dans un premier temps des courants de service représentant la charge de base (y compris l'effet des harmoniques) pendant le temps nécessaire pour que les enroulements atteignent des températures stabilisées puis, pendant leurs durées respectives, les courants de service correspondant aux surcharges de longue durée, et enfin, si cela est réalisable et après accord entre l'acheteur et le fournisseur, les courants de service correspondant aux surcharges de courte durée.

Les mesures doivent être faites à la fin de la période des surcharges de longue durée et, si possible, à la fin de la période des surcharges de courte durée. Lorsqu'il n'est pas possible de procéder à des mesures réelles, on peut convenir de calculer les variations de température sur toute la période des charges de courte durée selon les méthodes conventionnelles.

L'IEC 60076-7 fournit les directives pour effectuer ce calcul.

5.2.3 Mesure d'échauffement des transformateurs de type sec

Les exigences données dans l'Article 23 de l'IEC 60076-11:2004 s'appliquent en tenant compte que, dans la deuxième partie de l'essai, les pertes imputables aux différentes étapes de la demande de courant doivent être calculées et appliquées successivement, ainsi que les surcharges pendant leurs durées respectives. L'Annexe C permet de déterminer les pertes en charge totales.

Les mesures doivent être faites à la fin de la période des surcharges de longue durée et, si possible, à la fin de la période des surcharges de courte durée. Dans le cas de transformateurs conçus selon une classe de service, les cycles d'essai recommandés pour les essais d'échauffement sont donnés à l'Annexe A.

Lorsqu'il n'est pas possible de procéder à des mesures réelles, on peut convenir de calculer les variations de température sur toute la période des charges de courte durée selon les méthodes conventionnelles.

L'IEC 60076-12 fournit les directives pour effectuer ce calcul.

5.2.4 Autres critères pour la détermination des limites d'échauffement

Après accord entre l'acheteur et le constructeur, les limites de température et le vieillissement thermique selon l'IEC 60076-7, l'IEC 60076-12 ou l'IEC 60076-14 peuvent être appliqués.

Si l'acheteur est capable d'étendre la définition du cycle de charge au moyen d'une demande de courant, la capacité du transformateur à supporter cette demande de courant doit être vérifiée de la manière suivante:

- les mesures d'échauffement et de perte doivent être effectuées à la charge sinusoïdale avec le courant de service assigné I_{NGL} ;
- la température de surface de l'huile, la température des points chauds des enroulements et la perte relative de durée de vie pour la demande de courant donnée doivent être calculées à partir des résultats de ces mesures. Il est permis d'utiliser la procédure de calcul de la perte de durée de vie de l'IEC 60076-7;
- les températures au début du cycle de charge doivent être égales à celles à la fin du cycle de charge pour considérer une condition de régime établi;
- la perte relative de durée de vie calculée pour le cycle de charge selon la température annuelle moyenne doit être inférieure ou égale à 1;
- pour les transformateurs immergés dans l'huile conventionnels, la température maximale des points chauds occasionnels doit être inférieure à 140 °C et la température maximale à

la surface de l'huile doit être inférieure à 115 °C pendant le cycle de charge; des limites supérieures peuvent être convenues en présence d'isolants pour température élevée;

- l'influence des harmoniques doit être envisagée comme décrit dans l'Annexe C.

Dans le cas de transformateurs conçus selon une classe de service, les cycles d'essai recommandés pour les essais d'échauffement sont donnés à l'Annexe A.

5.3 Transfert des surtensions

Les dispositions de ce paragraphe peuvent être normalement omises dans les transformateurs alimentant des lignes de contact à courant alternatif, notamment si l'une des bornes BT est connectée au circuit de retour.

On doit veiller à ne pas transmettre de tensions de choc inadmissibles entre les enroulements primaires et secondaires – et inversement.

Le constructeur doit soit démontrer, s'il le faut par le biais d'un essai de type avec le générateur de chocs répétitifs à basse tension ou au moyen d'un appareil à haute impédance (par ex: sonde d'oscilloscope), que ce phénomène est négligeable, soit s'accorder avec l'acheteur sur les mesures prises pour minimiser le transfert des surtensions.

Pour les transformateurs alimentant des convertisseurs à semi-conducteurs, cette protection peut être réalisée soit par le biais d'un niveau d'isolement supérieur vis-à-vis des surtensions prévues, soit au moyen d'écrans appropriés. Il est recommandé d'employer la dernière solution lorsque la démonstration au titre de l'alinéa ci-dessus n'est pas possible. Dans certains cas, il convient de considérer que les surtensions peuvent également être réduites par des condensateurs connectés aux bornes BT.

5.4 Contraintes dues aux courts-circuits

5.4.1 Généralités

Les transformateurs de traction sont soumis à des courts-circuits et des chocs électriques fréquents. L'acheteur doit indiquer la puissance apparente de court-circuit de la ligne d'alimentation du transformateur (à défaut d'une telle indication, les exigences de l'IEC 60076-5 s'appliquent). L'acheteur doit également avertir le constructeur de la procédure de réenclenchement utilisée.

Le constructeur doit prêter une attention particulière à ces aspects dans la conception mécanique des transformateurs de traction.

Des calculs convenus ou la procédure d'essai indiquée dans l'IEC 60076-5 (essai spécial) peuvent démontrer l'aptitude du transformateur à supporter de telles contraintes. L'acheteur et le fournisseur peuvent convenir d'un essai de type court-circuit au stade de la commande.

5.4.2 Tenue au court-circuit (si applicable)

Les transformateurs de traction doivent être adaptés à l'essai de court-circuit réalisé sur le site d'installation et/ou dans un laboratoire d'essai.

Pour les transformateurs convertisseurs de traction, il convient de combiner l'essai de court-circuit avec l'essai du transformateur convertisseur. La procédure de cet essai est donnée en 7.7 de l'IEC 62589:2010.

Pour les transformateurs de traction à couplage direct, il est permis de convenir de la procédure suivante.

Le transformateur doit être alimenté à la tension assignée avec une forme d'onde conforme à l'IEC 61000-2-12. Si un changeur de prises est présent, il doit être placé sur la prise principale.

La surexcitation du transformateur pour assurer le courant total de court-circuit n'est pas admise dans ce cas.

La réactance du transformateur avant l'essai doit être enregistrée. Le court-circuit doit être appliqué côté basse tension au moyen d'un appareil de court-circuit approprié, assurant si possible un court-circuit asymétrique, et doit être éliminé par le disjoncteur du secondaire. D'autres montages d'essai tels qu'un enroulement déjà en court-circuit peuvent être exigés. L'essai de court-circuit peut également être exécuté en mettant le côté haute tension en court-circuit.

Au cas où un système de refermeture automatique est adopté pour ledit disjoncteur, un nombre de séquences (jusqu'à deux) de manœuvres d'ouverture et de fermeture conformément aux exigences de l'IEC 62505-1 doit faire l'objet d'un accord au stade de l'offre. Les séquences de courts-circuits doivent être exécutées à un intervalle de 900 s.

La forme d'onde doit être exempte de distorsion pendant la coupure dans la mesure du possible. Pour cette raison, on doit éviter d'utiliser des disjoncteurs engendrant des harmoniques au-delà des limites données au quatrième alinéa de 5.4.2.

La tension et le courant côtés primaire et secondaire doivent être enregistrés à l'oscilloscope.

On doit normalement mesurer les valeurs suivantes:

- la tension et le courant pendant le défaut;
- l'impédance au moins avant l'essai, immédiatement après la première séquence de court-circuit, immédiatement après la deuxième séquence et une heure après la première mesure.

Pour considérer que l'objet d'essai a passé l'essai avec succès, l'impédance mesurée après la deuxième séquence ne doit pas différer de plus de 3 % de l'impédance mesurée avant les essais.

5.5 Caractéristiques d'isolement et valeurs d'essai

L'Annexe B donne les niveaux d'isolement et les valeurs d'essai (correspondant à la tension la plus élevée pour l'équipement U_m selon l'IEC 60076-3) à respecter pour la conception de l'isolement.

Ces valeurs sont issues de l'IEC 60076-3 pour les tensions au-dessus de 52 kV et de l'IEC 62497-1 pour les tensions de traction.

Pour les tensions non abordées dans l'Annexe B, il est permis de prendre les valeurs applicables fournies dans le Tableau 2 ou le Tableau 3 de l'IEC 60076-3:2013.

Pour les distances d'isolement dans l'air et les lignes de fuite, se reporter à l'IEC 62497-1 (tensions jusqu'à 52 kV) ou à l'IEC 60076-3 (tensions au-dessus de 52 kV).

5.6 Autres caractéristiques particulières

Des transformateurs de traction peuvent être exigés avec un troisième enroulement ou un enroulement supplémentaire, pouvant être destinés à l'alimentation de services auxiliaires. Dans de tels cas, le transfert des surtensions et les contraintes dues aux courts-circuits doivent faire l'objet d'une étude approfondie lors de la conception dudit enroulement.

La décision de prévoir des accessoires et fonctions spécifiques est laissée aux parties et n'est pas traitée dans cette norme.

5.7 Exigences pour l'essai de simulation

Si l'acheteur l'exige et le spécifie expressément lors de la consultation, le fournisseur doit communiquer dans le cadre de l'évaluation et des travaux de simulation les informations mentionnées à l'Article D.2 concernant les caractéristiques magnétiques du transformateur de traction.

5.8 Plaque signalétique

Les exigences de l'IEC 60076-1 (informations à communiquer dans tous les cas) et de l'IEC 60076-11 s'appliquent.

De plus, les informations suivantes doivent être données:

- a) le type de transformateur:
 - transformateur convertisseur de traction;
 - transformateur onduleur de traction;
 - transformateur de traction à couplage direct;
 - autotransformateur de traction;
 - transformateur auxiliaire de traction;
- b) la référence à la présente norme;
- c) la ou les classes de service référencées à l'Annexe A de la présente norme;
- d) la méthode de refroidissement;
- e) la classe de l'isolant utilisé;
- f) les niveaux d'isolement des enroulements référencés à l'Annexe B de la présente norme;
- g) les dispositions éventuelles contre le transfert des surtensions;
- h) le courant à vide;
- i) le courant d'appel (crête et constante de temps);
- j) les facteurs de puissance de court-circuit;
- k) l'utilisation à l'intérieur/extérieur;
- l) les conditions de service différant des conditions normales (par ex: température ambiante inférieure);
- m) les caractéristiques de puissance auxiliaires;
- n) le schéma du couplage avec l'identification des bornes (un exemple typique est représenté à la Figure 1).

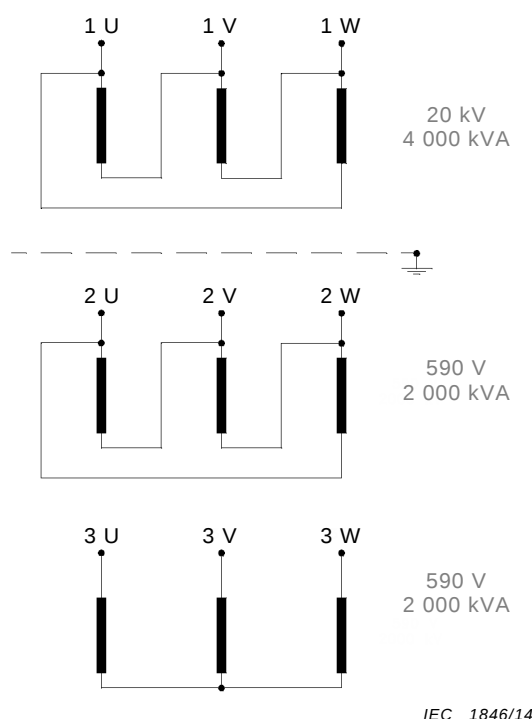


Figure 1 – Exemple de schéma du couplage Dd0y11 avec écran à la terre

6 Transformateur de traction à couplage direct

6.1 Généralités

Cet article aborde certaines procédures d'essai spécifiques concernant les transformateurs de traction monophasés dont les deux bornes d'alimentation sont raccordées aux deux conducteurs de ligne d'un réseau monophasé ou triphasé et non mis à la terre.

