

TECHNICAL SPECIFICATION

SPECIFICATION TECHNIQUE



Rotating electrical machines –

Part 25: AC electrical machines used in power drive systems – Application guide

Machines électriques tournantes –

Partie 25: Machines électriques à courant alternatif utilisées dans les entraînements électriques de puissance – Guide d'application

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TS 60034-25:2014



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.

TECHNICAL SPECIFICATION

SPECIFICATION TECHNIQUE



Rotating electrical machines –

Part 25: AC electrical machines used in power drive systems – Application guide

Machines électriques tournantes –

Partie 25: Machines électriques à courant alternatif utilisées dans les entraînements électriques de puissance – Guide d'application

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX

XC

ICS 29.160

ISBN 978-2-8322-1876-1

Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor.

Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.

CONTENTS

FOREWORD.....	8
INTRODUCTION.....	10
1 Scope.....	11
2 Normative references	11
3 Terms and definitions	12
4 System characteristics.....	14
4.1 General.....	14
4.2 System information	14
4.3 Torque/speed considerations	15
4.3.1 General	15
4.3.2 Torque/speed capability.....	15
4.3.3 Electrical machine rating.....	16
4.3.4 Limiting factors on torque/speed capability	16
4.3.5 Safe operating speed, over-speed capability and over-speed test.....	16
4.3.6 Cooling arrangement	17
4.3.7 Voltage/frequency characteristics	17
4.3.8 Resonant speed bands	18
4.3.9 Duty cycles.....	18
4.4 Electrical machine requirements	19
5 Losses and their effects (for induction electrical machines fed from voltage source converters).....	21
5.1 General.....	21
5.2 Location of the additional losses due to converter supply and ways to reduce them.....	22
5.3 Converter features to reduce the electrical machine losses.....	23
5.3.1 Reduction of fundamental losses	23
5.3.2 Reduction of additional losses due to converter supply	23
5.4 Use of filters to reduce additional electrical machine losses due to converter supply.....	24
5.5 Temperature influence on life expectancy	24
5.6 Determination of electrical machine efficiency.....	25
6 Acoustic noise, vibration and torsional oscillation	25
6.1 Acoustic noise	25
6.1.1 General	25
6.1.2 Changes in noise emission due to changes in speed	25
6.1.3 Magnetically excited noise	26
6.1.4 Sound power level determination and limits	27
6.2 Vibration (excluding torsional oscillation)	28
6.2.1 General	28
6.2.2 Vibration level determination and limits.....	28
6.3 Torsional oscillation	29
7 Electrical machine insulation electrical stresses	29
7.1 General.....	29
7.2 Causes	29
7.3 Winding electrical stress	31
7.4 Limits and responsibility.....	33

7.4.1	Electrical machines design for low voltage($\leq 1\,000\text{ V}$).....	33
7.4.2	Electrical machines designed for medium and high voltage ($> 1\,000\text{ V}$)	34
7.5	Methods of reduction of voltage stress	34
7.6	Insulation stress limitation.....	35
8	Bearing currents	36
8.1	Sources of bearing currents in converter-fed electrical machines	36
8.1.1	General	36
8.1.2	Magnetic asymmetry	36
8.1.3	Electrostatic build-up	36
8.1.4	High-frequency voltages	36
8.2	Generation of high-frequency bearing currents.....	36
8.2.1	General	36
8.2.2	Circulating current	37
8.2.3	Shaft earthing current	37
8.2.4	Capacitive discharge current	37
8.3	Common-mode circuit	38
8.3.1	General	38
8.3.2	System common-mode current flow	38
8.4	Stray capacitances.....	38
8.4.1	General	38
8.4.2	Major component of capacitance	39
8.4.3	Other capacitances.....	39
8.5	Consequences of excessive bearing currents.....	40
8.6	Preventing high-frequency bearing current damage	40
8.6.1	Basic approaches	40
8.6.2	Other preventive measures.....	41
8.6.3	Other factors and features influencing the bearing currents	42
8.7	Additional considerations for electrical machines fed by high voltage source converters.....	43
8.7.1	General	43
8.7.2	Bearing protection of cage induction, brushless synchronous and permanent magnet electrical machines	43
8.7.3	Bearing protection for slip-ring electrical machines and for synchronous electrical machines with brush excitation	43
8.8	Bearing current protection for electrical machines fed by high-voltage current source converters	44
9	Installation.....	44
9.1	Earthing, bonding and cabling.....	44
9.1.1	General	44
9.1.2	Earthing.....	44
9.1.3	Bonding of electrical machines	44
9.1.4	Electrical machine power cables for high switching frequency converters	45
9.2	Reactors and filters.....	49
9.2.1	General	49
9.2.2	Output reactors.....	49
9.2.3	Voltage limiting filter (du/dt filter)	49
9.2.4	Sinusoidal filter.....	49
9.2.5	Electrical machine termination unit	50
9.3	Power factor correction	50

9.4	Integral electrical machines (integrated electrical machine and drive modules)	51
10	Additional considerations for permanent magnet (PM) synchronous electrical machines fed by voltage source converters	51
10.1	System characteristics	51
10.2	Losses and their effects	51
10.3	Noise, vibration and torsional oscillation	52
10.4	Electrical machine insulation electrical stresses	52
10.5	Bearing currents	52
10.6	Particular aspects of permanent magnets	52
11	Additional considerations for cage induction electrical machines fed by high voltage source converters	52
11.1	General	52
11.2	System characteristics	53
11.3	Losses and their effects	54
11.3.1	Additional losses in the stator and rotor winding	54
11.3.2	Measurement of additional losses	54
11.4	Noise, vibration and torsional oscillation	54
11.5	Electrical machine insulation electrical stresses	55
11.5.1	General	55
11.5.2	Electrical machine terminal overvoltage	55
11.5.3	Stator winding voltage stresses in converter applications	55
11.6	Bearing currents	57
12	Additional considerations for synchronous electrical machines fed by voltage source converters	57
12.1	System characteristics	57
12.2	Losses and their effects	57
12.3	Noise, vibration and torsional oscillation	57
12.4	Electrical machine insulation electrical stresses	57
12.5	Bearing currents	57
13	Additional considerations for cage induction electrical machines fed by block-type current source converters	58
13.1	System characteristics (see Figures 30 and 31)	58
13.2	Losses and their effects	59
13.3	Noise, vibration and torsional oscillation	61
13.4	Electrical machine insulation electrical stresses	61
13.5	Bearing currents	61
13.6	Additional considerations for six-phase cage induction electrical machines	61
14	Additional considerations for synchronous electrical machines fed by LCI	62
14.1	System characteristics	62
14.2	Losses and their effects	63
14.3	Noise, vibration and torsional oscillation	63
14.4	Electrical machine insulation electrical stresses	63
14.5	Bearing currents	63
15	Additional considerations for cage induction electrical machines fed by pulsed current source converters (PWM CSI)	64
15.1	System characteristics (see Figure 34)	64
15.2	Losses and their effects	65
15.3	Noise, vibration and torsional oscillation	65

15.4	Electrical machine insulation electrical stresses	65
15.5	Bearing currents	65
16	Wound rotor induction (asynchronous) electrical machines supplied by voltage source converters in the rotor circuit	65
16.1	System characteristics	65
16.2	Losses and their effects	65
16.3	Noise, vibration and torsional oscillation	66
16.4	Electrical machine insulation electrical stresses	66
16.5	Bearing currents	66
17	Other electrical machine/converter systems	66
17.1	Drives supplied by cyclo-converters	66
17.2	Wound rotor induction (asynchronous) electrical machines supplied by current source converters in the rotor circuit	68
18	Special consideration for standard fixed-speed induction electrical machines in the scope of IEC 60034-12 when fed from voltage source converter	68
18.1	Torque derating during converter operation	68
18.2	Losses and their effects	70
18.3	Noise, vibrations and torsional oscillation	70
18.4	Electrical machine insulation electrical stresses	70
18.5	Bearing currents	71
18.6	Maximum safe operating speed	72
19	Additional considerations for synchronous reluctance electrical machine fed by voltage source converters	72
19.1	System characteristics	72
19.2	Losses and their effects	72
19.3	Noise, vibration and torsional oscillation	72
19.4	Electrical machine insulation electrical stresses	73
19.5	Bearing currents	73
19.6	Particular aspects of synchronous reluctance electrical machines	73
Annex A	(informative) Converter characteristics	74
A.1	Converter control types	74
A.1.1	General	74
A.1.2	Converter type considerations	75
A.2	Converter output voltage generation (for voltage source converters)	76
A.2.1	Pulse width modulation (PWM)	76
A.2.2	Hysteresis (sliding mode)	76
A.2.3	Influence of switching frequency	76
A.2.4	Multi-level converters	78
A.2.5	Parallel converter operation	78
Annex B	(informative) Output characteristics of 2 level voltage source converter spectra	79
Annex C	(informative) Voltages to be expected at the power interface between converter and electrical machine	83
Figure 1	– Torque/speed capability	15
Figure 2	– Converter output current	16
Figure 3	– Examples of possible converter output voltage/frequency characteristics	18

Figure 4 – Example for the dependence of the electrical machine losses caused by harmonics P_h , related to the losses P_{f1} at operating frequency f_1 , on the switching frequency f_s in case of 2 level voltage source converter supply	22
Figure 5 – Example of measured losses P_L as a function of frequency f and supply type	23
Figure 6 – Additional losses ΔP_L of an electrical machine (same electrical machine as Figure 5) due to converter supply, as a function of pulse frequency f_p , at 50 Hz rotational frequency	24
Figure 7 – Relative fan noise as a function of fan speed	26
Figure 8 – Vibration modes of the stator core	27
Figure 9 – Typical surges at the terminals of an electrical machine fed from a PWM converter	30
Figure 10 – Typical voltage surges on one phase at the converter and at the electrical machine terminals (2 ms/division)	31
Figure 11 – Individual short rise-time surge from Figure 10 (1 μ s/division)	31
Figure 12 – Definition of the rise-time t_r of the voltage pulse at the electrical machine terminals	32
Figure 13 – First turn voltage as a function of the rise-time	33
Figure 14 – Discharge pulse occurring as a result of converter generated voltage surge at electrical machine terminals (100 ns/division)	35
Figure 15 – Possible bearing currents	37
Figure 16 – Electrical machine capacitances	39
Figure 17 – Bearing pitting due to electrical discharge (pit diameter 30 μ m to 50 μ m)	40
Figure 18 – Fluting due to excessive bearing current	40
Figure 19 – Bonding strap from electrical machine terminal box to electrical machine frame	45
Figure 20 – Examples of shielded electrical machine cables and connections	46
Figure 21 – Parallel symmetrical cabling of high-power converter and electrical machine	47
Figure 22 – Converter connections with 360° HF cable glands showing the Faraday cage	47
Figure 23 – Electrical machine end termination with 360° connection	48
Figure 24 – Cable shield connection	48
Figure 25 – Characteristics of preventative measures	50
Figure 26 – Schematic of typical three-level converter	53
Figure 27 – Output voltage and current from typical three-level converter	53
Figure 28 – Typical first turn voltage ΔU (as a percentage of the line-to-ground voltage) as a function of du/dt	55
Figure 29 – Medium-voltage and high-voltage form-wound coil insulating and voltage stress control materials	56
Figure 30 – Schematic of block-type current source converter	58
Figure 31 – Current and voltage waveforms of block-type current source converter	58
Figure 32 – Influence of converter supply on the losses of a cage induction electrical machine (frame size 315 M, design N) with rated values of torque and speed	60
Figure 33 – Schematic and voltage and current waveforms for a synchronous electrical machine supplied from a current source converter	62
Figure 34 – Schematic of pulsed current source converter	64
Figure 35 – Voltages and currents of pulsed current source converter	64

Figure 36 – Schematic of cyclo-converter	66
Figure 37 – Voltage and current waveforms of a cyclo-converter.....	67
Figure 38 – Fundamental voltage U_1 as a function of operating frequency f_1	69
Figure 39 – Torque derating factor for cage induction electrical machines of design N, IC 0141 (self-circulating cooling) as a function of operating frequency f_1 (example).....	70
Figure 40 – Limiting curve of admissible impulse voltage $\hat{U}_{LL}/U_N$ (peak value of line to line voltage including voltage reflection and damping/rated voltage) at the electrical machine terminals as a function of the rise-time t_r	71
Figure A.1 – Effects of switching frequency on electrical machine and converter losses.....	77
Figure A.2 – Effects of switching frequency on acoustic noise.....	77
Figure A.3 – Effects of switching frequency on torque ripple	78
Figure B.1 – Waveform of line-to-line voltage U_{LL} for voltage source converter supply with switching frequency $f_s = 30 \times f_1$ (example).....	79
Figure B.2 – Typical frequency spectra of converter output voltage.....	80
Figure B.3 – Typical frequency spectra of converter output voltage.....	80
Figure B.4 – Typical spectra of converter output voltage	81
Figure B.5 – Typical time characteristics of electrical machine current.....	81
Figure B.6 – Typical time characteristics of electrical machine current.....	82
Figure C.1 – Example of typical voltage curves and parameters of a two level inverter versus time at the electrical machine terminals (phase to phase voltage; taken from IEC TS 61800-8).....	83
Table 1 – Significant factors affecting torque/speed capability	16
Table 2 – Electrical machine design considerations	19
Table 3 – Electrical machine parameters for the tuning of the converter.....	20
Table 4 – Operating voltage at the terminals in units of U_N where the electrical machines may operate reliably without special agreements between manufacturers and system integrators	34
Table 5 – Effectiveness of bearing current countermeasures	42

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

ROTATING ELECTRICAL MACHINES –

**Part 25: AC electrical machines used in power drive systems –
Application guide**

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.