Les transformateurs à deux enroulements côté traction, comportant chacun une borne reliée à la ligne de contact ou à la ligne d'alimentation et l'autre normalement reliée aux rails de roulement (dans ce cas, la BT est désignée par $2 \times U_{ph}$), sont considérés pour le niveau de tension U_m correspondant à U_{ph} si le rail est à la terre.

6.2 Essais diélectriques pour enroulements avec $U_m < 300$ kV

6.2.1 Généralités

Ce paragraphe s'applique aux transformateurs décrits en 6.1 avec un niveau de tension $U_m < 300$ kV (voir Article 7 de l'IEC 60076-3:2013).

6.2.2 Essai de tension appliquée (essai individuel)

Chaque enroulement doit être soumis à un essai de tension appliquée conformément à l'Article 10 de l'IEC 60076-3:2013, mais selon les valeurs d'isolement données à l'Annexe B.

6.2.3 Essai au choc de foudre (essai de type)

Chaque borne de ligne (les deux extrémités de chaque enroulement) doit être soumise à un essai au choc de foudre conformément à l'Article 13 de l'IEC 60076-3:2013, mais selon les valeurs d'isolement données à l'Annexe B. Dans le cas d'un enroulement à prises et sauf accord contraire entre l'acheteur et le constructeur, l'essai doit être exécuté sur la prise principale.

Après accord entre l'acheteur et le constructeur, l'essai au choc de foudre est exécuté entre les deux bornes de ligne reliées ensemble alors que les autres enroulements, le noyau et la cuve sont connectés à la terre.

6.2.4 Essai de tenue aux surtensions induites (essai individuel)

La tension d'essai sur les enroulements doit être deux fois égale à la tension entre phases assignée.

Si la tension d'essai dépasse dans l'enroulement HT la valeur prescrite pour l'essai de tension appliquée, la tension par rapport à la terre des bornes peut être limitée par l'utilisation d'appareils appropriés connectés entre les bornes et la terre.

Dans le cas d'un enroulement à prises et sauf accord contraire entre l'acheteur et le constructeur, l'essai doit être exécuté sur la prise principale.

Pour les autres modalités d'essai, se reporter à l'Article 11 de l'IEC 60076-3:2013.

NOTE Pour un enroulement triphasé connecté en étoile à une tension entre phases $U_m = 245$ kV, l'enroulement est à une tension de 142 kV. Dans tous les cas, la tension d'essai ne dépasse pas 395 kV; le rapport entre ces tensions est de 2,78. Pour les transformateurs monophasés connectés entre deux bornes de ligne, une tension $U_m = 245$ kV est en fait présente sur l'enroulement. Une tension d'essai de 490 kV est ici prescrite afin d'obtenir un rapport d'essai minimal de 2. Par contre, le rapport d'essai serait seulement de 1,61 selon l'IEC 60076-3.

6.3 Essais diélectriques pour enroulements avec $U_m \geq 300$ kV

6.3.1 Généralités

Ce paragraphe s'applique aux transformateurs décrits en 3.1 avec un niveau de tension $U_m \geq 300$ kV (voir Article 7 de l'IEC 60076-3:2013).

Après accord entre l'acheteur et le constructeur, 6.3 peut être appliqué aux transformateurs avec un niveau de tension $U_n \geq 200$ kV.

6.3.2 Essai de tension appliquée (essai individuel)

Chaque enroulement doit être soumis à un essai de tension appliquée conformément à l'IEC 60076-3:2013.

6.3.3 Essai au choc de foudre (essai individuel)

Chaque borne de ligne (les deux extrémités de chaque enroulement) doit être soumise à un essai au choc de foudre conformément à l'Annexe B et à l'Article 13 de l'IEC 60076-3:2013.

Dans le cas d'un enroulement à prises et sauf accord contraire entre l'acheteur et le constructeur, l'essai doit être exécuté sur la prise principale.

6.3.4 Essai au choc de manœuvre (essai individuel)

Chaque borne de ligne (les deux extrémités de chaque enroulement) doit être soumise à un essai au choc de manœuvre conformément à l'Article 14 de l'IEC 60076-3:2013. Dans le cas d'un enroulement à prises et sauf accord contraire entre l'acheteur et le constructeur, l'essai doit être exécuté sur la prise principale. En cas d'utilisation de disjoncteurs pouvant générer des chocs de manœuvre, l'acheteur peut exiger de soumettre les enroulements des transformateurs à essai avec des tensions ≤ 300 kV U_m .

6.3.5 Essai de tenue aux surtensions induites (essai individuel)

Les tensions d'essai sur les enroulements doivent être les suivantes:

- $U_1 = 1,7 \times U_m$ pour $U_m < 200 \text{ kV}$
 $2,0 \times U_m$ pour $200 \text{ kV} \leq U_m < 300 \text{ kV}$
- $U_2 = 1,3 \times U_m$ avec une valeur spécifiée de $q = 100 \text{ pC}$.

Si la tension d'essai dépasse dans l'enroulement HT la valeur prescrite pour l'essai de tension appliquée, la tension par rapport à la terre des bornes peut être limitée par l'utilisation d'appareils appropriés connectés entre les bornes et la terre.

Dans le cas d'un enroulement à prises et sauf accord contraire entre l'acheteur et le constructeur, l'essai doit être exécuté sur la prise principale.

Pour les autres modalités d'essai, se reporter à l'Article 11 de l'IEC 60076-3:2013.

7 Transformateur convertisseur de traction

7.1 Généralités

La série IEC 61378 définit les exigences pour les transformateurs convertisseurs à usage industriel. Cet article spécifie des exigences supplémentaires pour les transformateurs redresseurs de traction les plus fréquemment utilisés dans les sous-stations comportant des redresseurs à diodes à semi-conducteurs. Les transformateurs convertisseurs de traction pour convertisseurs commandés nécessitent une attention complémentaire et doivent faire l'objet d'un accord particulier entre l'acheteur et le fournisseur.

Les transformateurs pour montages en pont triphasés à 6 impulsions comportent un enroulement primaire et un enroulement secondaire.

Les transformateurs pour montages redresseurs à 12 impulsions comportent un ou deux enroulements primaires et deux enroulements secondaires avec un angle de déphasage de 30° entre les enroulements secondaires. Un enroulement secondaire est généralement connecté en étoile et l'autre en triangle. Trois types de transformateurs redresseurs sont préférentiellement utilisés pour les groupes redresseurs de traction à 12 impulsions:

- a) les transformateurs à trois enroulements comportant un enroulement primaire et deux enroulements secondaires étroitement couplés: facteur de couplage $K \geq 0,9$;
- b) les transformateurs à trois enroulements comportant un enroulement primaire et deux enroulements secondaires faiblement couplés: facteur de couplage $0,2 \leq K < 0,9$;
- c) les transformateurs à quatre enroulements comportant deux enroulements primaires et deux enroulements secondaires non couplés: facteur de couplage $K < 0,2$.

Les transformateurs à trois enroulements comportant des enroulements secondaires étroitement couplés constituent le type préférentiel pour les montages à 12 impulsions en série; ils sont également utilisés pour les montages à 12 impulsions en parallèle. Les montages à 12 impulsions en parallèle exigent la présence d'un transformateur interphase entre les deux ponts redresseurs.

NOTE A des tensions secondaires faibles (comme c'est le cas par exemple pour les groupes redresseurs montés en série avec une tension nominale de 750 V c.c.), il est pratiquement impossible d'atteindre un facteur de couplage $K \geq 0,9$ en raison de l'inductance des jeux de barres.

Les transformateurs à trois enroulements comportant des enroulements secondaires faiblement couplés sont utilisés pour les montages à 12 impulsions en parallèle incluant un transformateur interphase dans lesquels certaines exigences en termes de caractéristiques de tension et un courant de court-circuit maximal existent.

Les transformateurs à quatre enroulements sont utilisés pour les montages à 12 impulsions en parallèle ne nécessitant pas la présence d'un transformateur interphase.

Il convient de ne pas utiliser les groupes redresseurs à 12 impulsions incluant des transformateurs redresseurs non couplés avec des transformateurs interphase. L'impédance des enroulements secondaires des transformateurs non couplés assure une fonction similaire à celle d'un transformateur interphase.

Les autres types de transformateurs redresseurs de traction incluent:

- les transformateurs utilisant des connexions en zigzag pour les montages redresseurs à 24 impulsions,
- les transformateurs comportant des enroulements de compensation,
- les transformateurs pour montages en étoile doubles à six phases incluant un transformateur interphase.

Ces transformateurs nécessitent une attention complémentaire et les exigences spécifiques font l'objet d'un accord entre l'acheteur et le fournisseur.

L'IEC 60076 suppose que les transformateurs sont soumis à essai dans des conditions de tension et de courant sinusoïdales, dans les locaux du constructeur ou dans un laboratoire selon le cas. Cependant, les pertes réelles sont fortement influencées par le résidu harmonique du courant, lequel dépend des caractéristiques du convertisseur. Pour simplifier, seul l'effet des harmoniques typiques de chaque schéma est considéré, sans aucun rapport avec les harmoniques de tension, dues aux sources externes et à ces harmoniques, d'effet pourtant négligeable apparaissant dans le fonctionnement réel du convertisseur. Pour les méthodes d'essai permettant d'inclure les effets de ces harmoniques, se reporter à l'Article 7.6 de l'IEC 61378-1:2011.

Le point neutre d'un enroulement secondaire en étoile alimentant un convertisseur ne doit pas être mis à la terre et n'a normalement pas besoin d'être sorti.

7.2 Impédance de court-circuit et pertes en charge

7.2.1 Calcul des pertes en charge totales

Les pertes doivent être garanties au courant de service assigné (voir 10.4 de l'IEC 60076-1:2011). A la demande de l'acheteur, les pertes au courant de service de base peuvent aussi être garanties.

On considère que les pertes en charge, qui apparaissent en conditions normales de service, sont constituées des pertes dans la résistance de l'enroulement (mesurées en courant continu) et des pertes supplémentaires causées par les courants de Foucault, ainsi que par les flux vagabonds dans les enroulements et les parties constructives.

Les pertes vagabondes supplémentaires engendrées par les harmoniques dépendent de la construction du transformateur, de l'angle d'allumage et de la réactance de commutation et peuvent varier dans une large proportion.

Le calcul des pertes en charge totales (P_T) dans le transformateur de traction pendant le fonctionnement du convertisseur peut être obtenu par d'autres méthodes. L'acheteur doit spécifier la méthode qu'il compte appliquer au stade de l'appel d'offres, sinon la méthode sera spécifiée par le constructeur.

L'Annexe C donne les différentes méthodes de calcul des pertes en charge dans les transformateurs pendant le fonctionnement du convertisseur.

7.2.2 Impédance

NOTE Pour la définition de l'impédance, se reporter à 3.7 de l'IEC 60076-1:2011.

L'impédance de court-circuit doit être mesurée et enregistrée entre chaque paire d'enroulements. Les valeurs d'impédance doivent se situer dans les tolérances données en 7.3.