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

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

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

IEC 60034-25, which is a technical specification, has been prepared by IEC technical committee 2: Rotating machinery.

This third edition of IEC TS 60034-25 cancels and replaces the second edition of IEC TS 60034-25, published in 2007, and the fourth edition of IEC TS 60034-17, published in 2006. It constitutes a technical revision.

The main technical changes with regard to the previous editions of IEC TS 60034-25 and IEC TS 60034-17 are as follows:

- a) merging of IEC TS 60034-17 into IEC TS 60034-25 adding Clause 18 which now includes all specific requirements for standard non-definite purpose electric machines. General information and knowledge have been combined with the other Clauses of IEC TS 60034-25;
- b) replacement of “U Converter” with “voltage source converter”;
- c) replacement of “I Converter” with “current source converter”;
- d) redrafting of Clause 7;
- e) addition of Subclause 9.2.6;
- f) removal of Annex C: Noise increments due to converter supply.

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

Enquiry draft	Report on voting
2/1731/DTS	2/1750/RVC

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

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

NOTE A table of cross-references of all IEC TC 2 publications can be found on the IEC TC 2 dashboard on the IEC website.

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

- transformed into an International standard,
- 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

The performance characteristics and operating data for converter-fed electrical machines are influenced by the complete drive system, comprising supply system, converter, cabling, electrical machine, mechanical shafting and control equipment. Each of these components exists in numerous technical variants. Any values quoted in this technical specification are thus indicative only.

In view of the complex technical interrelations within the system and the variety of operating conditions, it is beyond the scope and object of this technical specification to specify numerical or limiting values for all the quantities which are of importance for the design of the power drive system.

To an increasing extent, it is the practice that power drive systems consist of components produced by different manufacturers. The object of this technical specification is to explain, as far as possible, the influence of these components on the design of the electrical machine and its performance characteristics.

This technical specification deals with both a.c. electrical machines which are specifically designed for converter supply and converter-fed electrical machines within the scope of IEC 60034-12, which are designed originally for mains supply.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TS 60034-25:2014

ROTATING ELECTRICAL MACHINES –

Part 25: AC electrical machines used in power drive systems – Application guide

1 Scope

This part of IEC 60034 describes the performance characteristics of a.c. electrical machines for use on converter supplies. For electrical machines specifically designed for converter duty application design features are defined. It also specifies the interface parameters and interactions between the electrical machine and the converter including installation guidance as part of a power drive system, but except for the voltage at the power interface which is described in IEC 61800-8.

The general requirements of relevant parts of the IEC 60034 series of standards also apply to electrical machines within the scope of this technical specification.

For electrical machines operating in potentially explosive atmospheres, additional requirements as described in the IEC 60079 series or IEC 61241 series for dust ignition proof apply.

This technical specification is not primarily concerned with safety. However, some of its recommendations may have implications for safety, which should be considered as necessary.

Where a converter manufacturer provides specific installation recommendations, they should take precedence over the recommendations of this technical specification.

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 60034-1:2010, *Rotating electrical machines – Part 1: Rating and performance*

IEC 60034-2-1, *Rotating electrical machines – Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles)*

IEC 60034-2-2, *Rotating electrical machines – Part 2-2: Specific methods for determining separate losses of large machines from tests – Supplement to IEC 60034-2-1*

IEC 60034-2-3, *Rotating electrical machines – Part 2-3: Specific test methods for determining losses and efficiency of converter-fed AC induction motors*

IEC 60034-6, *Rotating electrical machines – Part 6: Methods of cooling (IC Code)*

IEC 60034-9:2003, *Rotating electrical machines – Part 9: Noise limits*
Amendment 1:2007

IEC 60034-12, *Rotating electrical machines – Part 12: Starting performance of single-speed three-phase cage induction motors*

IEC 60034-14:2003, *Rotating electrical machines – Part 14: Mechanical vibration of certain machines with shaft heights 56 mm and higher – Measurement, evaluation and limits of vibration severity*
Amendment 1:2007

IEC TS 60034-18-41:2014, *Rotating electrical machines – Part 18-41: Partial discharge free electrical insulation systems (Type I) used in rotating electrical machines fed from voltage converters – Qualification and quality control tests*

IEC TS 60034-18-42, *Rotating electrical machines – Part 18-42: Qualification and acceptance tests for partial discharge resistant electrical insulation systems (Type II) used in rotating electrical machines fed from voltage converters*

IEC 60050 (all parts): *International Electrotechnical Vocabulary* (available at <http://www.electropedia.org>)

IEC TR 61000-5-1, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5: Installation and mitigation guidelines – Section 1: General considerations – Basic EMC publication*

IEC TR 61000-5-2, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5: Installation and mitigation guidelines – Section 2: Earthing and cabling*

IEC 61800-2:1998, *Adjustable speed electrical power drive systems – Part 2: General requirements – Rating specifications for low voltage adjustable frequency a.c. power drive systems*

IEC 61800-3, *Adjustable speed electrical power drive systems – Part 3: EMC requirements and specific test methods*

IEC 61800-5-1, *Adjustable speed electrical power drive systems – Part 5-1: Safety requirements – Electrical, thermal and energy*

IEC TS 61800-8:2010, *Adjustable speed electrical power drive systems – Part 8: Specification of voltage on the power interface*

IEC TS 62578:2009, *Power electronics systems and equipment – Operation conditions and characteristics of active infeed converter applications*

3 Terms and definitions

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

3.1

bearing voltage ratio

BVR

ratio of the capacitively coupled bearing voltage to the common-mode voltage

3.2

bonding

electrical connection of metallic parts of an installation together and to ground (earth)

Note 1 to entry: For the purposes of this part of IEC 60034, this definition combines elements of IEC 60050-195:1998, 195-01-10 (equipotential bonding) and 195-01-16 (functional equipotential bonding).

3.3

common-mode voltage (current)

arithmetic mean of the phase voltages (currents) to earth

3.4

converter

unit for electronic power conversion, changing one or more electrical characteristics and comprising one or more electronic switching devices and associated components, such as transformers, filters, commutation aids, controls, protections and auxiliaries, if any

Note 1 to entry: This definition is taken from IEC 61800-2 and, for the purposes of this technical specification, embraces the terms complete drive module (CDM) and basic drive module (BDM) as used in the IEC 61800 series.

[SOURCE: IEC 61800-2:1998, 2.2.1, modified (Note 1 to entry added)]

3.5

converter-fed electrical machine

electrical machine fed from a frequency converter independent of whether it is specifically designed for converter supply or whether it is an electrical machine within the scope of IEC 60034-12 which is designed originally for main supply

3.6

fixed-speed electrical machine

electrical machine rated by output power for 50 Hz and/or 60 Hz on-line operation

Note 1 to entry: Fixed-speed electrical machines may be capable of frequency converter operation with variable speed.

3.7

electromagnetic compatibility

EMC

ability of an equipment or system to function satisfactorily in its electromagnetic environment without introducing intolerable electromagnetic disturbances to anything in that environment

[SOURCE: IEC 60050-161:1990, 161-01-07]

3.8

field weakening

electrical machine operating mode where electrical machine flux is less than the flux corresponding to the electrical machine rating

3.9

rise time

time interval between the 10 % and 90 % points of the zero-to-peak voltage (see Figure 12)

3.10

power drive system

PDS

system consisting of power equipment (composed of converter section, a.c. electrical machine and other equipment such as, but not limited to, the feeding section), and control equipment (composed of switching control – on/off for example – voltage, frequency, or current control, firing system, protection, status monitoring, communication, tests, diagnostics, process interface/ port, etc.)

3.11

protective earthing

PE

earthing a point or points in a system or in an installation or in equipment for the purposes of electrical safety

[SOURCE: IEC 60050-195:1998, 195-01-11, modified ("electrical" added before "safety")]

3.12

skip band

small band of operating frequencies where steady-state operation of the PDS is inhibited

3.13

surface transfer impedance

quotient of the voltage induced in the centre conductor of a coaxial line per unit length by the current on the external surface of the coaxial line

[SOURCE: IEC 60050-161:1990, 161-04-15]

3.14

system integrator

person or organization which brings the components of PDS together according to his scope of supply and has therefore the system responsibility

3.15

rated voltage

U_N

voltage assigned by the manufacturer for a specified power frequency operating condition of an electrical machine and indicated on its rating plate

3.16

jump voltage

change in voltage at the terminals of the electrical machine occurring at the start of each impulse when fed from a converter

4 System characteristics

4.1 General

Although the steps in specifying electrical machine and converter features are similar for any application, the final selections are greatly influenced by the type of application. In this clause, these steps are described and the effects of various application load types are discussed.

4.2 System information

Complete application information that considers the driven load, electrical machine, converter, and utility power supply, is the best way to achieve the required performance of the entire system. In general, this information should include

- the power or torque requirements at various speeds;
- the desired speed range of the load and electrical machine;
- the acceleration and deceleration rate requirements of the process being controlled;
- starting requirements including the frequency of starts and a description of the load (the inertia seen at the electrical machine shaft, load torque during starting);
- the duty cycle of the application (a continuous process or a combination of starts, stops, and speed changes; see 3.1 of IEC 60034-1:2010);
- a general description of the type of application including the environment in which the PDS components will operate;
- a description of additional functionality that may not be met with the electrical machine and converter only (for example: electrical machine temperature monitoring, ability to bypass the converter if necessary, special sequencing circuits or speed reference signals to control the PDS);
- a description of the available electrical supply power and wiring. The final configuration may be affected by the requirements of the system selected.

4.3 Torque/speed considerations

4.3.1 General

The typical torque/speed characteristics of converter-fed electrical machines, the significant influencing factors and their consequences are shown in Figure 1, Figure 2 and Figure 3. Depending on the performance requirements of the *PDS*, different electrical machine designs are possible for an adaptation of the individual limiting values.

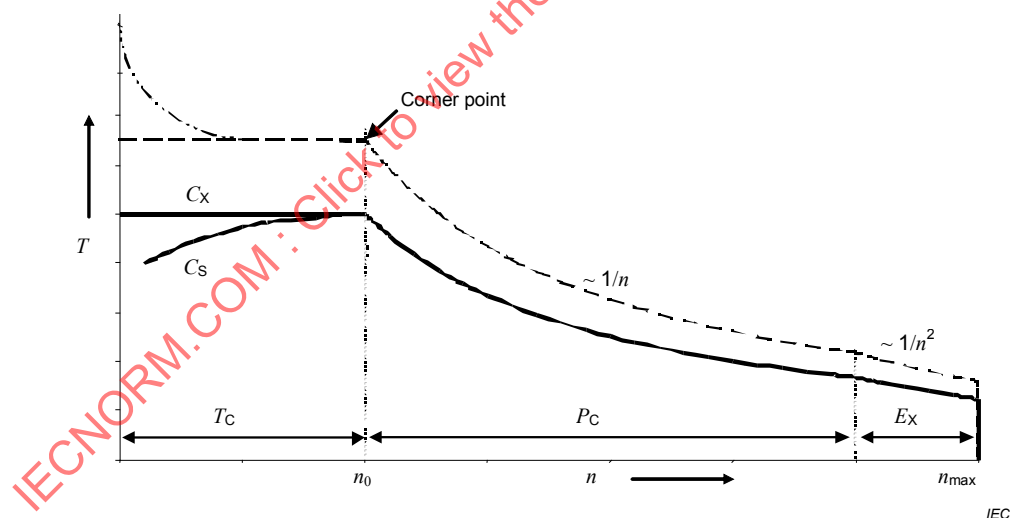
NOTE Figure 1 to Figure 3 do not show the possible skip bands (see 4.3.8).

4.3.2 Torque/speed capability

Figure 1 shows the torque/speed capability of converter-fed electrical machines. The maximum available torque is limited by the rating of the electrical machine and by the current limitation of the converter. Above the field-weakening frequency f_0 and speed n_0 the electrical machine can operate with constant power with a torque proportional to $1/n$. For induction electrical machines, if the minimum breakdown torque (which is proportional to $1/n^2$) is reached, the power has to be further reduced proportional to $1/n$, resulting in torque proportional to $1/n^2$ (extended range). For synchronous electrical machines, the extended range does not apply. The maximum usable speed $n_{\max}$ is limited not only by the reduction of torque due to field-weakening at speeds above n_0 , but also by the mechanical strength and stability of the rotor, by the speed capability of the bearing system, and by other mechanical parameters.

At low frequency, the available torque may be reduced in self-cooled electrical machines to avoid the possibility of overheating.

In some applications, it may be possible to apply a short-time torque boost for starting.



Key

————	Continuous operation	T_C	Constant torque range	C_X	Separate cooling
-----	Short-time operation	P_C	Constant power range	C_S	Self-cooling
.....	Starting torque boost	E_X	Extended range (for induction electrical machines)		

Figure 1 – Torque/speed capability

Figure 2 shows the corresponding converter output current (I) capability.

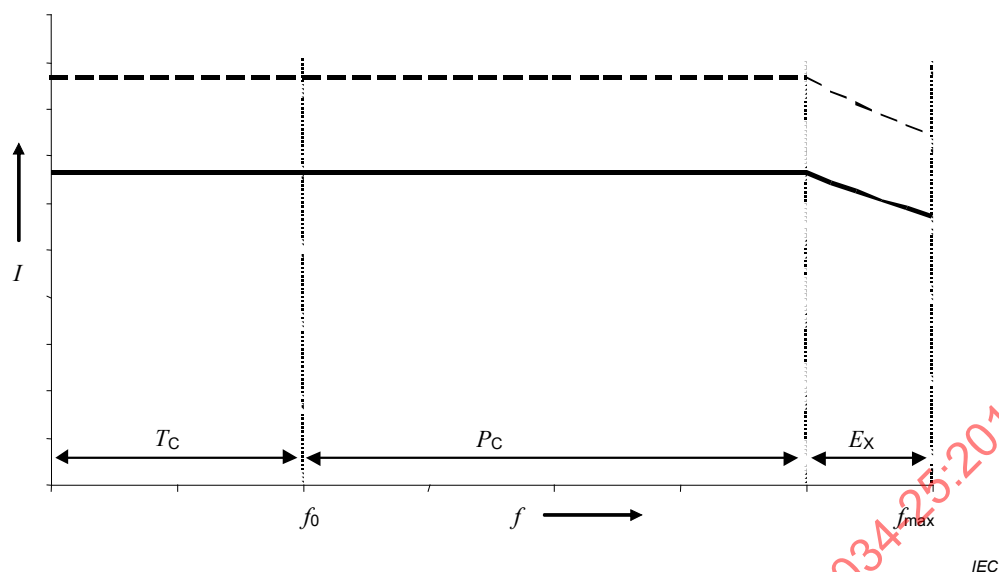


Figure 2 – Converter output current

4.3.3 Electrical machine rating

The rated point, where the electrical machine designed for converter application has its rated speed, rated voltage, rated current, rated torque and rated power, is in general the point where the electrical machine delivers its maximum torque and power. i.e. the point at n_0 corner point in Figure 1 where $n_N = n_0$. The maximum operational speed can be higher than the rated speed and depending on the voltage frequency characteristics (see 4.3.7) the maximum operational voltage can exceed the rated voltage.

4.3.4 Limiting factors on torque/speed capability

The significant factors which influence the torque/speed capability are shown in Table 1.

Table 1 – Significant factors affecting torque/speed capability

Condition	Electrical machine	Converter
Breakaway	Maximum flux capability	Maximum current
Constant flux	Cooling (I^2R losses)	Maximum current
Field-weakening (reduced flux)	Maximum speed (mechanical strength and stability) Maximum torque (breakdown torque)	Maximum voltage
Dynamic response	Equivalent circuit parameters (determined by modelling)	Control capability

4.3.5 Safe operating speed, over-speed capability and over-speed test

For an electrical machine designed for converter application, the electrical machine should be defined by the manufacturer and should be given on the rating plate. For low voltage cage induction motors the safe operating speed is defined in 9.6 of IEC 60034-1:2010.

The over-speed of a.c. electrical machines is defined in 9.7 of IEC 60034-1:2010, but an over-speed test is not normally considered necessary. The intention of a test, if specified and agreed, is to check the integrity of the rotor design with respect to centrifugal forces. Although for a fixed-speed electrical machine it is practically impossible to reach an operating speed above its synchronous speed, electrical generators can be accelerated above their synchronous speed by the turbine, for example in case of a sudden load rejection.

For converter-fed electrical machines, an acceleration to a speed higher than the maximum operational speed determined in the control of the converter is unlikely. Especially for large 'super synchronous' electrical machines, it is often beneficial to design an electrical machine for a maximum over-speed of 1,05 times the maximum operation speed. Test may also be performed at 1,05 times maximum operating speed. There is no technically justified argument against such agreement.

It should be appreciated that with high speed running fine balancing of the rotor may be required. If the high speed is required for more than short periods the bearing life may be reduced. Also, for high-speed applications, special attention should be paid to both the grease service life and the re-greasing interval.

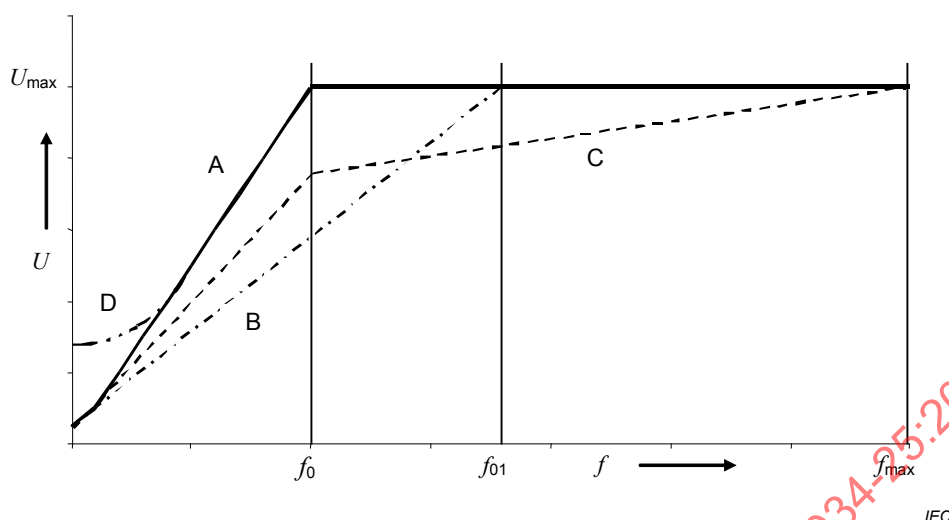
4.3.6 Cooling arrangement

As Figure 1 indicates, the type of cooling influences the maximum torque/speed capability of PDS. Electrical machines with power ratings in the megawatt range often have a cooling arrangement consisting of a primary cooling circuit (usually with air as primary coolant) and a secondary cooling circuit (with air or water as secondary coolant). The losses are transferred via a heat exchanger from the primary into the secondary circuit.

- Where both primary and secondary coolants are moved by a separate device, and their flow is thus independent of the electrical machine's rotor speed (for example, IC656 according to IEC 60034-6), the curve in Figure 1 for separate cooling applies.
- Where the secondary coolant is moved by a separate device and the primary coolant by a shaft-driven device (for example, IC81W or IC616), the curve in Figure 1 for self-cooling applies.
- Where both primary and secondary coolants are moved by a shaft driven device, the output torque should not exceed the curve $T/T_N = n^2/n_0^2$ and the minimum operational speed is recommended to be ≥ 70 % of rated speed.

4.3.7 Voltage/frequency characteristics

The relationship between the converter output voltage (U) and frequency can have several characteristics, as shown in Figure 3.



Key

- A The voltage increases with frequency, and the maximum converter output voltage $U_{\max}$ is achieved at the field-weakening frequency f_0 .
- B The voltage increases with frequency, and the maximum converter output voltage $U_{\max}$ is achieved above f_0 at a new field-weakening frequency f_{01} . This provides an extended speed range at constant flux (constant torque), but the available torque in this speed range is less than that of case A.
- C The voltage increases with frequency up to f_0 , and then increases at a lower rate, the maximum converter output voltage $U_{\max}$ being achieved at $f_{\max}$. This avoids excessive torque reduction in the constant flux range.
- D A voltage boost is applied at very low frequencies to improve starting performance, and to prevent an unwanted increase in current.

In all these cases, the voltage/frequency dependence may be linear or non-linear, according to the torque-speed requirements of the load.

Figure 3 – Examples of possible converter output voltage/frequency characteristics

4.3.8 Resonant speed bands

The speed range of a converter-fed electrical machine may include speeds that can excite resonances in parts of the electrical machine stator, in the electrical machine/load shaft system or in the driven equipment. Depending on the converter, it may be possible to skip the resonant frequencies. However, even when resonant frequencies are skipped, the load will be accelerated through that speed if the electrical machine is set to run at any speed above this resonant speed. Decreasing the acceleration time can help minimize the time spent in resonance. The speed range shall be agreed with machine manufacturer.

4.3.9 Duty cycles

4.3.9.1 General

Cyclic duty applications are those in which transitions between speeds or loads are common (see IEC 60034-1). Several aspects of this type of application affect the electrical machine and the converter.

- Electrical machine heat dissipation is variable, depending on rotation speed and cooling method.
- Torque demands above electrical machine full-load torque may be required. Operation above electrical machine full load torque may be required to accelerate, handle peak loads, and even decelerate the load. Operation above electrical machine rated current will increase electrical machine heating. This may require a higher thermal class of insulation, an electrical machine rated for the overload, or evaluation of the duty cycle to determine if

the electrical machine has enough cooling for the application (see IEC 60034-1, duty type S10).

- D.C. injection, dynamic, or regenerative braking may be required to reduce the electrical machine speed. Regardless of whether the electrical machine is generating torque to drive the application, generating power back to the converter due to the electrical machine being driven by the load, or supplying braking torque during deceleration by applying d.c. current to the windings, electrical machine heating takes place approximately proportionally to the square of the current while applied. This heating should be included in the duty cycle analysis. Furthermore, the transient torques imposed on the shaft by braking should be controlled to a level that will not cause damage.

NOTE IEC 61800-6 provides information on load duty and current determination for the entire PDS.