Pour les transformateurs à trois enroulements, le pourcentage d'impédance doit être mesuré et enregistré:

- pour l'ensemble du transformateur, avec les bornes des deux enroulements secondaires mises en court-circuit et le courant assigné traversant l'enroulement primaire, $z_{P/S}$
- entre l'enroulement primaire et l'un des deux enroulements secondaires, avec les bornes d'un enroulement secondaire mises en court-circuit et les bornes de l'autre enroulement secondaire laissées ouvertes et avec 50 % du courant assigné traversant l'enroulement primaire, $z_{P/S1}$ et $z_{P/S2}$
- entre les deux enroulements secondaires, avec les bornes d'un enroulement secondaire mises en court-circuit et le courant assigné traversant l'autre enroulement secondaire, $z_{S1/S2}$

Pour les transformateurs à quatre enroulements, le pourcentage d'impédance doit être mesuré et enregistré

- pour l'ensemble du transformateur, avec les bornes des deux enroulements secondaires mises en court-circuit et le courant assigné traversant les enroulements primaires, $z_{P/S}$
- entre l'un des deux enroulements primaires et l'enroulement secondaire correspondant, avec les bornes de l'enroulement secondaire mises en court-circuit et les bornes de l'autre enroulement secondaire laissées ouvertes et avec le courant assigné traversant chaque enroulement primaire. $z_{P1/S1}$ et $z_{P2/S2}$

Dans le cas d'enroulements supplémentaires (par ex: alimentation auxiliaire), on doit veiller à ce que ces enroulements n'aient pas d'effet néfaste sur l'impédance des enroulements secondaires.

7.3 Tolérances

Pour les pertes à vide et les pertes en charge, les tolérances données à l'Article 9 de l'IEC 60076-1:2011 s'appliquent.

Pour les transformateurs convertisseurs de traction, les tolérances admissibles de rapport de tension et d'impédance de court-circuit dépendent de la connexion du groupe convertisseur ainsi que des exigences de régulation de tension inhérente, de courant de court-circuit et de fonctionnement en parallèle des groupes convertisseurs.

En ce qui concerne le rapport de tension et l'impédance de court-circuit, les tolérances données dans le Tableau 1 s'appliquent.

NOTE Les valeurs de tolérance exigées pour le rapport de tension et l'impédance de court-circuit peuvent être significativement inférieures par rapport au cas des transformateurs de distribution.

Tableau 1 – Tolérances pour le rapport de tension et l'impédance des transformateurs convertisseurs de traction

Point	Tolérance
1. Transformateur comportant un enroulement primaire et un enroulement secondaire (montage en pont triphasé n° 8) ^a	
Rapport de tension à charge nulle (sur prise principale)	± 0,5 % de la valeur déclarée
Impédance de court-circuit (sur prise principale)	± 10 % de la valeur déclarée ^b
2. Transformateur à trois enroulements comportant un enroulement primaire et deux enroulements secondaires pour montages à 12 impulsions en parallèle avec transformateur interphase (montage n° 9)	

Point	Tolérance
Rapport de tension à charge nulle (sur prise principale) - entre l'enroulement primaire et l'un des deux enroulements secondaires - déviations des deux rapports de tension entre l'enroulement primaire et l'un des deux enroulements secondaires par rapport à la valeur moyenne	$\pm 0,5 \%$ de la valeur déclarée $\pm 0,2 \%$ de la moyenne arithmétique des deux rapports de tension
Impédance de court-circuit (sur prise principale): - entre l'enroulement primaire et les deux enroulements secondaires $z_{P/S}$ - entre l'enroulement primaire et chaque enroulement secondaire $z_{P/S1}$ et $z_{P/S2}$ - déviations des valeurs d'impédance $z_{P/S1}$ et $z_{P/S2}$ par rapport à la moyenne des deux impédances - entre les deux enroulements secondaires $z_{S1/S2}$	$\pm 10 \%$ de la valeur déclarée^b $\pm 10 \%$ de la valeur déclarée^b $\pm 1,5 \%$ de la moyenne arithmétique des deux impédances $\pm 10 \%$ de la valeur déclarée
3. Transformateur à quatre enroulements comportant deux enroulements primaires et deux enroulements secondaires^a pour montages à 12 impulsions en parallèle (montage n° 9 sans transformateur interphase)	
Rapport de tension à charge nulle (sur prise principale) - entre les enroulements primaires et secondaires - déviations des deux rapports de tension entre l'enroulement primaire et l'un des deux enroulements secondaires par rapport à la valeur moyenne	$\pm 0,5 \%$ de la valeur déclarée $\pm 0,2 \%$ de la moyenne arithmétique des deux rapports de tension
Impédance de court-circuit (sur prise principale): - entre les enroulements primaires et les deux enroulements secondaires $z_{P/S}$ - entre les paires individuelles d'enroulements primaires et secondaires $z_{P1/S1}$ et $z_{P2/S2}$ - déviations des valeurs d'impédance $z_{P1/S1}$ et $z_{P2/S2}$ par rapport à la moyenne des deux impédances	$\pm 10 \%$ de la valeur déclarée^b $\pm 10 \%$ de la valeur déclarée^b $\pm 2,5 \%$ de la moyenne arithmétique des deux impédances
4. Transformateur à trois enroulements comportant un enroulement primaire et deux enroulements secondaires pour montages à 12 impulsions en série (montage n° 12)	
Rapport de tension à charge nulle (sur prise principale) entre l'enroulement primaire et l'un des deux enroulements secondaires	$\pm 0,5 \%$ de la valeur déclarée
Impédance de court-circuit (sur prise principale): - entre l'enroulement primaire et les deux enroulements secondaires $z_{P/S}$^c - entre l'enroulement primaire et chaque enroulement secondaire $z_{P/S1}$ et $z_{P/S2}$ - déviations des valeurs d'impédance $z_{P/S1}$ et $z_{P/S2}$ par rapport à la moyenne - entre les deux enroulements secondaires $z_{S1/S2}$	$\pm 10 \%$ de la valeur déclarée^b $\pm 10 \%$ de la valeur déclarée $\pm 2,5 \%$ de la moyenne arithmétique des deux impédances $\pm 10 \%$ de la valeur déclarée
^a Les tolérances pour les transformateurs à quatre enroulements s'appliquent également aux transformateurs des deux groupes redresseurs en pont triphasés montés en parallèle (montage n° 8) avec un angle de déphasage de 30° entre les connexions du transformateur, formant à eux tous une sous-station à 12 impulsions. ^b Selon les exigences de régulation de tension pour les groupes redresseurs, l'acheteur et le fournisseur peuvent convenir de valeurs de tolérance inférieures pour l'impédance de court-circuit. Cela s'applique en particulier aux cas où un nouveau groupe redresseur doit être monté en parallèle avec un ou plusieurs groupes existants. ^c Cette valeur n'est valide que si le courant dans les enroulements secondaires est équilibré pendant l'essai comme c'est le cas en conditions de fonctionnement au moyen d'un redresseur monté série. Il convient de vérifier l'équilibre du courant pendant la mesure.	

8 Transformateurs auxiliaires

Il est admis que les transformateurs auxiliaires utilisés dans les installations de traction doivent être conçus pour tenir compte des exigences particulières suivantes:

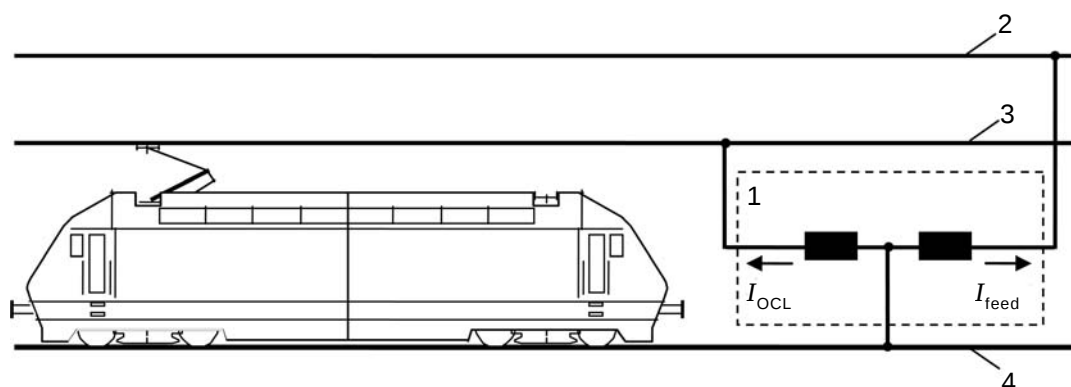
- la puissance de court-circuit en amont du transformateur est parfois supérieure à la normale, car ces transformateurs fonctionnent souvent à proximité de sources d'alimentation à forte puissance. Ce fait doit être porté à l'attention du fournisseur par l'acheteur au stade de l'offre. La nécessité de vérifier la tenue au court-circuit doit être prise en considération;
- le fait que les transformateurs auxiliaires soient soumis à des charges générant un résidu harmonique important doit être porté à l'attention du fournisseur par l'acheteur. Dans de tels cas, il doit être convenu d'appliquer les dispositions de l'Article 4 ou de l'IEC 61378-1:2011 (selon le cas).

9 Autotransformateurs de traction

9.1 Généralités

Les autotransformateurs de traction sont utilisés dans les systèmes de traction à courant alternatif monophasés pour réduire la chute de tension le long de la ligne, avec la possibilité d'augmenter la puissance de traction ainsi que la distance entre les sous-stations (voir Figure 2).

Etant donné que les autotransformateurs de traction peuvent également diminuer les courants traversant les rails, la réduction des perturbations inductives sur la ligne de télécommunication peut être possible.



IEC 1847/14

Légende

1 Autotransformateur de traction

2 Ligne d'alimentation (Feed)

3 Ligne aérienne de contact (OCL)

4 Rails de roulement (Rail)

I_{OCL} Courant d'enroulement circulant dans l'enroulement OCL de l'autotransformateur

I_{feed} Courant d'enroulement circulant dans l'enroulement Feeder de l'autotransformateur

Figure 2 – Disposition type d'un autotransformateur de traction

Les autotransformateurs de traction sont connectés entre la ligne aérienne de contact et la ligne d'alimentation, avec un point de connexion intermédiaire vers les rails de roulement (circuit de retour). La puissance d'alimentation est transmise selon le niveau de tension défini par la différence de tension entre la ligne aérienne de contact et la ligne d'alimentation. En raison de ce niveau de tension supérieur, des courants plus faibles pour la transmission de puissance sont nécessaires et les courants circulant dans le circuit de retour sont diminués.

La connexion de la prise centrale peut être effectuée soit en interne, soit en externe. Les groupes de vecteurs correspondants sont Ia0 et li0 (voir Figure 3).

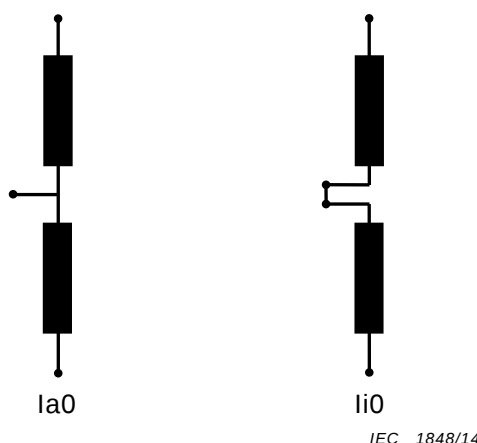


Figure 3 – Groupes de vecteurs pour les autotransformateurs de traction

Le rapport de tension le plus fréquent est:

$$\frac{U_{\text{OCL-feed}}}{U_{\text{OCL-rail}}} = 2$$

où

$U_{\text{OCL-feed}}$ est la tension entre la ligne aérienne de contact et la ligne d'alimentation,

$U_{\text{OCL-rail}}$ est la tension entre la ligne aérienne de contact et le circuit de retour.

D'autres rapports de tension sont également utilisés.

La puissance d'un autotransformateur de traction est exprimée sous la forme d'une puissance d'alimentation (puissance assignée) S_N et d'une puissance équivalente S_E .

$$S_N = S_E \times \frac{U_{\text{OCL-feed}}}{U_{\text{OCL-feed}} - U_{\text{OCL-rail}}}$$

$$S_E = I_{\text{OCL}} \times U_{\text{OCL-rail}}$$

NOTE La puissance équivalente S_E présente surtout un intérêt pour le constructeur de l'autotransformateur de traction.