4.3.9.2 High impact loads

High impact loads are a special case of duty and are encountered in certain intermittent torque applications (for example, IEC 60034-1, duty type S6). In these applications, the load is applied or removed from the electrical machine very quickly. It is also possible for this load torque to be positive (against the direction of rotation of the electrical machine) or negative (in the same direction as electrical machine rotation).

The impact load will result in a rapid increase or decrease in current demand (from the converter). If the torque is negative, the electrical machine may generate current back into the converter. These transient currents create stresses in the stator winding. The magnitude of these transient currents is a function of the size of the converter and of the electrical machine.

4.4 Electrical machine requirements

NOTE This subclause refers mainly to induction electrical machines, but some of the requirements may also be relevant for other electrical machine types.

Table 2 indicates some main individual aspects and design considerations.

Table 2 – Electrical machine design considerations

Required aspect of application	Design consideration
Long-term operation at low speed	Thermal over sizing or forced cooling. For long-term operation of sleeve bearings below 10 % of corner point speed, the bearing performance should be confirmed by the manufacturer. Consideration should be given to the type of grease and greasing intervals.
Large ratio of speeds	Cooling independent of speed (separate fan, or other cooling medium, for example, water)
Speed feedback device	Precautions for mechanical interface. Speed sensor may need to be electrically insulated
High speed (field-weakening)	Mechanical aspects. High breakdown torque (i.e. small leakage reactance). U/f characteristic is constant until $f > f_0$ (see Figure 3)
Improved electrical machine efficiency with converter supply	Rotor cage designs (rotor bars with less skin effect are preferred, see 5.2). May adversely affect line starting capability
Line bypassing or line start capability	Rotor cage design shall be appropriate. Consequently the design may not be optimized to reduce losses and improve efficiency – balanced compromise necessary
High breakaway torque	If possible, increase flux by 10 % to 40 % (depending on electrical machine size) at near-zero frequencies
Voltage drop in the converter because of modulation or filter or cabling	Adaptation of the rated electrical machine voltage to compensate for the voltage drop i.e. the rated voltage of the electrical machine can be lower than the supply voltage to the converter.
Multi-electrical machine operation at approximately synchronized common speed	Similar slip/torque characteristics of the electrical machines

In some applications, the electrical parameters of the electrical machine equivalent circuit (see Table 3 for examples) may be requested from the electrical machine designer for tuning the converter.

Table 3 – Electrical machine parameters for the tuning of the converter

Parameter	Description/explanation	Scalar control	Vector or direct flux and torque control
Maximum values			
Maximum speed		Yes	Yes
Maximum temperatures of the stator and rotor windings		Yes	Yes
Acoustic parameters			
Frequencies which should be skipped by the converter, to avoid acoustic and electrical machine resonances		Yes, if discrete carrier frequencies occur	
Mechanical parameters			
Inertia	For high rates of acceleration	Optional	Optional
Coefficients k_1 and k_2 of friction and cooling fan torque demand ($m = k_1 \times n + k_2 \times n^2$)	For some factory automation or production tasks, when accurate determination of mechanical output power is required	Optional	Optional
Electrical parameters of the T-equivalent circuit diagram for induction electrical machines			
Stator resistance (R_s)	At operating temperature	Optional for IR compensation	Yes
Rotor resistance (R_r') (see NOTE 1)	At operating temperature	Optional for advanced scalar control	Yes
Stator leakage reactance ($X_{\sigma s}$)	At corner point frequency	Optional for advanced scalar control	Yes
Rotor leakage reactance ($X_{\sigma r}'$) (see NOTE 1)	At rated operating point, different from locked-rotor condition	Optional for advanced scalar control	Yes
Magnetizing reactance (X_m)	At corner point frequency and rated operating point	Optional for advanced scalar control	Yes
Magnetizing conductance (G_m)	At corner point frequency and rated operating point	Optional for advanced scalar control	Yes
Magnetizing inductance as a function of voltage.	For field-weakening	Yes, for advanced scalar control	Yes
Lateral critical speed if below maximum operational speed	Speed to be avoided for continuous operation	Yes	Yes
Rotor skin effect, (e.g. ladder equivalent circuit)	For accurate determination of harmonic losses and temperature rise in applications where rapid current response and precise dynamic control is required	Optional	Optional
Stator skin effect		Optional	Optional
NOTE 1 The rotor electrical parameters R_r' and $X_{\sigma r}'$ are as referred to the stator circuit.			
NOTE 2 Some converters do not require motors resistance and reactance values for tuning purposes, as those determine required parameters by themselves.			

Consideration shall be given also to torsional critical speeds where continuous operation at these speeds shall also be avoided.

For improved thermal modelling, or in applications where high torque with precise control is required at low speeds, it may also be useful for the electrical machine designer to supply data on the internal thermal capacitances and resistances of the component parts of the electrical machine. These parameters may be dependent on both rotational and switching frequency.

5 Losses and their effects (for induction electrical machines fed from voltage source converters)

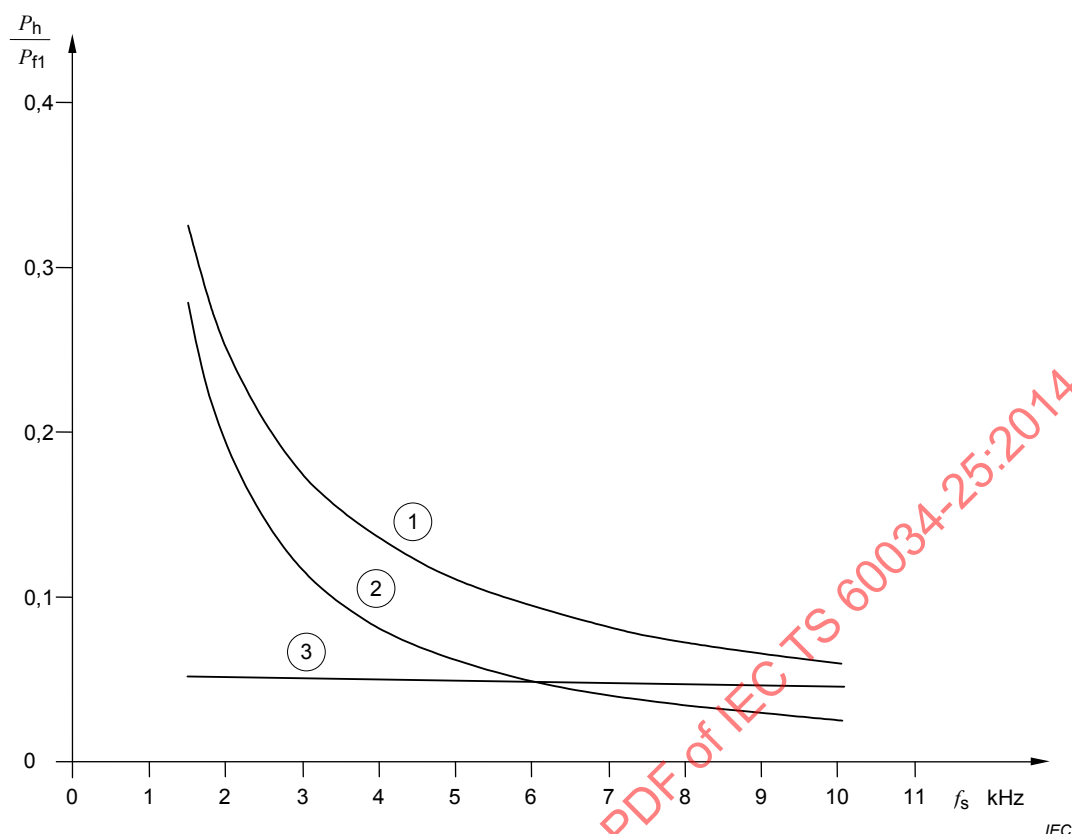
5.1 General

In the case of voltage source converters, a knowledge of the electrical machine equivalent circuit is normally not important for the design of the commutating circuit, but the harmonic impedances of the electrical machine greatly influence the losses caused by harmonics. Voltage source converters impress their output voltage on the associated electrical machines. The output voltage synthesizes a sinusoidal wave using quasi-rectangular voltage pulses, having steep slopes and approximately constant amplitude (two-level converters impress a peak-to-peak value of the intermediate d.c. voltage).

In addition to the well-known losses due to fundamental voltage and current, the non-sinusoidal supply by a converter creates additional losses in the electrical machine. These additional losses depend on speed, voltage and current, the converter output voltage waveform, and the design and size of the electrical machine. If neither series inductances nor filters are provided, these losses can amount up to around 10 % to 30 % of the fundamental losses for two-level converters and thus up to about 1 % to 2 % of the rated output of the electrical machine, decreasing with increasing electrical machine size. For three-level converters, the additional losses due to converter supply are lower, typically 0,2 % to 1 % of rated output.

The magnitude and the characteristic behaviour of the additional losses due to converter supply depend on the design of the electrical machine, the type and parameters of the converter, and the use of filter circuits.

The total value of the additional losses caused by harmonics decrease with increasing switching frequency (see Figure 4). This effect is caused by the small additional winding losses at high switching frequencies.



Key

- 1 Total harmonic losses
- 2 Harmonic winding losses
- 3 Harmonic iron losses

Figure 4 – Example for the dependence of the electrical machine losses caused by harmonics P_h , related to the losses P_{f1} at operating frequency f_1 , on the switching frequency f_s in case of 2 level voltage source converter supply

5.2 Location of the additional losses due to converter supply and ways to reduce them

For the converter output pulses the electrical machine appears as a frequency-dependent impedance. The losses of this impedance are mostly due to skin effect in the conductors (mainly the rotor bars, but in some cases also the stator conductors) and to eddy currents in the leakage flux paths (especially in the laminations).

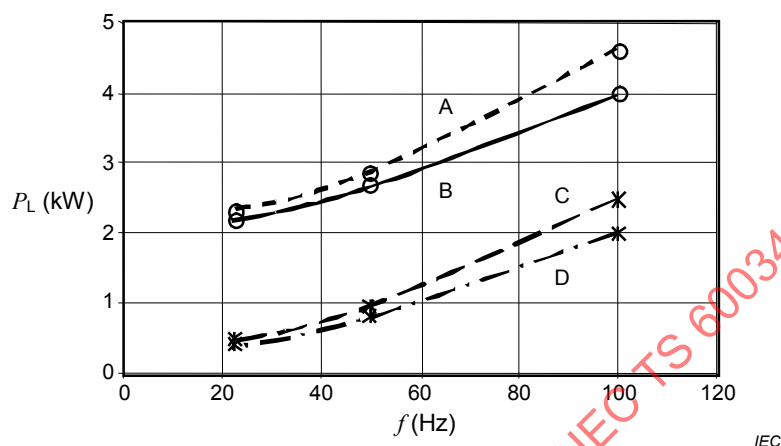
The additional losses due to converter supply can be minimized by various design measures, for example:

- rotor winding design with less skin effect;
- stator winding design with less skin effect;
- open rotor slots;
- avoidance of short-circuits between the rotor laminations;
- thinner stator and rotor laminations, to reduce eddy-current losses;
- reduced eddy current losses in series inductors or filters.

5.3 Converter features to reduce the electrical machine losses

5.3.1 Reduction of fundamental losses

Figure 5 shows examples of the losses at no-load and at full-load for a 37 kW, 50 Hz electrical machine powered from sinusoidal and 5,5 kHz voltage source converter supplies. It can be seen that the additional losses due to PWM supply are small compared with the fundamental losses.



Key

- | | | | |
|-------------------------|--------------------------------|-----------------------|------------------------------|
| A Full load, PWM supply | B Full-load, sinusoidal supply | C No load, PWM supply | D No load, sinusoidal supply |
|-------------------------|--------------------------------|-----------------------|------------------------------|

Figure 5 – Example of measured losses P_L as a function of frequency f and supply type

The most significant benefits of converter supply are achieved by optimizing the electrical machine flux depending on load (for example, reduction of flux at partial load) since this reduces the fundamental losses which are considerably higher than the additional losses. This "flux optimization" is frequently used in pump and fan applications for which the required torque is proportional to the square of the speed. At lower speeds the torque is considerably reduced and can therefore be created with lower flux and with lower losses in the electrical machine.

The same principle is used in the "constant power factor control" in applications where the load torque varies (not necessarily the speed) by adjusting the electrical machine flux according to the need so that the electrical machine current power factor stays at the optimum value.

The fundamental losses may also be reduced by variation of the intermediate d.c. voltage.

5.3.2 Reduction of additional losses due to converter supply

The additional losses due to converter supply may be reduced by reducing the harmonic content of the converter output voltage by, for example:

- optimizing the pulse patterns;
- increasing the switching frequency; typically, the additional losses due to converter supply in the electrical machine show a strong decline with increasing pulse frequency up to a few kHz (see Figure 6). However, the commutation losses in the converter increase with the pulse frequency (see Figure A.1) with the result that the sum of the losses has a minimum at a few kHz. For hysteresis or random PWM controlled converters, an average switching frequency applies which may also depend on voltage and current.
- multi-level converter configuration.

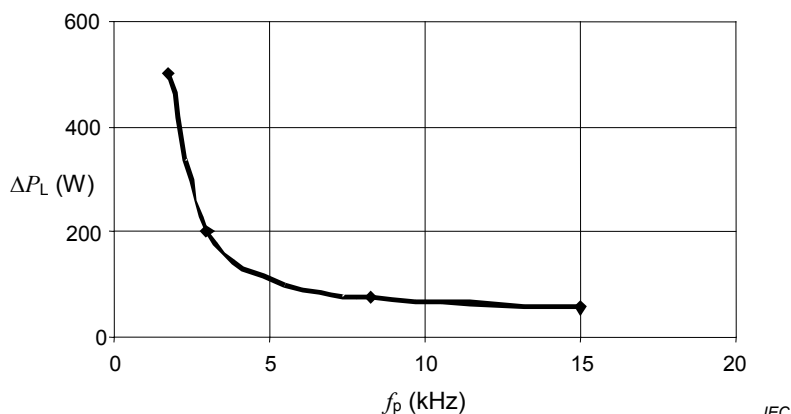


Figure 6 – Additional losses ΔP_L of an electrical machine (same electrical machine as Figure 5) due to converter supply, as a function of pulse frequency f_p , at 50 Hz rotational frequency

5.4 Use of filters to reduce additional electrical machine losses due to converter supply

Filters may be used at the output from a converter to reduce the amplitude and du/dt of the high-frequency switching voltage without excessively affecting the low-frequency resultant voltage appearing at the electrical machine terminals. The total effects will depend on the application and dimensioning of the electrical machine and the filter. The voltage drop across the filter will reduce the voltage at the electrical machine terminals, and this should be taken into account in order to avoid an increase in the fundamental current loss in the electrical machine. Also, there will be some losses in the filter, but these will generally be lower than the reduction of additional electrical machine losses due to converter supply, and so the overall efficiency of the PDS will improve.

In addition to reducing the additional electrical machine losses due to converter supply, such filters may also have a beneficial effect in reduced voltage stress on the electrical machine windings, decreased torque ripple, and improved EMC performance (see 9.2). However, there will be a slowing of the dynamic response of the PDS, and there may be other limitations due to the voltage drop across the filter.

5.5 Temperature influence on life expectancy

The sum of the fundamental and additional losses due to the load condition and the voltage waveform results in a temperature rise of the electrical machine windings. The temperature rise will also be affected by a change in cooling at the operating point within the specified speed range.

There are several ways to take this effect into account, for example:

- use of a separate cooling supply, such as IC0A6 or IC1A7 (see IEC 60034-6) for an air-cooled electrical machine;
- use of a higher thermal insulation class (see IEC 60034-1);
- full compensation for the intended operating ambient temperature (see IEC 60034-1);
- use of oversized electrical machine;
- optimisation of converter output waveform.

NOTE Increased temperatures may affect not only the winding insulation ageing but also the bearing lubrication, and hence the bearing lifetime.

The influence of variable load and speed on the winding temperature is characterized by the duty type as defined in IEC 60034-1. The most suitable duty types for converter-fed electrical

machines are S1 and S10. Duty type S1 considers the maximum permitted temperature, whereas S10 (for operation at varying load and speed) permits temperature rises which exceed the limit values of the thermal class for limited periods. Limit values of temperature rise are given in IEC 60034-1:2010, and Annex A of that standard gives a formula for the calculation of thermal life expectancy.

5.6 Determination of electrical machine efficiency

The recommended methods to determine the electrical machine efficiency on sinusoidal supply are given in IEC 60034-2-1 and IEC 60034-2-2, For voltage converter fed cage induction motors a new method to determine harmonic losses is described in IEC TS 60034-2-3.

If practical, if required to achieve a more accurate assessment of the overall losses (including the additional harmonic losses), they should be determined with the behaviour of the final PDS.

6 Acoustic noise, vibration and torsional oscillation

6.1 Acoustic noise

6.1.1 General

The converter and its function create three variables which directly affect emitted noise. They are:

- changes in rotational speed which may range from near zero speed to values in excess of the corner point speed. The components and factors that influence noise emissions are bearings and lubrication, ventilation and any other features that are affected by temperature changes;
- electrical machine power supply frequency and harmonic content which have a large effect on the magnetic noise excited in the stator core and, to a lesser extent, on the bearing noise;
- torsional and radial excitations of the stator core due to the interaction of waves of different frequencies of the magnetic field in the electrical machine air gap.

6.1.2 Changes in noise emission due to changes in speed

6.1.2.1 Sleeve (or plain) bearings

There will be no significant change in the noise level emitted by plain bearings.

6.1.2.2 Rolling element bearings

The fundamental frequencies of potential noise emission from a rolling element bearing will vary directly with the rotational speed. If the bearing is "quiet" at the corner point speed, it is unlikely for the noise level to change significantly when the speed is reduced. However, when the speed is increased above the corner point speed there is the possibility that the noise level could increase dramatically due to harmonics of the fundamental frequencies growing due to skidding of the rolling elements. The susceptibility to this phenomenon has been shown to increase rapidly at speed factors (bearing diameter in mm $\times$ rotational speed in r/min) greater than 180 000. Experience has shown that the noise level increase can be countered by increasing the lubricant supply to the bearing by regreasing at very short intervals or by utilising oil bath or oil mist lubrication.

When operating at the highest speeds in the electrical machine's range, the bearing temperature will be higher than running at lower speeds. It is important therefore to ensure that adequate nominal clearance and/or a spring loaded arrangement is embodied in the design.

Grease lubricated bearings will perform perfectly satisfactorily at low operating speeds.

6.1.2.3 Ventilation noise

For a shaft-mounted fan, the noise generated will vary approximately as the characteristic shown in Figure 7 (for a fan peripheral velocity up to 50 m/s). The fan noise will decrease by about 15 dB for a 50 % reduction in speed and increase by about 10 dB for a speed increase of 50 %. If the drive is unidirectional, very effective noise reduction can be achieved by utilising a fan on the electrical machine with curved unidirectional blades.

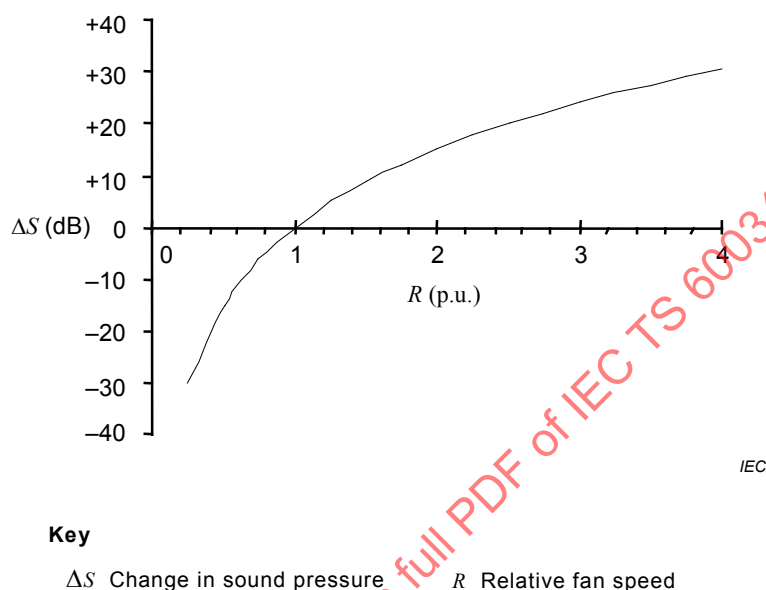


Figure 7 – Relative fan noise as a function of fan speed

6.1.3 Magnetically excited noise

Magnetic noise is essentially caused by waves of tensile stress acting in the radial direction on the stator bore. These so-called Maxwell forces are excited by the interaction of the various magnetic fields in the air-gap. The tensile stress is characterized by its amplitude, frequency and mode. As the amplitudes are small, the tensile stress results in disturbing tones only when frequency and mode of a specific wave coincides with the frequency and mode of a natural frequency of the stator core.

In the case of sinusoidal supply voltages, the magnetic noise is caused by the spatial harmonics of the air-gap field. The aim of a professional design is to avoid resonances at the rated operating conditions of the electrical machine. But, because of the large variety of contributing spatial harmonic fields, audible magnetic noise is unavoidable at specific speeds, when the electrical machine is operated at constant flux over a wide speed setting range, even when the supply voltage is sinusoidal. Skipping of a small frequency band is frequently used to avoid a too high noise emission at the associated speed. This means this effect is not associated with the converter supply and would also occur in case of variable-frequency sinusoidal supply voltages.

The statements given above are valid also when an electrical machine is supplied from a converter. But, in this case, the magnetic fields produced by the time harmonics are superimposed. With respect to considerable magnetic noise, it is sufficient to consider the interaction of the fundamental air-gap fields (number of pole pairs p) of the operating frequency and the different harmonics. Therefore, the additionally generated waves of tensile stress are of the modes $r = 0$ and $r = 2p$. The natural frequencies of these modes depend on the size and the design of the electrical machine

The objective of *PDS* designers is to create optimum noise solutions, but it should be recognized that such solutions are not the responsibility of either the converter designer or the electrical machine designer alone and that in many cases design co-operation is essential.

Experience has shown that with pulse frequencies less than 3 kHz, the harmonic frequencies can be close to the natural frequencies of the electrical machine core and structure on medium and large electrical machines and consequently with wide speed range applications, resonance points are nearly unavoidable at some point in the speed range (see Figure A.2). The resonance frequencies for the modes $r = 0$ and $r = 2p$ (see Figure 8 for illustrations of modes $r = 0, 2$ and 4) are less than 2,5 kHz for 2-pole and 4-pole electrical machines with shaft height greater than 315 mm. By contrast, the trend to increase the converter pulse frequency to 4 kHz or 5 kHz or even higher will result in possible resonance occurring on progressively smaller electrical machines.