L'acheteur doit indiquer au fournisseur:

- la puissance assignée S_N et/ou la puissance équivalente S_E ,
- les tensions $U_{\text{OCL-feed}}$ et $U_{\text{OCL-rail}}$,
- les courants de tenue au court-circuit pour les enroulements et pour la prise centrale,

– la connexion de la prise centrale.

9.2 Chargement

Le Paragraphe 5.1 s'applique.

9.3 Vérification de la capacité de l'autotransformateur à supporter le cycle de charge stipulé

Le Paragraphe 5.2 s'applique.

9.4 Contraintes dues aux courts-circuits

Le Paragraphe 5.4 s'applique.

Le niveau de courant de court-circuit se définit par les caractéristiques système plutôt que par l'impédance de l'autotransformateur, c'est pourquoi les niveaux de courant de court-circuit spécifiés par l'acheteur doivent s'appliquer.

10 Transformateurs de conversion biphasés ou triphasés

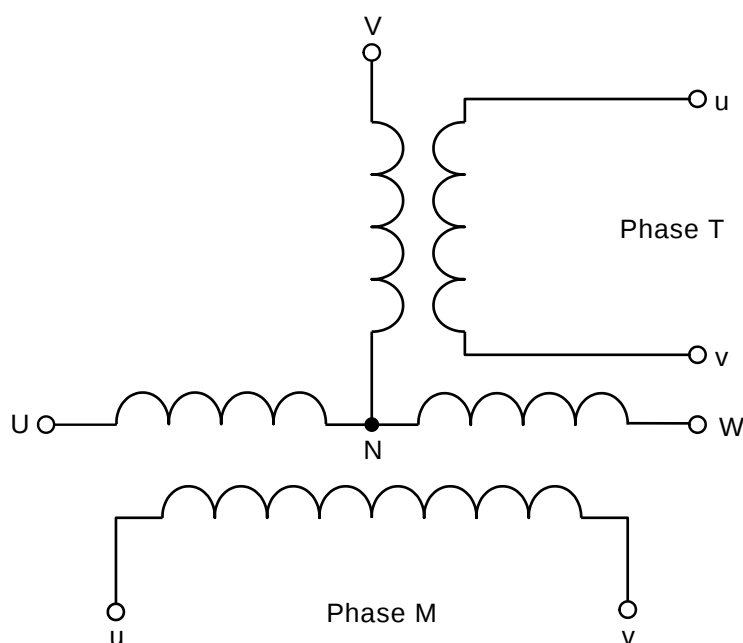
10.1 Généralités

Les transformateurs de conversion biphasés ou triphasés mentionnés dans cet article sont utilisés dans les systèmes de traction à courant alternatif pour garantir une charge triphasée équilibrée.

10.2 Transformateurs à montage Scott

10.2.1 Généralités

Les transformateurs à montage Scott convertissent le courant triphasé en courant biphasé en utilisant la connexion illustrée à la Figure 4.



IEC 1849/14

Figure 4 – Connexion des transformateurs à montage Scott

Les rapports de tensions et de courants entre les côtés primaire et secondaire sont donnés par les formules suivantes.

NOTE 1 Les conditions prérequis concernant les impédances de fuite ou les impédances d'excitation ne sont pas prises en considération.

a) Rapport de tension

$$\text{Phase M} \quad \frac{\overline{U_{UW}}}{U_M} = \frac{U_1}{U_2} = m$$

$$\text{Phase T} \quad \frac{U_{VN}}{U_T} = \frac{(\sqrt{3}/2) \times U_1}{U_2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times m$$

où

U_1 est la tension primaire (entre phases);

U_2 est la tension secondaire ($U_2 = |U_M| = |U_T|$);

U_M est la tension secondaire de la phase M;

U_T est la tension secondaire de la phase T.

b) Courant de phase (base de tension de ligne)

$$I_U = I_W = \sqrt{I_{UM}^2 + I_{UT}^2}$$

$$I_V = I_{VT}$$

$$I_{UT} = \frac{1}{2} \times I_{VT} = \frac{1}{2} \times \frac{2}{\sqrt{3} \times m} \times I_T$$

$$I_{VT} = \frac{2}{\sqrt{3} \times m} \times I_T$$

où

I_U, I_V, I_W est le courant primaire;

I_M, I_T est le courant secondaire;

I_{UM} est le courant primaire de la phase U causé par la mise en charge de la phase M;

I_{UT} est le courant primaire de la phase U causé par la mise en charge de la phase T;

I_{VT} est le courant primaire de la phase V causé par la mise en charge de la phase T.

NOTE 2 Il n'existe pas de courant primaire de phase V causé par la mise en charge de la phase M.

10.2.2 Chargement

Le Paragraphe 5.1 s'applique.

10.2.3 Vérification de la capacité du transformateur à montage Scott à supporter le cycle de charge stipulé

Le Paragraphe 5.2 s'applique.

10.2.4 Contraintes dues aux courts-circuits

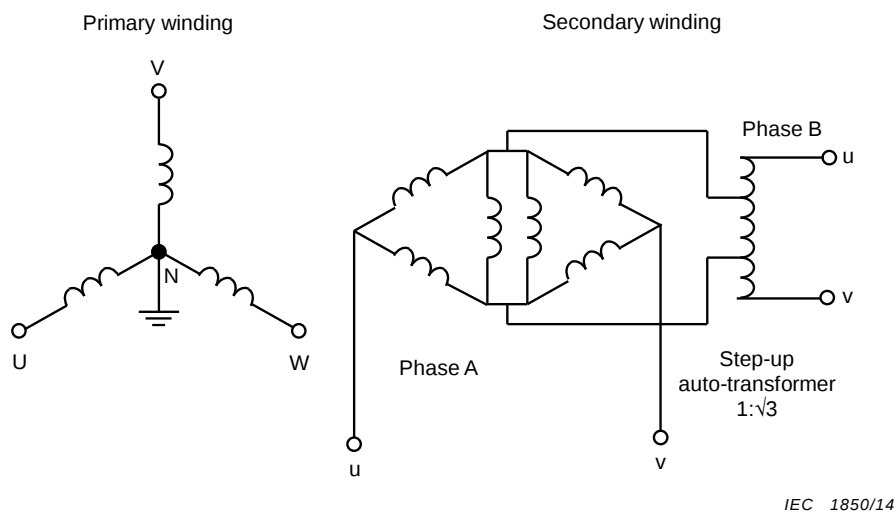
Le Paragraphe 5.4 s'applique.

Le niveau de courant de court-circuit se définit par les caractéristiques système plutôt que par l'impédance du transformateur à montage Scott, c'est pourquoi les niveaux de courant de court-circuit spécifiés par l'acheteur doivent s'appliquer.

10.3 Transformateur Woodbridge modifié

10.3.1 Généralités

Etant donné que le point neutre de l'enroulement primaire des transformateurs Woodbridge modifiés peut être mis à la terre, les transformateurs Woodbridge modifiés sont utilisés dans les systèmes à très haute tension. Les transformateurs Woodbridge modifiés sont notamment utilisés dans les applications ferroviaires haute vitesse. La connexion des transformateurs Woodbridge modifiés est illustrée à la Figure 5.



Légende

Anglais	Français
Primary winding	Enroulement primaire
Secondary winding	Enroulement secondaire
Phase A	Phase A
Phase B	Phase B
Step-up auto-transformer	Autotransformateur élévateur

Figure 5 – Connexion des transformateurs Woodbridge modifiés

La relation entre les tensions et les courants sur les côtés primaire et secondaire est donnée dans les formules suivantes.

NOTE Les conditions prérequis concernant les impédances de fuite ou les impédances d'excitation ne sont pas prises en considération.

a) Rapport de tension

Phase A

$$\frac{\overline{U_{UW}}}{U_A} = \frac{U_1}{U_2} = m$$

Phase B

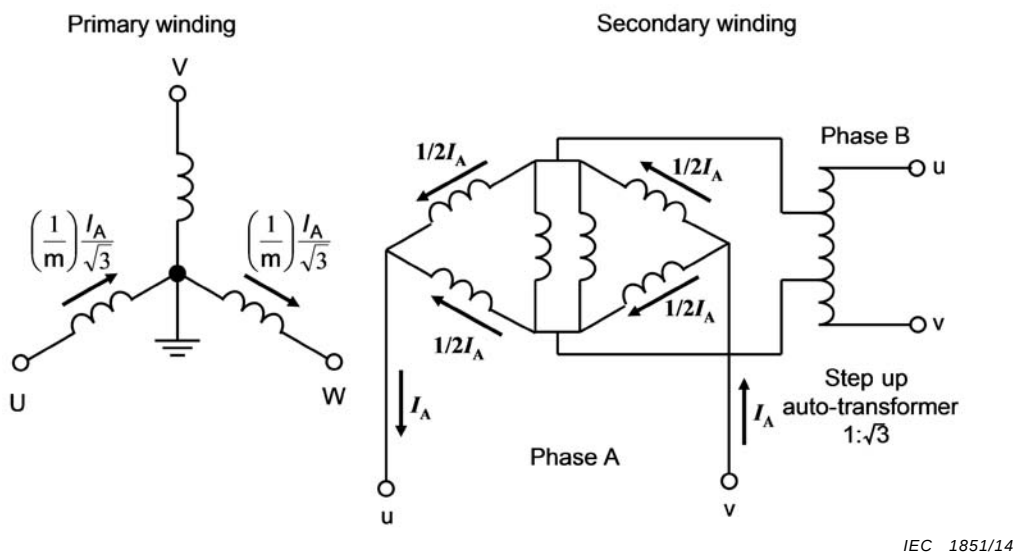
$$\frac{\overline{U_{VN}}}{U_B} = \frac{\frac{1}{\sqrt{3}} \times U_1}{U_2} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times m$$

où

- U_1 est la tension primaire;
- U_2 est la tension secondaire ($U_2 = |U_A| = |U_B|$);
- U_A est la tension secondaire de la phase A,
- U_B est la tension secondaire de la phase B.

b) Courant de phase (base de tension de ligne)

Les courants de la phase A sont illustrés à la Figure 6.



Légende

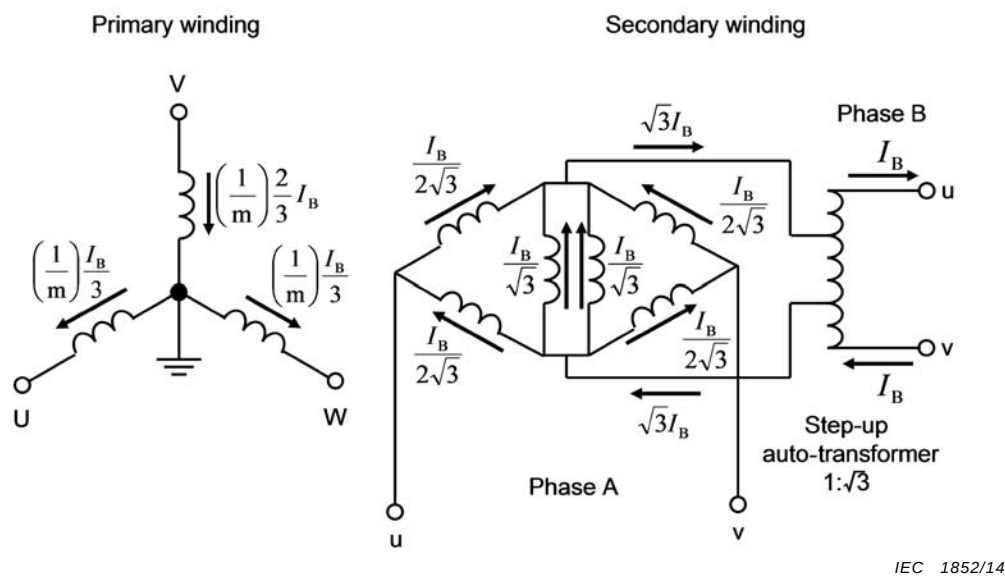
Anglais	Français
Primary winding	Enroulement primaire
Secondary winding	Enroulement secondaire
Phase A	Phase A
Phase B	Phase B
Step-up autotransformer	Autotransformateur élévateur

Figure 6 – Courant de la phase A sur un transformateur Woodbridge modifié

où:

I_A est le courant secondaire de la phase A.