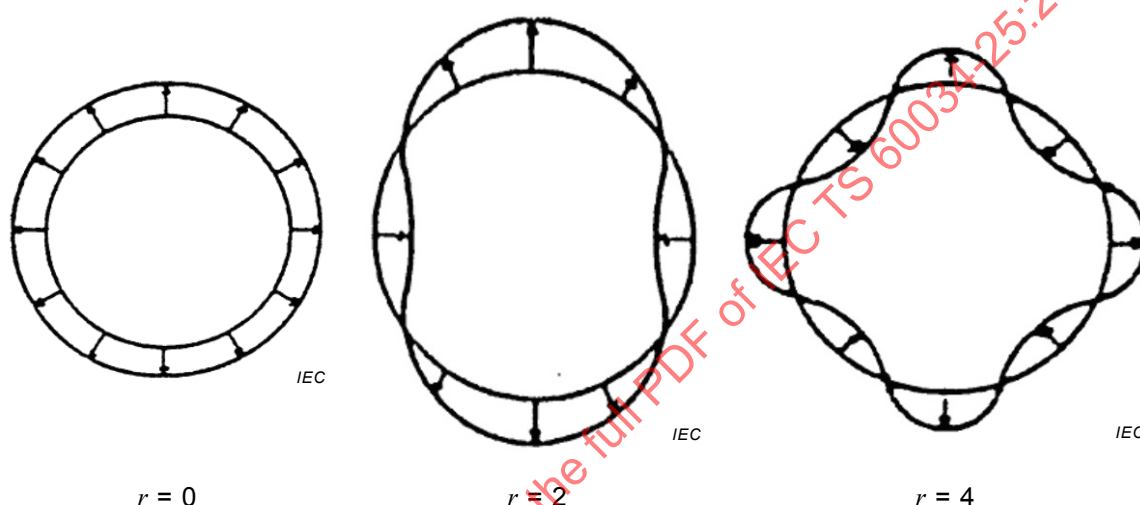


Figure 8 – Vibration modes of the stator core

The increment of noise of electrical machines supplied from PWM controlled converters compared with the same electrical machine supplied from a sinusoidal supply is relatively small (a few dB(A) only) when the switching frequency is above about 3 kHz. For lower switching frequencies, the noise increase may be tremendous (up to 15 dB(A) by experience). Some advanced PWM or hysteresis controlled converters no longer use fixed carrier frequencies and therefore produce a widely spread spectrum of non-fundamental frequencies. Thus, the typical noise increase and the subjective audible noise can be drastically reduced.

It may be necessary to create "skip bands" in the operating speed range in order to avoid resonance conditions.

For an indication of the noise increase when operated on a converter see IEC 60034-9:2007, Clause 7.

6.1.4 Sound power level determination and limits

6.1.4.1 Methods of measurement

Sound power levels should be determined in accordance with IEC 60034-9 (see 6.1.4.2).

6.1.4.2 Test conditions

If practical the electrical machine should be rigidly mounted and, tests should be made with the electrical machine supplied from a converter with the output characteristics that will be used in the application.

Alternatively, and preferably for larger electrical machines, tests may be carried out at no load and rated frequency, using a sinusoidal supply.

6.1.4.3 Sound power level limits

Sound power level limits are specified in IEC 60034-9:2007, in which Clause 7 shows as a table the expected increments of level of converter-fed electrical machines compared with sinusoidal supply.

6.2 Vibration (excluding torsional oscillation)

6.2.1 General

The level of vibration produced by a converter-fed electrical machine will be influenced by the following factors:

- the electromagnetic design of the electrical machine;
- the electrical machine structure, particularly the frame assembly;
- the electrical machine mounting;
- shaft stiffness;
- the rigidity of the coupling between the electrical machine shaft and the driven equipment;
- the output waveform of the converter.

Provided that the converter has suitable output characteristics and also that due attention is paid to the mechanical features of the electrical machine and its mounting, similar vibration levels to that produced by an electrical machine operating on a sinusoidal supply will be obtained. Thus, for electrical machines supplied from PWM voltage source converters, there is no need to establish vibration levels that are different from the figures for sinusoidal supplied electrical machines given in IEC 60034-14.

IEC 60034-14 gives test vibration limits for electrical machines when they are either freely suspended or rigidly mounted. The measured test figures give the vibration level produced by an uncoupled electrical machine under specific mounting conditions and as such are an indication of the quality of the electrical machine. When an electrical machine is mounted in an apparatus or at a site coupled to driven equipment, the vibration level will be very different.

For an electrical machine coupled to a driven equipment there are many natural resonances and if the application requires the electrical machine to operate over a wide speed range it can be extremely difficult to avoid all of them. If problems are experienced, it is sometimes possible to program the controller so that the frequency bands that are exciting the mechanical resonances are “skipped” (see 4.3.8).

It will be appreciated that as many of the factors influencing the level of vibration are due to the total system, it is not possible to address all vibration problems by considering the design of the electrical machine on its own.

6.2.2 Vibration level determination and limits

6.2.2.1 Method of measurement

Vibration levels should be determined in accordance with IEC 60034-14 (see 6.2.2.2).

6.2.2.2 Test conditions

If practical the electrical machine should be rigidly mounted and, tests should be made with the electrical machine supplied from a converter with the output characteristics that will be used in the application.

Alternatively, by agreement between manufacturer and customer, tests may be carried out at no load and rated frequency, using a sinusoidal supply.

NOTE 1 This recommendation can significantly increase the test time, and is not required by IEC 60034-14.

NOTE 2 For *in situ* measurements, refer to ISO 10816-3.

6.2.2.3 Vibration level limits

When testing under the conditions specified in 6.2.2.2, it is recommended that the vibration magnitude measured on the bearing housings should not exceed the vibration level Grade A, given in Table 1 of IEC 60034-14:2007.

6.3 Torsional oscillation

The asynchronous (time-constant) torques generated by harmonics have little effect on the operation of the drive. However, this does not apply to the oscillating torques which are generated in the shaft of electrical machines supplied from converters. The magnitude of the torque ripple and its frequency are such that they can produce torque vibrations in the complete connected mechanical system which should be carefully checked in order to avoid damaging mechanical resonances.

In drives with pulse-controlled converters, the frequencies of the dominant oscillating torques are determined by the switching frequency while their amplitudes depend on the pulse width. Thus, the oscillating torque amplitudes may be as high as 15 %, provided that the switching frequency exceeds 10 times the corner point frequency, which is usually the case. With higher switching frequencies (in the order of $21 \times f_1$) the oscillating torques of frequencies $6 \times f_1$ and $12 \times f_1$ are practically negligible, provided a suitable pulse pattern is applied (e.g. modulation with a sinusoidal reference wave or space-phaser modulation). Additionally, oscillating torques of twice the switching frequency are generated. These, however, do not exert detrimental effects on the drive system since their frequency is far above the critical mechanical frequencies.

A d.c. component, or a negative-sequence component produced by asymmetries of the converter output voltage will generate a torque component of 1 or 2 times fundamental supply frequency and should therefore be carefully prevented. It should be borne in mind that, for d.c., only the resistance, and, for negative sequence, a short-circuit impedance, are effective, and therefore small asymmetrical voltages will produce rather high asymmetrical currents and thus oscillating torques, especially when meeting a resonance frequency of the shaft train. Oscillating torques will lead to damage due to clearances in gear sets, couplings or some shaft connections if the torque transmitting surface is able to disconnect and afterwards to "hammer" back.

7 Electrical machine insulation electrical stresses

7.1 General

The insulation system of the electrical machine is subjected to higher dielectric stress when converter-fed than in the case of a pure a.c. sinusoidal source.

7.2 Causes

A voltage source converter generates rectangular pulses of fixed amplitude voltage that have varying width and frequency. The amplitude voltage of the pulses at the output of the converter is generally determined by d.c. bus voltage (1 p.u.) but the superposition of common-mode and differential mode transient effects throughout the whole topologies of power supply system, converter system plus the auxiliaries like earthing conditions, cabling and filtering have to be clearly analysed and taken into account (see IEC TS 61800-8). Modern low voltage converter output voltage rise-times may be in the 50 ns to 400 ns range.

They are kept as short as possible to minimize switching losses in the output semiconductors. These converters can generate repetitive voltage overshoots at the terminals of an electrical machine connected by a cable, which can reduce the life of an electrical machine insulation system if they exceed its repetitive voltage strength. Figure 9 shows a plot of the surge count at the terminals of an electrical machine fed from a converter, measured over a period of time under various operating conditions. As can be seen, there is not a simple relationship between the surge count and the rise-time and magnitude. However, the risk of insulation damage (due to partial discharge, see 7.3 and 7.6) is more severe with surges of fast rise-time and high voltage, which indicates that surges in the upper right-hand portion of this diagram, when viewed from the t_r scale direction are more significant.

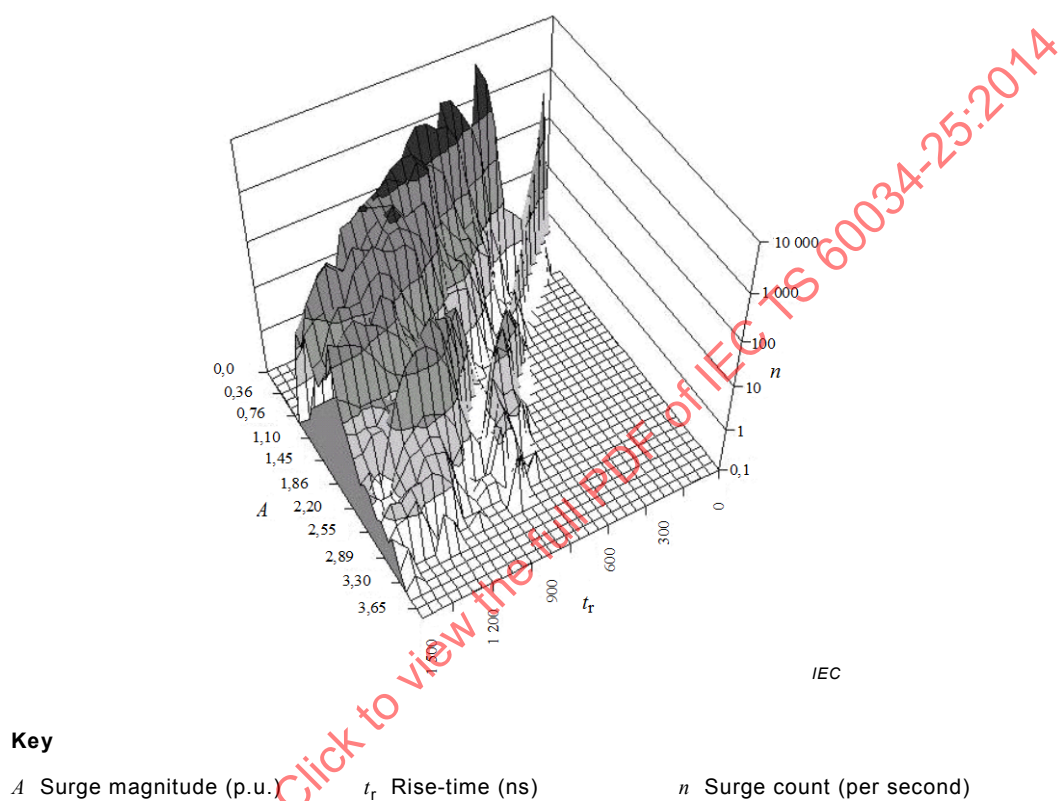


Figure 9 – Typical surges at the terminals of an electrical machine fed from a PWM converter

Depending on the rise-time of the voltage pulse at the converter output, and on the cable length and electrical machine impedance, the pulses generate voltage overshoots at the electrical machine terminals (typically up to 2 p.u. phase-to-phase and phase-to-ground). These voltage overshoots are created by reflected waves at the interface between cable and electrical machine terminals due to impedance mismatch, and depend on the converter output, the cable length between the converter and the electrical machine and electrical machine terminal impedance. This phenomenon is fully explained by transmission-line and travelling wave theory, using the harmonic content of the output voltage. As the rise-time decreases, so the harmonic frequencies present in the voltage waveform will increase. Typical voltage surges measured at a converter output and at the electrical machine terminals are given in Figure 10 with an enlarged view of one surge shown in Figure 11. For support of a comprehensive analysis consult IEC TS 61800-8.

It is recommended that the system integrator of converter and electrical machine should measure the phase-to-ground and phase-to-phase voltage at the electrical machine terminals after system installation in order to confirm the expectation, because the actual magnitude and rise-time are complicated as shown in Figure 9. If the actual surge voltage is more severe than the expectation, the system integrator should take countermeasures following 7.5 in order to avoid unexpected system faults in service.

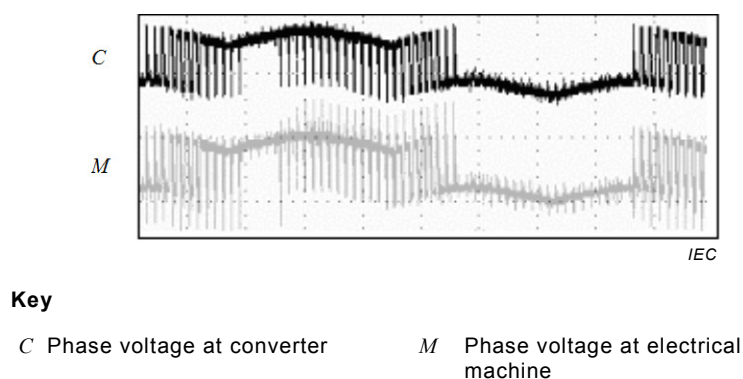


Figure 10 – Typical voltage surges on one phase at the converter and at the electrical machine terminals (2 ms/division)

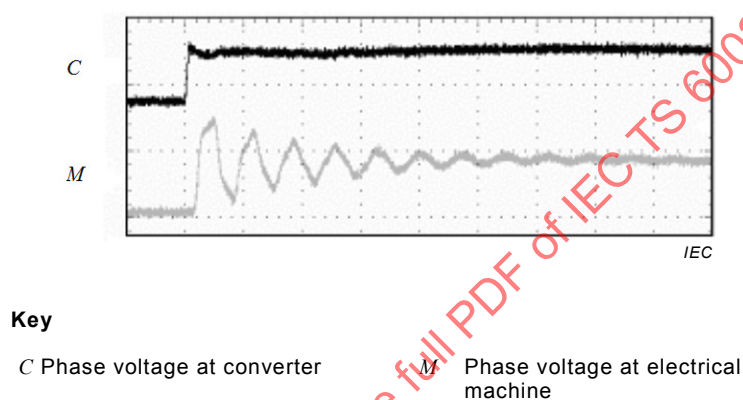


Figure 11 – Individual short rise-time surge from Figure 10 (1 μ s/division)

Experience indicates that as the cable length increases, the pulse overshoot generally may increase to a maximum then may decline. Meanwhile, the rise-time at the electrical machine terminals increases. Voltage overshoots might be decreased in the case of installations using converters installed close to associated electrical machines, where the cable length between converter and electrical machine is short.

7.3 Winding electrical stress

The dielectric stress of the winding insulation is determined by the peak to peak voltage and the rise-time (for definition, see Figure 12) of the impulse at the electrical machine terminals, and on the frequency of the impulses produced by the converter.

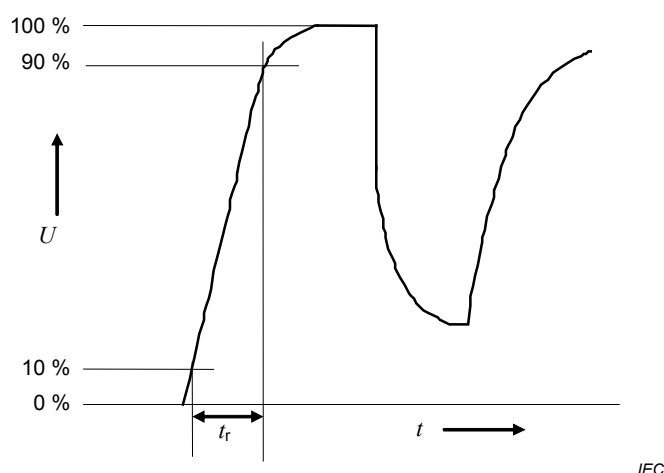


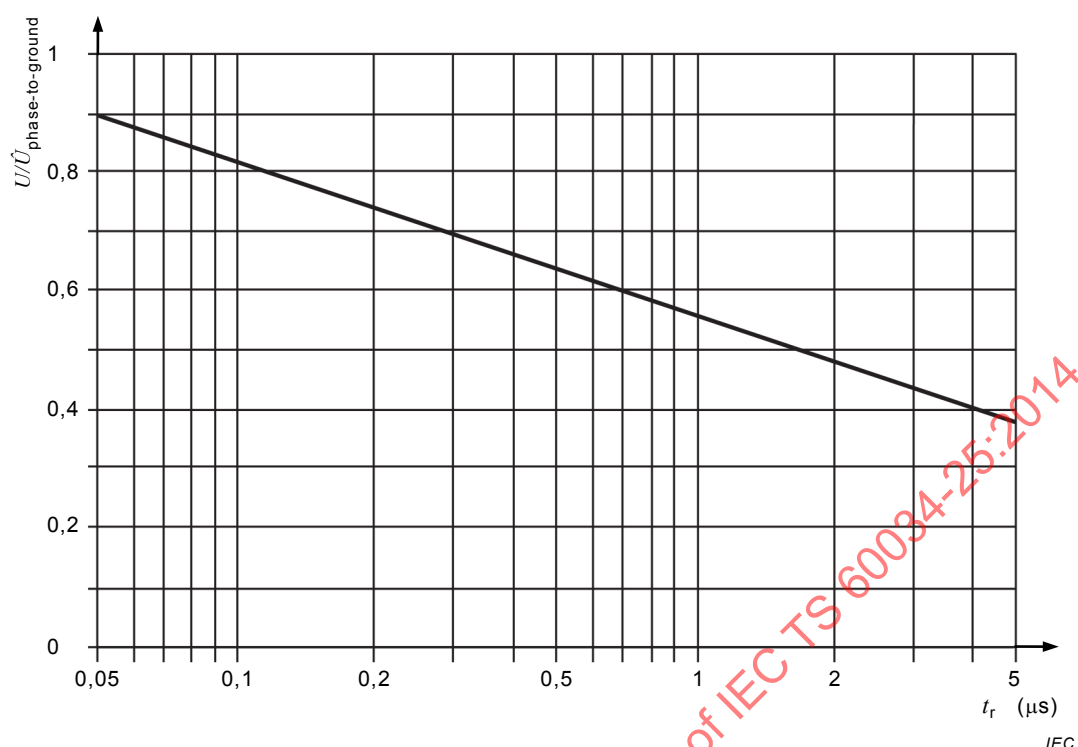
Figure 12 – Definition of the rise-time t_r of the voltage pulse at the electrical machine terminals

One part of the stress is determined by the level of voltage applied to the main insulation (phase-to-phase or phase-to-ground) of the winding coils. The other is limited by the inter-turn insulation and determined by the rise-time of the impulses. Short rise-time impulses result in the voltage being unevenly distributed throughout the coils, with high levels of stress present between turns at the line end coil(s) of the individual phase winding.

Figure 7 of IEC 60034-18-41:2014 which is reproduced here as Figure 13 shows the worst case distribution of the voltage across possibly adjacent first and last turns of a random-wound winding as a function of the rise-time.

If not known better, this can be considered as the expected worst case voltage stressing the turn-turn-insulation of the electrical machine.

As illustrated, the shorter the rise-time, the more voltage appears across the first turn of the coil.

**Key**

$\Delta U/\hat{U}_{\text{phase-to-ground}}$ fraction of jump phase-to-ground voltage t_r rise-time

Figure 13 – First turn voltage as a function of the rise-time

Short rise-time impulses at electrical machine terminals also cause high turn-to-turn voltages in the first coil(s) of each winding phase and can be followed by early dielectric breakdown turn-to-turn. Such occurrences are often due to inadequate dielectric strength of the enamel coating, inadequate resin fill.

7.4 Limits and responsibility

7.4.1 Electrical machines design for low voltage ($\leq 1\,000\text{ V}$)

The insulation system of electrical machines rated at less than 1 000 V specifically designed for supply from voltage source converters may be qualified according to 60034-18-41 (without Partial Discharge Type I) or 60034-18-42 (with Partial Discharge Type II), possibly indicating this in the documentation and on the name plate of the electrical machine. It is the responsibility of the electrical machine manufacturer to specify the ability of the electrical machine winding insulation.

For general purpose PDS applications it is recommended that the electrical machine should follow the impulse voltage insulation class C/B Table 4, extracted from Table C.1 of IEC 60034-18-41:2014. Electrical machine manufacturer should ensure that the electrical machine complies with these levels, i.e. the values in Table 4 (Annex C of IEC 60034-18-41:2014).

Higher and lower values as well as different combinations of P-P, P-G, T-T Classes for specific applications are given in Annex C of IEC 60034-18-41:2014, in order to adapt electrical machine insulation abilities to system requirements economically and reliably.

Ensuring that no significant service lifetime reduction of the electrical machine insulation occurs, the actual stress due to converter operation should be lower than the Impulse voltage insulation class (IVIC) for Type I Insulations according to IEC 60034-18-41 and the voltages

per Type II Insulations according to IEC 60034-18-42 (the next edition of IEC 60034-18-42 is intended to have IVIC as well).

It should be known that dependent on the PDS topology significantly higher voltages could occur. The actual voltage stress to be expected can be determined according to IEC TS 61800-8, taking into account possible voltage reflection depending on the topology and operating mode of the converter, cable type and length, earthing, etc. Relevant parameters for insulation stress are: transient peak to peak voltage values, rise-time, repetition rate, etc.

The system integrator is responsible for determining and specifying the voltage stress level at the electrical machine terminals (see Annex C for an example of the calculation of these voltage stress levels).

In case the actual or expected levels at the electrical machine terminals are higher than those given in the impulse insulation class defined in Table 4 either the PDS topology or the electrical machine insulation shall be adapted. It is the responsibility of the system integrator to make system changes or to communicate the special requirements to the electrical machine or converter manufacturer. Methods of insulation stress reduction are given in 7.5.

Table 4 – Operating voltage at the terminals in units of U_N where the electrical machines may operate reliably without special agreements between manufacturers and system integrators

Impulse voltage insulation class	Allowable peak/peak operating voltages in units of U_N	
	Phase/phase	Phase/ground
	C	B
IVIC C/B	5,9	3,1

(See IEC 60034-18-41:2014, Annex C for details)

NOTE 1 Electrical machine manufacturer should ensure that the electrical machine complies with these levels.

NOTE 2 Special agreements between manufacturers and system integrators might be subject to a dedicated installation.

7.4.2 Electrical machines designed for medium and high voltage (> 1 000 V)

The insulation system of electrical machines rated at greater than 1 000 V specifically designed for supply from voltage source converters may be qualified according to IEC 60034-18-42 (with Partial Discharge Type II), possibly indicating this in the documentation and on the name plate of the electrical machine. It is the responsibility of the electrical machine manufacturer to specify the ability of the electrical machine winding insulation.

Until the next edition of IEC 60034-18-42 is issued, in order to ensure that no significant service lifetime reduction of the electrical machine insulation occurs, the actual stress due to converter operation should be lower than the maximum allowed stress limits declared by the machine manufacturer.

7.5 Methods of reduction of voltage stress

There are several possible solutions for reducing the surge severity in a given situation. These can be judged when viewing the complete PDS. Most of the influencing aspects can be calculated by following IEC TS 61800-8. Annex C gives an example of how simple it is to use IEC TS 61800-8.

7.6 Insulation stress limitation

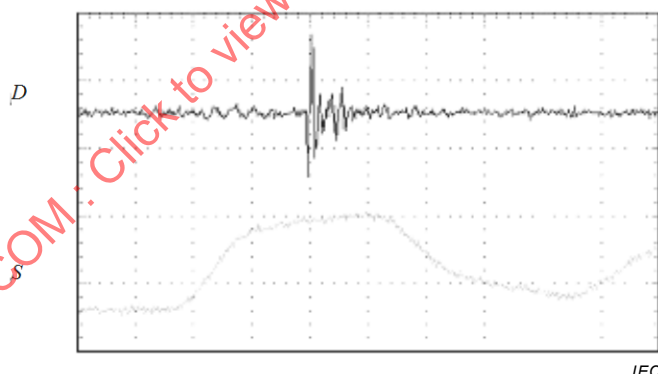
The upper limited level at which this over-voltage stress becomes harmful is the PDIV (the voltage at which partial discharges begin to occur) or, in the air, the Corona Inception Voltage (CIV). Partial discharges may cause degradation of the insulation system through both chemical and mechanical erosion. The rate of insulation degradation depends on the energy and frequency of occurrence of the partial discharges.