Les courants de la phase B sont illustrés à la Figure 7.



Légende

Anglais	Français
Primary winding	Enroulement primaire
Secondary winding	Enroulement secondaire
Phase A	Phase A
Phase B	Phase B
Step-up auto-transformer	Autotransformateur élévateur

Figure 7 – Courant de la phase B sur un transformateur Woodbridge modifié

où

I_B est le courant secondaire de la phase B.

La relation mentionnée ci-dessus donne les formules suivantes.

$$m \times I_U = \frac{1}{\sqrt{3}} \times I_A - \frac{1}{3} \times I_B$$

$$m \times I_V = \frac{2}{3} \times I_B$$

$$m \times I_W = -\frac{1}{\sqrt{3}} \times I_A - \frac{1}{3} \times I_B$$

où

I_U , I_V , I_W est le courant primaire.

Le courant de la phase A est déphasé de 90° par rapport au courant de la phase B. Si les courants de phase de la phase A et de la phase B sont égaux, les équations suivantes sont données.

$$I_A = jI_B$$

$$m \times \dot{I}_U = \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \times \frac{2}{3} \times \dot{I}_B$$

$$m \times \dot{I}_V = \frac{2}{3} \times \dot{I}_B$$

$$m \times \dot{I}_W = \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \times \frac{2}{3} \times \dot{I}_B$$

A la condition que les courants de phase de la phase A et de la phase B sont égaux, il n'existe pas de courant au point neutre de l'enroulement primaire car les courants primaires des trois phases sont équilibrés.

10.3.2 Chargement

Le Paragraphe 5.1 s'applique.

10.3.3 Vérification de la capacité du transformateur Woodbridge modifié à supporter le cycle de charge stipulé

Le Paragraphe 5.2 s'applique.

10.3.4 Contraintes dues aux courts-circuits

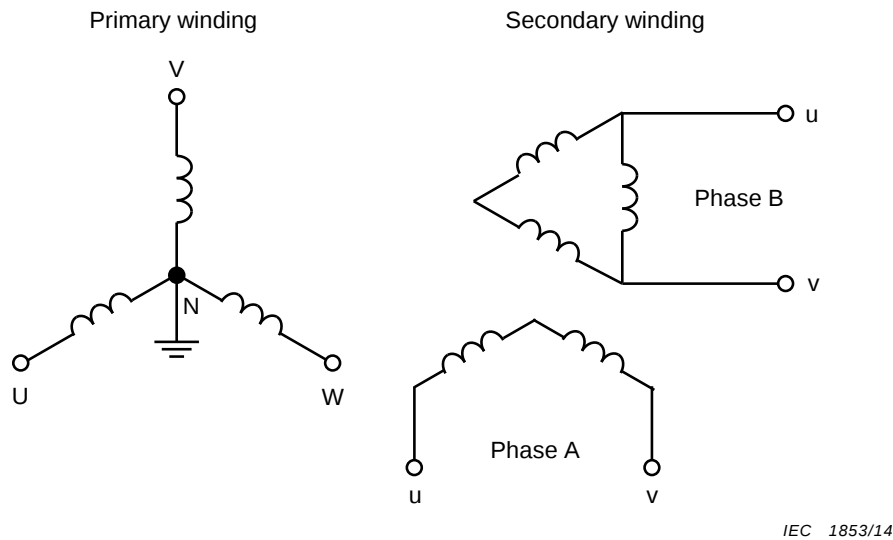
Le Paragraphe 5.4 s'applique.

Le niveau de courant de court-circuit se définit par les caractéristiques système plutôt que par l'impédance du transformateur Woodbridge modifié, c'est pourquoi les niveaux de courant de court-circuit spécifiés par l'acheteur doivent s'appliquer.

10.4 Transformateur à montage étoile-triangle

10.4.1 Généralités

Le point neutre de l'enroulement primaire des transformateurs à montage étoile-triangle peut être mis à la terre comme pour les transformateurs Woodbridge modifiés. Comparée aux transformateurs Woodbridge modifiés, la construction des transformateurs à montage étoile-triangle est plus simple car l'autotransformateur élévateur n'est pas nécessaire. La connexion des transformateurs à montage étoile-triangle est illustrée à la Figure 8.



Légende

Anglais	Français
Primary winding	Enroulement primaire
Secondary winding	Enroulement secondaire
Phase A	Phase A
Phase B	Phase B

Figure 8 – Connexion des transformateurs à montage étoile-triangle

La relation entre les tensions et les courants sur les côtés primaire et secondaire est donnée dans les formules suivantes.

NOTE Les conditions prérequis concernant les impédances de fuite ou les impédances d'excitation ne sont pas prises en considération.

a) Rapport de tension

Phase A

$$\frac{\overline{U_{UW}}}{U_A} = \frac{U_1}{U_2} = m$$

Phase B

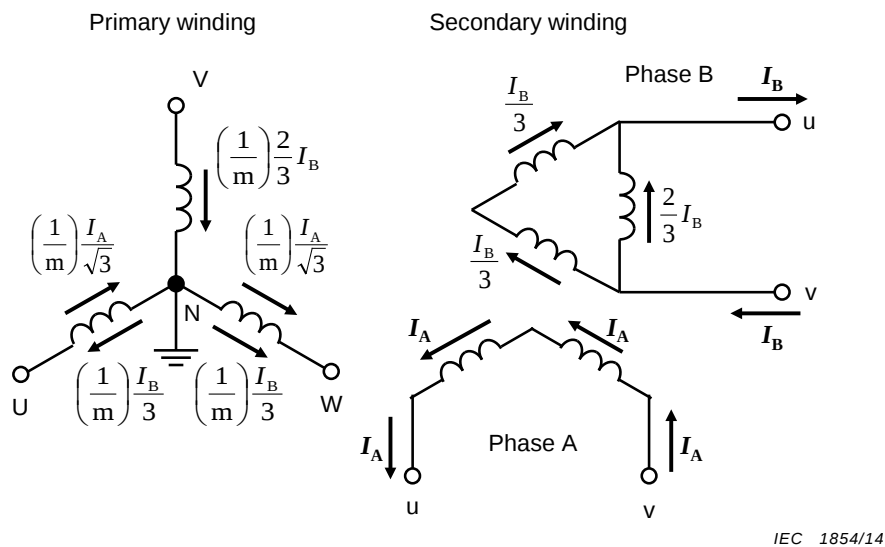
$$\frac{\overline{U_{VN}}}{U_B} = \frac{\frac{1}{\sqrt{3}}U_1}{U_2} = \frac{1}{\sqrt{3}}m$$

où

- U_1 est la tension primaire.
- U_2 est la tension secondaire ($U_2 = |U_A| = |U_B|$).
- U_A est la tension secondaire de la phase A.
- U_B est la tension secondaire de la phase B.

b) Courant de phase (base de tension de ligne)

Les courants de phase sont illustrés à la Figure 9.



Légende

Anglais	Français
Primary winding	Enroulement primaire
Secondary winding	Enroulement secondaire
Phase A	Phase A
Phase B	Phase B

Figure 9 – Courants de phase pour les transformateurs à montage étoile-triangle

où

I_A est le courant secondaire de la phase A;
 I_B est le courant secondaire de la phase B.

La relation mentionnée ci-dessus donne les formules suivantes.

$$m \times \dot{I}_U = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \dot{I}_A - \frac{1}{3} \times \dot{I}_B$$

$$m \times \dot{I}_V = \frac{2}{3} \times \dot{I}_B$$

$$m \times \dot{I}_W = -\frac{1}{\sqrt{3}} \times \dot{I}_A - \frac{1}{3} \times \dot{I}_B$$

où

I_U, I_V, I_W est le courant primaire.

La relation entre les tensions et courants est similaire à celle des transformateurs Woodbridge modifiés.

10.4.2 Chargement

Le Paragraphe 5.1 s'applique.

10.4.3 Vérification de la capacité du transformateur à montage étoile-triangle à supporter le cycle de charge stipulé

Le Paragraphe 5.2 s'applique.

10.4.4 Contraintes dues aux courts-circuits

Le Paragraphe 5.4 s'applique.

Le niveau de courant de court-circuit se définit par les caractéristiques système plutôt que par l'impédance du transformateur à montage étoile-triangle, c'est pourquoi les niveaux de courant de court-circuit spécifiés par l'acheteur doivent s'appliquer.

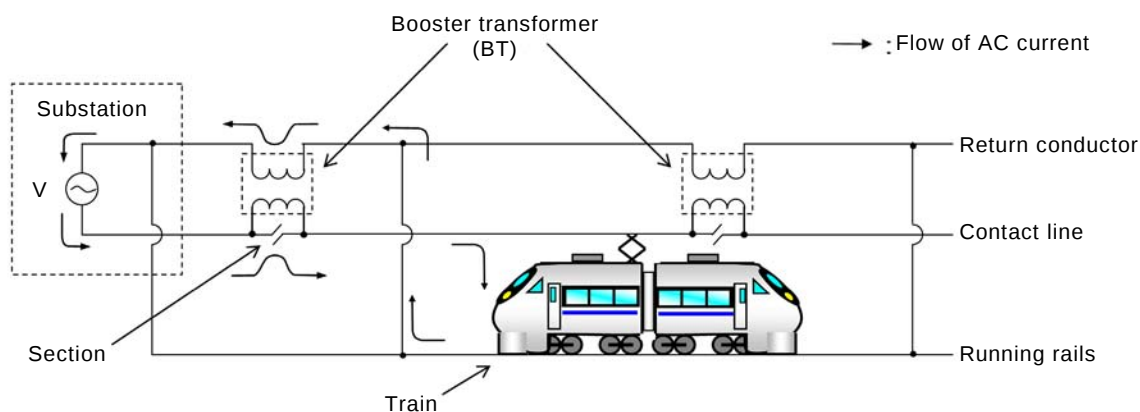
11 Autres transformateurs de traction

11.1 Généralités

Il existe de nombreux types de transformateurs de traction en plus des transformateurs mentionnés dans les articles précédents. Certains types sont abordés dans cet article.

11.2 Transformateurs survolteurs

La configuration principale d'un système d'alimentation de traction à courant alternatif utilisant un transformateur survolteur est illustrée à la Figure 10. Le transformateur survolteur est utilisé dans le but de diminuer les courants de retour aux rails et à la terre où des courants électriques importants et des conditions de mise à la terre difficiles pourraient engendrer des interférences et des potentiels de rails inacceptables. Dans les transformateurs survolteurs, les conducteurs de retour sont connectés aux rails de roulement à mi-chemin entre les emplacements des transformateurs survolteurs.



IEC 1855/14

Légende

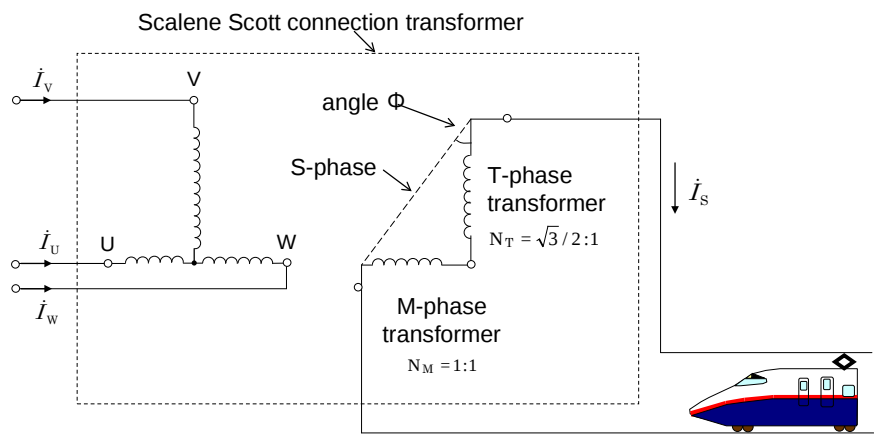
Anglais	Français
Booster transformer (BT)	Transformateur survolteur
Substation	Sous-station
Section	Section
Train	Train
Flow of AC current	Sens du courant continu
Return current	Courant de retour
Contact line	Ligne de contact
Running rails	Rails de roulement

Figure 10 – Transformateur survolteur

Les exigences données dans l'Article 4 et l'Article 5 s'appliquent également à ce type de transformateur de traction. Les exigences supplémentaires font l'objet d'un accord entre l'acheteur et le fournisseur.

11.3 Transformateurs à montage Scalene Scott

Le transformateur à montage Scott tel que décrit en 10.2 pour la conversion de courant triphasé en courant biphasé utilise la même tension secondaire (phase M et phase T) pour alimenter deux sections d'alimentation monophasées. D'autre part, le transformateur à montage Scalene Scott alimente une seule section (par ex: dépôt) du circuit d'alimentation monophasé en connectant ses enroulements secondaires en série. La connexion est illustrée à la Figure 11. Ce courant monophasé est appelé «phase S». Les tensions de la phase M et la phase T ne sont pas toujours égales. Par conséquent, le triangle des vecteurs de tension secondaire devient scalène. L'« Φ » indiqué à la Figure 11 est appelé «angle Scott». L'alimentation électrique du transformateur peut être équilibrée en connectant une bobine d'inductance pour la phase M et un condensateur pour la phase T.



IEC 1856/14

Légende

Anglais	Français
Scalene Scott connection transformer	Transformateur à montage Scalene Scott
Angle	Angle
S-phase	Phase S
T-phase transformer	Transformateur à phase T
M-phase transformer	Transformateur à phase M

Figure 11 – Transformateur à montage Scalene Scott

Les exigences données dans l'Article 4 et l'Article 5 s'appliquent également aux transformateurs à montage Scalene Scott. Les exigences supplémentaires font l'objet d'un accord entre l'acheteur et le fournisseur.

Annexe A (informative)

Classes de service préférentielles

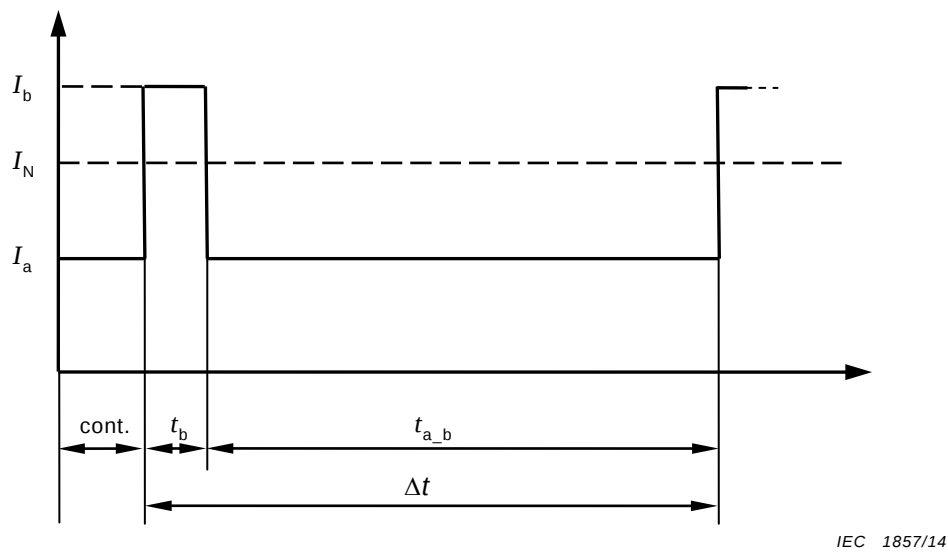
Le Tableau A.1 donne les classes de service préférentielles pour la conception des transformateurs de traction.

Tableau A.1 – Classes de service préférentielles

Classe de service	Id.	Valeur réduite de I_B	Valeur réduite de I_N	Condition initiale	Durée	Période de refroidissement	Application typique	Note
I	-	1	1	-	cont.	-	systèmes à courant alternatif	
IA	a	1	0,9	-	cont.	-	systèmes à courant alternatif	
	b	1,7	1,494	a	480 s	3 120 s		
IB	a	1	0,873	-	cont.	-	systèmes à courant alternatif	
	b	2,2	1,903	a	300 s	3 300 s		
IC	a	1	0,691	-	cont.	-	systèmes à courant alternatif	
	b	2,7	1,901	a	300 s	1 500 s		
ID	a	1	0,668	-	cont.	-	systèmes à courant alternatif	
	b	3,7	2,446	a	180 s	1 620 s		
IE	a	1	0,652	-	cont.	-	systèmes à courant alternatif	
	b	4,6	3,007	a	120 s	1 680 s		
IF	A	1	0,959	-	cont.	-	systèmes à courant alternatif	
	b	3	2,876	a	120 s	3 h		
V	a	1	0,827	-	cont.	-	transport collectif rapide trolleybus	
	b	1,5	1,240	a	2 h	3 h		
	c	2	1,654	a	60 s	1 800 s		
VI	a	1	0,823	-	cont.	-	chemins de fer d'intérêt général transport collectif rapide trolleybus	
	b	1,5	1,234	a	2 h	3 h		
	c	3	2,468	a	60 s	1 800 s		
VII	a	1	0,825	-	cont.	-	métros légers tramways	
	b	1,5	1,238	a	2 h	3 h		
	c	4,5	3,716	a	15 s	1 800 s		
VIII	a	1	0,814	-	cont.	-	transport collectif rapide trolleybus	cumulée
	b	1,5	1,221	a	2 h	-		
	c	2	1,628	b	60 s	3 h		
IXA	a	1	0,785	-	cont.	-	chemins de fer d'intérêt général	cumulée
	b	1,5	1,177	a	2 h	-		

Classe de service	Id.	Valeur réduite de I_B	Valeur réduite de I_N	Condition initiale	Durée	Période de refroidissement	Application typique	Note
	c	3	2,355	b	300 s	3 h		
IXB	a	1	0,658	-	cont.	-	chemins de fer d'intérêt général	cumulée
	b	2	1,315	a	2 h			
	c	3	1,973	b	300 s	3 h		
JP	a	1	0,912	-	cont.		chemins de fer d'intérêt général	cumulée
	b	1,2	1,095	a	2 h			
	c	3	2,736	b	60 s	3 h		
CN	a	1	0,8	-	354 min		chemins de fer d'intérêt général	cumulée cycle de 24 h
	b	2	2	a	60 min			
	c	3	3	b	2 min	300 min		

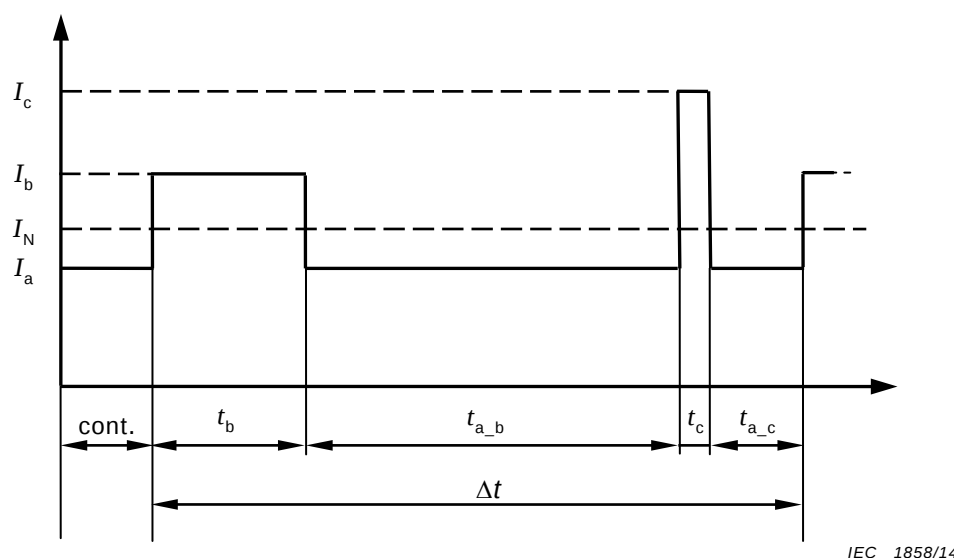
Les Figures A.1 à A.4 donnent les cycles d'essai recommandés pour les essais d'échauffement des transformateurs de traction conçus selon une classe de service.



Légende

- cont. période de préchauffage, injection de courant jusqu'à ce que les conditions de température en régime établi des enroulements à I_a soient atteintes
- I_a courant de service équivalant à la charge de base
- I_b courant de surcharge b
- I_N courant assigné
- t_{a_b} période de refroidissement au courant I_a après surcharge au courant I_b
- t_b durée du courant de surcharge I_b
- Δt durée du cycle d'essai incluant la surcharge et la période de refroidissement

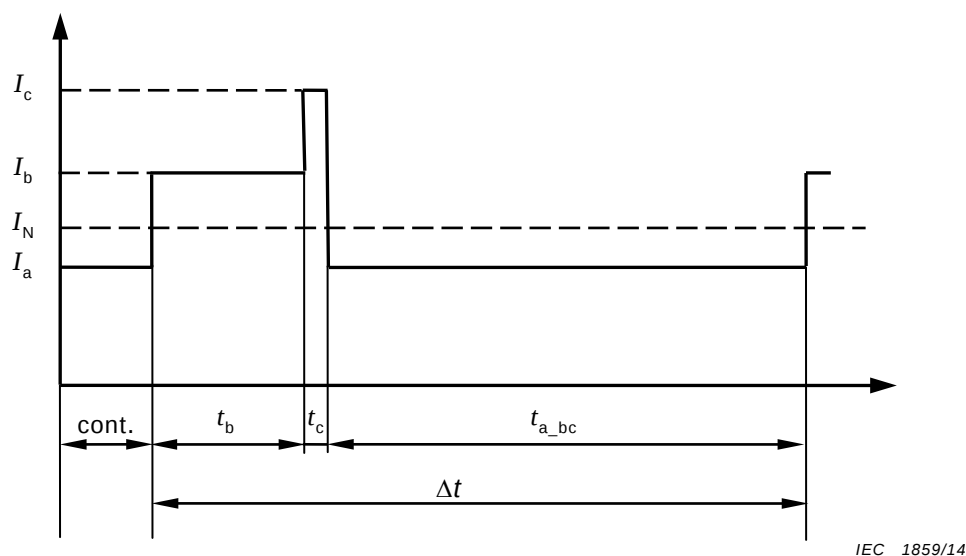
Figure A.1 – Cycle d'essai pour les classes de service IA à IF



Légende

- cont. période de préchauffage, injection de courant jusqu'à ce que les conditions de température en régime établi des enroulements à I_a soient atteintes
- I_a courant de service équivalent à la charge de base
- I_b courant de surcharge b
- I_c courant de surcharge c
- I_N courant assigné
- t_{a_b} période de refroidissement au courant I_a après surcharge au courant I_b
- t_{a_c} période de refroidissement au courant I_a après surcharge au courant I_c
- t_b durée du courant de surcharge I_b
- t_c durée du courant de surcharge I_c
- Δt durée du cycle d'essai incluant les surcharges et les périodes de refroidissement

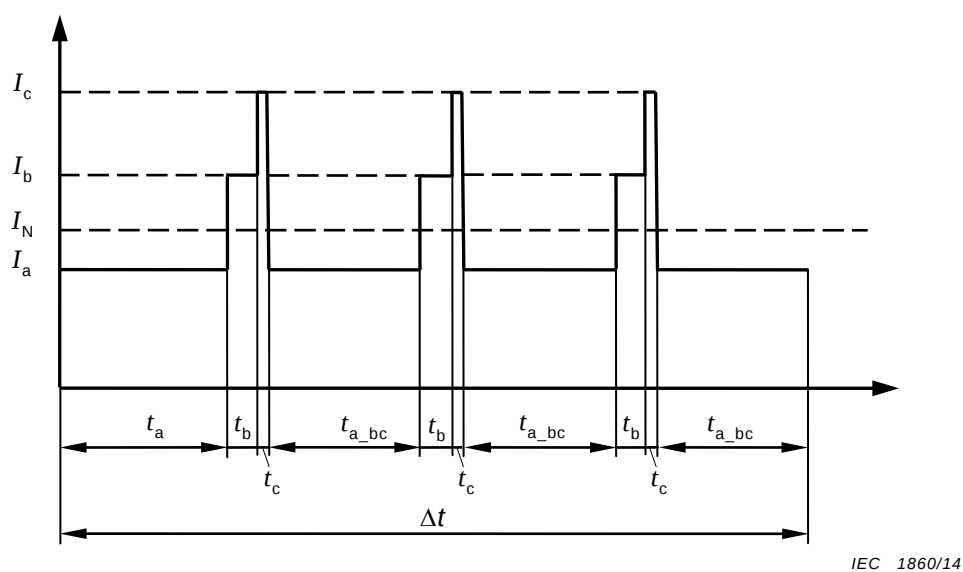
Figure A.2 – Cycle d'essai pour les classes de service V, VI et VII



Légende

- cont. période de préchauffage, injection de courant jusqu'à ce que les conditions de température en régime établi des enroulements à I_a soient atteintes
- I courant de service équivalant à la charge de base
- I_b courant de surcharge b
- I_c courant de surcharge c
- I_N courant assigné
- t_{a_bc} période de refroidissement au courant I_a après surcharge cumulée aux courants I_b et I_c
- t_b durée du courant de surcharge I_b
- t_c durée du courant de surcharge I_c
- Δt durée du cycle d'essai incluant les surcharges et la période de refroidissement

Figure A.3 – Cycle d'essai pour les classes de service VIII, IX et JP



Légende

I_a	courant de service équivalent à la charge de base
I_b	courant de surcharge b
I_c	courant de surcharge c
I_N	courant assigné
t_a	durée de la période de préchauffage au courant I_a
t_{a_bc}	période de refroidissement au courant I_a après surcharge cumulée aux courants I_b et I_c
t_b	durée du courant de surcharge I_b
t_c	durée du courant de surcharge I_c
Δt	durée du cycle d'essai incluant les surcharges et les périodes de refroidissement

Figure A.4 – Cycle d'essai pour la classe de service CN

Annexe B (normative)

Caractéristiques d'isolement et valeurs d'essai

Tableau B.1 – Tensions d'isolement et valeurs d'essai

Niveau d'isolement (tension d'isolement assignée) kV	Tension de tenue assignée de courte durée à fréquence industrielle (valeur efficace 60 s) kV		Tension assignée de tenue au choc de foudre plein (crête) (crête 1,2/50 µs) kV	
	A (OV3)	B (OV4)	A (OV3)	B (OV4)
0,05	0,42	0,7	0,8	1,5
0,10	0,7	1,2	1,5	2,5
0,15	1,2	1,9	2,5	4
0,3	1,9	2,8	4	6
0,9	2,8	3,6	6	8
1,2	3,6	5,5	8	12
1,8	4,6	6,9	10	15
2,3	5,5	8,3	12	18
3	6,9	9,2	15	20
3,6	11,5	14	25	30
4,8	14	18,5	30	40
6,5	18,5	23	40	50
8,3	23	27,5	50	60
10	27,5	34,5	60	75
17	44	50	95	125
17	(70)		(170)	
24	70	80	145	170
27,5	80	95	170	200
36	95	95	200	250
52	95	140	250	[325]
60	115	115	280	280
72,5	140	140	325	325
100	150	185	380	450
123	185	230	450	550
145	230	275	550	650
170	275	325	650	750
245	360	395	850	950
300	395	460	950	1 050
362	460	510	1 050	1 175
420	510	570	1 175	1 300

NOTE 1 Les valeurs entre parenthèses ne sont pas normalisées; la valeur entre crochets n'est pas cohérente avec les autres valeurs bien qu'elle soit donnée dans l'IEC 62497-1.

NOTE 2 Les valeurs mentionnées ci-dessus sont issues de l'IEC 62497-1 pour les tensions d'isolement assignées inférieures ou égales à 52 kV et d'autres documents IEC pour les tensions d'isolement au-dessus de 52 kV.

NOTE 3 Selon la pratique des applications ferroviaires, le terme «tension d'isolement assignée» est ici préférentiel au terme équivalent «tension la plus élevée pour l'équipement». Il s'agit d'une tension point à point (c'est-à-dire phase-terre) et non pas d'une tension système.

Annexe C (normative)

Détermination des pertes et du courant équivalent par différentes méthodes

C.1 Généralités

Les articles suivants donnent deux méthodes conventionnelles pour estimer les pertes en charge totales du convertisseur en service. Elles sont basées sur des mesures de charge à deux fréquences différentes qui sont:

- le calcul des pertes des transformateurs immergés dans l'huile (voir Article C.4);
- le calcul des pertes des transformateurs de type sec (voir Article C.5).

C.2 Définitions des symboles utilisés dans le calcul des pertes

P_T	Perte en charge totale dans un transformateur de traction à la charge assignée
f_1	$= f_N$ Fréquence assignée
f_2	Fréquence majorée
r	f_2 / f_1
P_1	Perte en charge totale mesurée à la fréquence assignée de la tension sinusoïdale
P_2	Perte en charge totale mesurée à la fréquence majorée de la tension sinusoïdale
P_Ω	Perte en charge due à la résistance ohmique de l'enroulement basée sur le courant de service, mesurée en courant continu
P_{WE1}	Pertes par courants de Foucault des enroulements à la fréquence f_1
P_{WE2}	Pertes par courants de Foucault des enroulements à la fréquence f_2
P_{SE1}	Pertes vagabondes dans des parties structurales, à l'exclusion des enroulements, à la fréquence f_1 et dans les enroulements lorsqu'elles ne dépendent pas de la fréquence
P_{SE2}	Pertes vagabondes dans des parties structurales, à l'exclusion des enroulements, à la fréquence f_2 et dans les enroulements lorsqu'elles ne dépendent pas de la fréquence
P_{F1}	Pertes par courants de Foucault variant en fonction du carré de la fréquence et déterminées à la fréquence f_1
P_{F2}	Pertes par courants de Foucault variant en fonction du carré de la fréquence et déterminées à la fréquence f_2
P_k	Pertes par courants de Foucault indépendantes de la fréquence
I_{GT}	$= I_{GL}$ ou I_{Gv} : Courant de service assigné de l'enroulement concerné
h	Rang harmonique
i_h	Amplitude du courant harmonique donné
I_N	Courant assigné de l'enroulement concerné à la fréquence fondamentale

C.3 Rapports entre le courant assigné et le courant de service assigné des transformateurs convertisseurs de traction

En se basant sur les essais effectués sur des transformateurs couplés aux différents montages de convertisseur (voir Tableau C.1), les valeurs principales du résidu harmonique du courant, exprimées en valeur réduite du courant de base, sont conventionnellement données dans le Tableau C.2.

Tableau C.1 – Montages des transformateurs convertisseurs

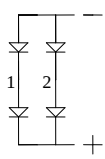
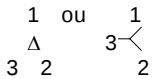
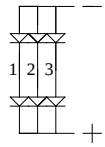
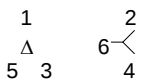
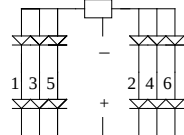
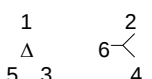
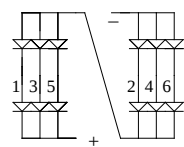
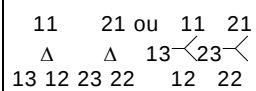
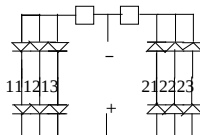
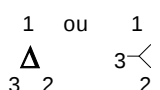
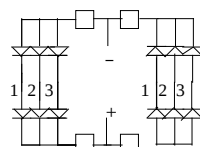
Connexion	Montage du transformateur côté valve	Montage des valves
1	3	4
7		
8		
9		
12		
18		
19		

Tableau C.2 – Principaux résidus harmoniques pour les différents montages de convertisseur

Rang harmonique	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27
Fréquences Hz	16,7 50 60	50 150 180	83 ^{1/3} 250 300	117 350 420	150 450 540	183 550 660	217 650 780	250 750 900	283 850 1 020	317 950 1 140	350 1 050 1 260	383 1 150 1 380	417 1 250 1 500	450 1 350 1 620
Montage en pont (voir Tableau C.1)	Résidus harmoniques en valeur réduite de la composante fondamentale Valeurs informatives pour convertisseurs non commandés (basées sur les conditions de charge assignées)													
7	1	0,310	0,175	0,111	0,086	0,045	0,029	0,021	0,015	0,010	0,009	0,009	0,008	0,007
8 9, 12 BT 9,12 HT (4 enroulements)	1		0,175	0,111		0,045	0,029		0,015	0,010		0,009	0,008	
9 HT (3 enroulements)	1					0,045	0,029					0,009	0,008	
12 HT (3 enroulements)	1					0,045	0,029					0,009	0,008	
Montage en pont (voir Tableau C.1)	Résidus harmoniques en valeur réduite de la composante fondamentale Valeurs théoriques pour une forme d'onde rectangulaire													
7	1	0,333	0,2	0,143	0,111	0,091	0,077	0,067	0,059	0,052	0,047	0,044	0,040	0,036
8 9, 12 BT 9,12 HT (4 enroulements)	1		0,2	0,143		0,091	0,077		0,059	0,052		0,044	0,040	
9 HT (3 enroulements)	1					0,091	0,077					0,044	0,040	
12 HT (3 enroulements)	1					0,091	0,077					0,044	0,040	

Le courant harmonique des convertisseurs commandés dépend de l'angle de retard de l'ordre d'amorçage α et peut être calculé comme indiqué en 5.2.2 de l'IEC TR 60146-1-2:2011. Autrement, la valeur théorique indiquée dans le Tableau C.2 peut être supposée.

En considérant la gamme complète des harmoniques et en utilisant la formule $I_{GT} = \sqrt{\sum_{h=1}^n i_h^2}$,

on peut supposer les rapports entre les valeurs efficaces du courant de service et le courant (fondamental) assigné, indiqués dans le Tableau C.3:

Tableau C.3 – Rapports du courant de service au courant assigné

Montage en pont	Applicabilité	I_{NG}/I_N pour convertisseurs non commandés	I_{NG}/I_N théorique
7	Primaire et secondaire	1,070	1,10
8	Primaire et secondaire	1,023	1,05
9, 12	Primaire	1,001	1,01
9, 12	Secondaires	1,023	1,05

Dans le cas de transformateurs à deux secondaires utilisés dans les montages 9 et 12, où les enroulements secondaires et l'enroulement primaire sont empilés, les deux parties du primaire

étant couplées en parallèle, le facteur de chaque partie du primaire est égale à 1,05 comme celui du secondaire correspondant. Aux bornes du primaire, le facteur diminue à 1,01 (voir Figure C.1).

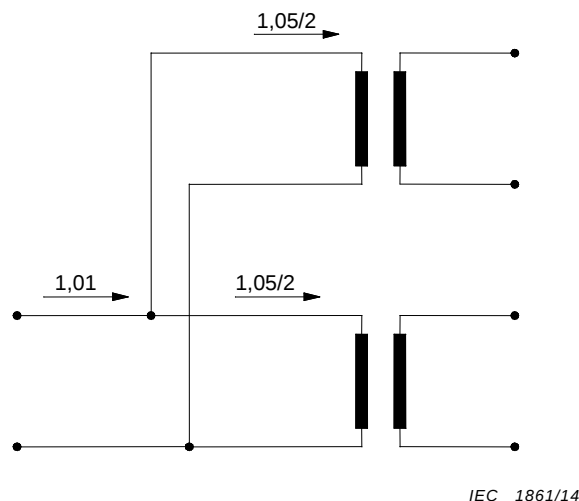


Figure C.1 – Courant de service en fonction du courant fondamental

C.4 Calcul des pertes en charge des transformateurs immergés dans l'huile basé sur des mesures de perte à deux fréquences différentes

Les pertes en charge sont mesurées à deux fréquences différentes avec une forme d'onde sinusoïdale pratique selon 10.4 de l'IEC 60076-1:2011. Il convient d'effectuer une mesure P_1 à la fréquence assignée $f_1 = f_N$ (16,7 Hz; 50 Hz; 60 Hz) et l'autre mesure P_2 à la fréquence $f_2 \geq 2 f_1$. De plus, une mesure doit être faite suivant la méthode traditionnelle à courant continu pour déterminer la valeur des pertes ohmiques au courant assigné.

La formule suivante donne les pertes en charge P_1 :

$$P_1 = P_{\Omega} + P_{WE1} + P_{SE1} \quad (C.1)$$

Pour les symboles, se reporter à l'Article C.2.

La formule suivante donne les pertes en charge P_2 :

$$P_2 = P_{\Omega} + P_{WE2} + P_{SE2} = P_{\Omega} + P_{WE1} \times r^2 + P_{SE1} \times r^{0,8} \quad (C.2)$$

Il est admis de faire la dernière mesure avec un courant de 10 % à 20 % du courant assigné, mais les pertes mesurées doivent être recalculées au courant assigné.

La résolution de (C.1) et (C.2) donne:

$$P_{WE1} = \frac{-P_2 + P_{\Omega} + r^{0,8} \times (P_1 - P_{\Omega})}{r^{0,8} - r^2}$$

$$P_{SE1} = \frac{P_2 - P_{\Omega} - r^2 \times (P_1 - P_{\Omega})}{r^{0,8} - r^2}$$

En se basant sur le spectre des courants harmoniques donné (voir Article C.3), on peut calculer les pertes en charge (P_T) du redresseur en service de manière simplifiée ainsi:

$$P_T = P_{\Omega} + P_{WE1} \times \frac{\sum_{h=1}^n i_h^2 \times h^2}{I_{NT}^2} + P_{SE1} \sum_{h=1}^n \left(\left(\frac{i_h}{I_N} \right)^2 \times (h)^{0,8} \right)$$

C.5 Calcul des pertes en charge des transformateurs de type sec basé sur des mesures de perte à deux fréquences différentes

La méthode est basée sur la détermination des pertes en charge d'un transformateur par la somme de la perte due à la résistance ohmique de l'enroulement et les deux parties des pertes par courants de Foucault, lesquelles varient en fonction du carré de la fréquence ou sont indépendantes de la fréquence.

Pour déterminer ces pertes, les trois essais suivants doivent être réalisés:

- une mesure traditionnelle en courant continu pour évaluer la valeur de la résistance ohmique et par conséquent la perte ohmique (P_{Ω}) au courant assigné;
- une mesure traditionnelle réalisée conformément à l'IEC 60076 et en tenant compte de la composante fondamentale des courants à la fréquence assignée f_1 (16,7 Hz, 50 Hz, 60 Hz). La valeur des pertes P_1 sera obtenue ainsi:

$$P_1 = P_{\Omega} + P_{F1} + P_K$$

- une mesure comme ci-dessus mais effectuée à une fréquence $f_2 \geq 2 f_1$; la valeur des pertes P_2 sera obtenue ainsi:

$$P_2 = P_{\Omega} + P_{F2} + P_K = P_{\Omega} + r^2 \times P_{F1} + P_K$$

Il est admis de faire cette mesure avec un courant de 10 % à 20 % du courant assigné, mais les pertes mesurées doivent être recalculées au courant assigné.

En résolvant les deux composantes des pertes en charge par courants de Foucault, on obtient:

$$P_{F1} = \frac{P_2 - P_1}{r^2 - 1}$$

$$P_K = \frac{P_1 r^2 - P_2 + P_{\Omega} \times (1 - r^2)}{r^2 - 1}$$

et on peut alors calculer les pertes en charge P_T du redresseur en service au courant de service assigné de manière simplifiée ainsi:

$$P_T = (P_{\Omega} + P_K) \times \left(\frac{I_{NT}}{I_N} \right)^2 + P_{F1} \times \sum_{h=1}^n h^2 \times \left(\frac{I_h}{I_N} \right)^2$$

On doit tenir compte de la fraction des pertes par courants de Foucault variant en fonction du carré de la fréquence et indépendantes de la fréquence dans l'extrapolation de la température des pertes.

On doit considérer que les pertes dépendant du carré de la fréquence varient indirectement avec la température et que les pertes additionnelles indépendantes de la fréquence varient directement avec la température comme les pertes ohmiques.

Annexe D (informative)

Evaluation du comportement du transformateur de traction

D.1 Evaluation des pertes

Les transformateurs de traction sont soumis à des surcharges importantes, mais peuvent également fonctionner dans des conditions de sous-charge pendant de longues périodes. Il est recommandé de porter ce fait à l'attention du constructeur à qui il convient de chiffrer comme il faut les pertes en charge et à vide pour satisfaire aux besoins de l'acheteur. Il est recommandé que l'acheteur donne une indication à cet égard. A cette fin, une formule de capitalisation peut être indiquée dans l'appel d'offres; la formule peut inclure les termes suivants:

$$C_t = C_1 + A \times P_0 + B \times P_I$$

où

- C_t est le prix capitalisé du transformateur,
- C_1 est le prix d'achat du transformateur,
- A, B sont les facteurs (valeur monétaire du kilowatt) stipulés dans l'appel d'offres,
- P_0 est la perte à vide garantie en kilowatt,
- P_I est la perte en charge garantie (I^2R + courant vagabond) en kilowatt (voir IEC 60076 et 4.2, selon le cas).

D.2 Propriétés magnétiques

Conformément à 5.7, les informations suivantes peuvent aider à la conception de l'installation et il convient de les fournir au besoin:

a) Paramètres

- perméabilité relative moyenne μ ;
- longueur équivalente du circuit magnétique l [m];
- section moyenne du circuit magnétique s [m²];
- facteur de couplage magnétique Ξ (précision exigée 10⁻⁶);
- inductance mutuelle M [H].

Pour les définitions, se reporter à l'IEC 60050-121.

b) Caractéristiques du circuit magnétique

- caractéristiques de l'acier à usage électrique (désignation et épaisseur);
- pertes spécifiques maximales (W/kg) pour 1,5 T et 1,7 T à 50 Hz.

Annexe E (informative)

Informations pour les offres et les commandes

E.1 Informations à fournir dans l'appel d'offres

E.1.1 Généralités

- a) norme applicable (confirmation de la présente norme);
- b) type de transformateur de traction (voir Article 1);
- c) puissance assignée des enroulements primaires et secondaires [kVA ou MVA];
- d) groupes de vecteurs et montages (nombre de secondaires);
- e) type sec, immergé dans un liquide ou immergé dans l'huile.

E.1.2 Caractéristiques

- a) fréquence assignée;
- b) tension assignée côté primaire;
- c) tension(s) assignée(s) côté(s) secondaire(s);
- d) tension d'isolement assignée côté primaire;
- e) tension d'isolement assignée côté(s) secondaire(s);
- f) tension de tenue à la fréquence industrielle côté primaire;
- g) tension de tenue à la fréquence industrielle côté(s) secondaire(s);
- h) prises côté primaire ou secondaire et type de changeur de prises (en charge, hors tension ou plaque à bornes);
- i) classe de service ou cycle de charge;
- j) tension de court-circuit pour chaque paire d'enroulements;
- k) niveau de court-circuit côté réseau d'alimentation;
- l) niveau de court-circuit côté réseau de traction en flux inverse d'énergie (le cas échéant);
- m) type de convertisseur et montage du convertisseur si le transformateur alimente un convertisseur;
- n) exigences concernant le niveau de bruit;
- o) tolérances en termes d'impédance entre le primaire et chaque secondaire;
- p) déséquilibre maximal entre l'enroulement primaire et chaque enroulement secondaire;
- q) tolérances en termes de rapport de tension entre le primaire et chaque secondaire;
- r) déséquilibre maximal entre l'enroulement primaire et chaque enroulement secondaire;
- s) demande de protection contre le transfert des surtensions;
- t) exigences concernant les classes d'isolement des enroulements.

E.1.3 Conditions de service

- a) utilisation à l'intérieur/extérieur;
- b) conditions de service différant des conditions normalisées données à l'Article 4;
- c) autres conditions d'environnement si elles diffèrent de celles spécifiées dans la IEC 60076-1;
- d) plage des tensions d'alimentation;
- e) gamme des fréquences d'alimentation;
- f) dispositions pour la mise à la terre.

E.1.4 Auxiliaires

- a) caractéristiques (tension, courant alternatif ou courant continu, puissance disponible, niveau de court-circuit, etc.) de la ou des alimentations auxiliaires;
- b) équipements auxiliaires ou accessoires devant être inclus dans la fourniture;
- c) dispositifs pour le transport (rouleaux, patins, pieds).

E.1.5 Fonctionnement et accessoires

- a) type de refroidissement;
- b) charges différentes exigées pour un refroidissement partiel;
- c) exigences de résistance au feu (pour les transformateurs de type sec);
- d) type d'extrémités à fournir, c'est-à-dire traversées, boîtes à câbles et détails des câbles, dimensions des presse-étoupes, rayons de courbure;
- e) accessoires exigés et leurs emplacements, c'est-à-dire commutateurs de prises, indicateurs de température des enroulements, etc.;
- f) conditions spéciales, le cas échéant, par ex: restrictions dimensionnelles et limitations de transport.

E.1.6 Essais

- a) liste des essais en plus des essais individuels (essais de type et essais supplémentaires/particuliers);
- b) méthodes de calcul des pertes pour les transformateurs convertisseurs de traction;
- c) méthode d'évaluation des échauffements pendant des surcharges de courte durée.

E.2 Informations à fournir dans l'offre

Il convient que le soumissionnaire fournisse une confirmation des caractéristiques exigées et, s'il le faut, les détails suivants:

- a) impédance entre chaque paire d'enroulements dans les tolérances stipulées (valeur garantie);
- b) résistance de chaque enroulement (tolérances à stipuler) (valeur garantie);
- c) matériaux des enroulements;
- d) classes d'isolement des enroulements;
- e) pertes à vide;
- f) pertes en charge dans les enroulements au courant assigné ou bien au courant de base (pour les transformateurs convertisseurs de traction, avec des pertes additionnelles dues au résidu harmonique; pour les transformateurs avec deux secondaires, il est recommandé que les pertes se réfèrent au courant assigné secondaire);
- g) poids de l'huile (le cas échéant);
- h) dimensions à l'expédition et poids;
- i) courant à vide;
- j) courant d'appel;
- k) facteur de puissance en court-circuit;
- l) diagrammes et diagrammes équivalents appropriés pour montrer les relations entre les paramètres électriques.

Bibliographie

IEC 60050 (toutes les parties), *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI)*

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

IEC 62236-5:2008, *Applications ferroviaires – Compatibilité électromagnétique – Partie 5: Emission et immunité des installations fixes d'alimentation de puissance et des équipements associés*

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