PDIV and CIV in an electrical machine are influenced by

- winding type: random or form-wound;
- design: phase separation and ground wall material;
- varnish type and impregnation technology;
- wire size: larger diameter wire has a higher PDIV;
- wire insulation type;
- enamel thickness: thicker enamel coating of wire increases PDIV;
- operating temperature: when the winding temperature increases, PDIV decreases (typically by 30 % from 25 °C to 155 °C); this is true only partially and in general not for form wound electrical machine windings;
- environment atmosphere (composition and pressure);
- condition of the insulation (contamination by dirt or humidity, etc.).

Figure 14 shows a partial discharge pulse that has resulted from a surge on one phase of a converter-fed electrical machine.

NOTE The discharge occurs at the rising edge of a converter generated voltage surge, as the voltage stress across a void in the insulation reaches its breakdown strength.



Key

S Voltage surge at electrical machine terminals

D Discharge pulse

Figure 14 – Discharge pulse occurring as a result of converter generated voltage surge at electrical machine terminals (100 ns/division)

8 Bearing currents

8.1 Sources of bearing currents in converter-fed electrical machines

8.1.1 General

Several situations can cause bearing currents. In all cases, bearing current will flow when a voltage is developed across the bearing sufficient to break down the insulating capacity of the lubricant. There are several sources of this voltage.

NOTE Also auxiliary devices such as encoders or tachometers as per 9.1.4.4 which are connected to the electrical machine can be affected by bearing currents.

8.1.2 Magnetic asymmetry

Asymmetry in the magnetic circuit of an electrical machine creates a situation that causes low frequency bearing currents. This is more common in electrical machines greater than 400 kW but can exist in small electrical machines with magnetic asymmetries, as well, such as those with a segmented construction. An asymmetric magnetic circuit results in a circumferential a.c. flux (ring flux) in the yoke. This induces an a.c. voltage in the conductive loop comprising the electrical machine shaft, the bearings, the end brackets, and the outer frame of the electrical machine. If the induced voltage is sufficient to break down the insulation provided by the lubricant, current will flow through the loop, including both bearings.

8.1.3 Electrostatic build-up

The voltage can also be caused by an electrostatic build up on the shaft due to the driven load such as an ionized filter fan.

8.1.4 High-frequency voltages

The high-frequency common-mode voltage at the electrical machine terminals generates common-mode currents, part of which may flow through the bearings of the electrical machine or of the driven equipment. The common-mode currents may also generate a voltage across the bearings by transformer action. These effects result from the use of fast switching semiconductor devices, and can cause bearing problems, due to different effects, in electrical machines of all ratings. These effects are described in detail in 8.2.

8.2 Generation of high-frequency bearing currents

8.2.1 General

The most important factors that define which mechanism is prominent are the size of the electrical machine and how the electrical machine's frame and shaft are grounded. The electrical installation, meaning a suitable cable type and proper bonding of the earthing conductors and the electrical shield, also plays an important role, as well as the rated converter input voltage and the rate of rise of the converter output voltage. The source of bearing currents is the voltage across the bearing. There are three types of high frequency bearing currents: circulating, shaft earthing, and capacitive discharge.

Two types of bearing currents, high-frequency circulating current (I_C) and shaft earthing current (I_S), are shown schematically in Figure 15. These are strongly influenced by the earthing arrangements and earthing impedances.

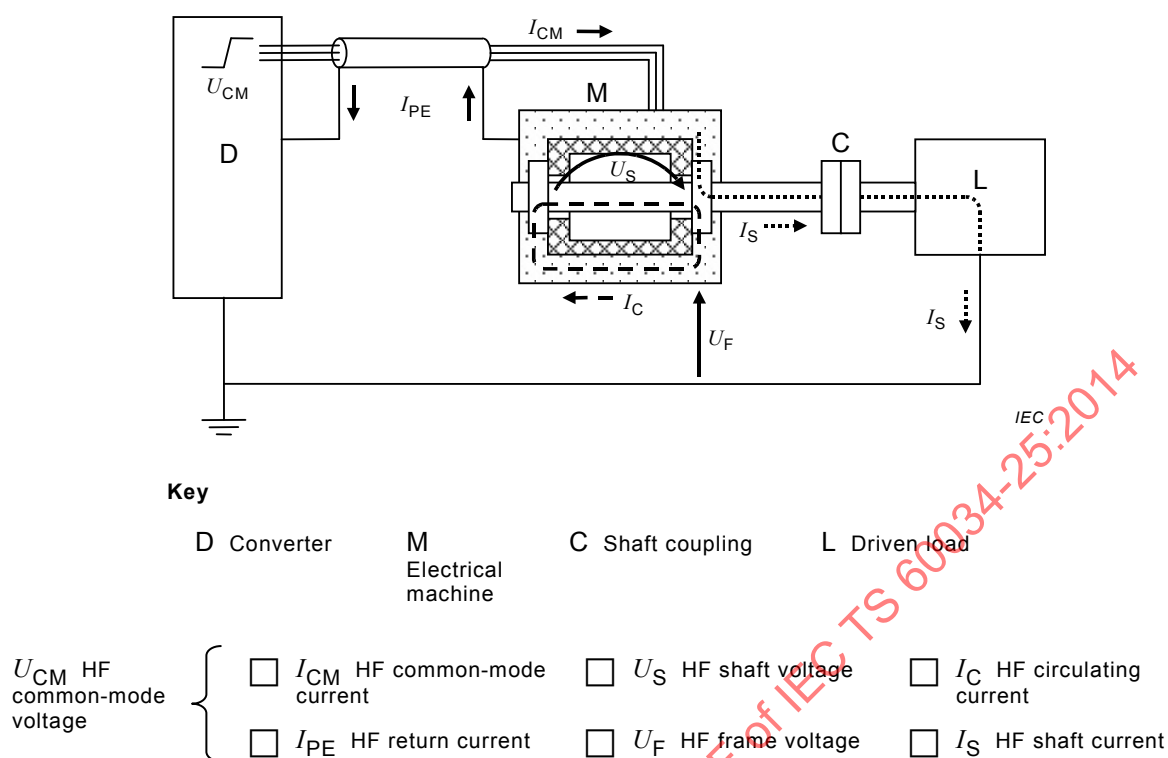


Figure 15 – Possible bearing currents

8.2.2 Circulating current

In large electrical machines, a high-frequency voltage is induced in the closed loop as described in 8.1.2 by the high-frequency flux circulating around the stator yoke. This flux is caused by capacitive currents leaking from the winding into the stator laminations. The induced shaft voltage may affect the bearings. If it is high enough to overcome the insulation of the bearings' lubricant film, a compensating current to balance the flux in the stator flows, looping the shaft, the bearing and the stator frame.

These high-frequency currents may be superimposed on low-frequency currents generated as described in 8.1.2.

8.2.3 Shaft earthing current

The current leaking into the stator frame needs to flow back to the converter, which is the source of the current. Any route back contains impedance, and therefore, the voltage of the electrical machine frame increases in comparison to the source ground level. If the electrical machine shaft is earth grounded via the driven machinery, the increase of the electrical machine frame voltage is seen across the bearings. If the voltage rises high enough to overcome the insulating capability of the bearing lubricant film, part of the current may flow via that bearing, the shaft and driven electrical machine back to the converter.

8.2.4 Capacitive discharge current

The internal voltage division of the common-mode voltage over the internal capacitances of the electrical machine may cause bearing voltages high enough to breakdown the insulation of bearing lubrication film, creating high frequency bearing current pulses (referred to as electrostatic discharge machining currents). This can happen if the shaft is not grounded via the driven machinery while the electrical machine frame is tied to ground for protection.

8.3 Common-mode circuit

8.3.1 General

A common-mode circuit is a closed loop path for circulating current flow within the entire system, including the electrical machine and its bearings, the load and the converter.

A typical three-phase sinusoidal power supply is balanced and symmetrical under normal conditions. Thus, the neutral voltage is zero. However, this is not the case with a PWM switched three-phase power supply, where the d.c. voltage is converted into three-phase voltages. Even though the corner point frequency components of the output voltages are symmetrical and balanced, it is impossible to make the sum of the three output voltages instantaneously equal to zero with only two possible output levels available. The resulting neutral point voltage is not zero. This voltage is the common-mode voltage source. It is measurable at the star point of the electrical machine winding (or at an artificial star point for electrical machine windings connection other than star) at any load. The voltage is proportional to the d.c. bus voltage, and its significant frequency is equal to the converter switching frequency.

Any time one of the three converter outputs is changed from one of the possible potentials to another, a current proportional to this voltage change is forced to flow to earth via the earth capacitances of all the components of the output circuit. The current flows back to the source via the earth conductor and capacitances of the converter.

8.3.2 System common-mode current flow

The return path of the leakage current from the electrical machine frame back to the converter frame consists of the electrical machine frame, cable shielding or ground conductors and possibly conductive parts of the factory building structure. All these elements contain inductance. The flow of common-mode current through such inductance will cause a voltage drop that raises the electrical machine frame potential with respect to the converter frame. This electrical machine frame voltage is a portion of the converter's common-mode voltage. The common-mode current will seek the path of least impedance. If a high amount of impedance is present in the intended paths, like the ground connection of the electrical machine frame, the electrical machine frame voltage will cause some of the common-mode current to be diverted into an unintended path, such as through the building. In practical installations, a number of parallel paths exist. Most have a minor effect on the value of common-mode current or bearing currents, but may be significant in coping with EMC requirements.

However, if the value of this inductance is high enough, voltage drops of over 100 V may occur between the electrical machine frame and the converter frame. If, in such a case, the electrical machine shaft is connected through a metallic coupling to a gear box or other driven machinery that is solidly grounded and near the same potential as the converter frame, then it is possible that part of the converter common-mode current flows via the electrical machine bearings, the shaft and the driven machinery back to the converter.

If the shaft of the machinery has no direct contact to the ground level, current may flow via the gear box or load electrical machine bearings. These bearings may be damaged before the electrical machine bearings.

8.4 Stray capacitances

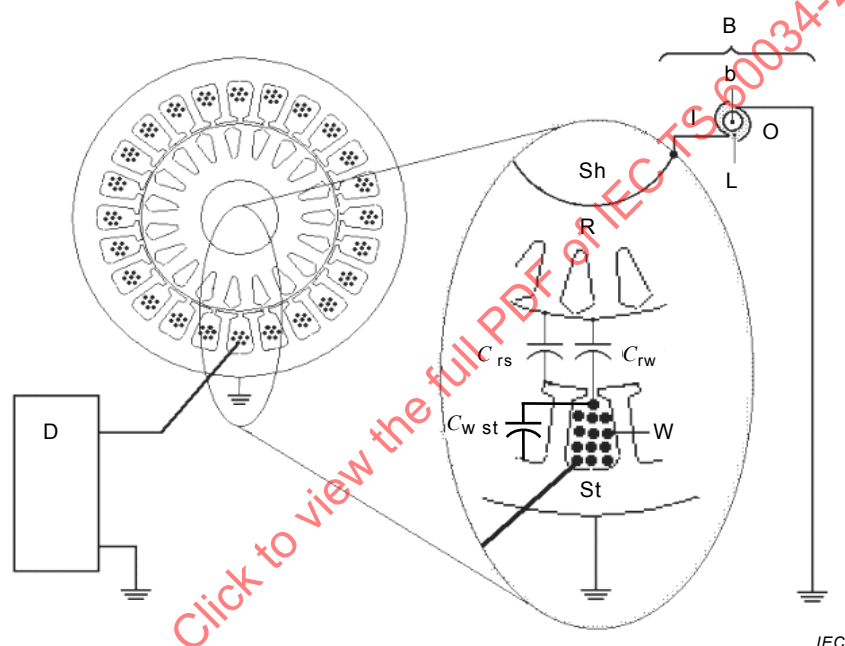
8.4.1 General

The stray capacitances inside the electrical machine (see Figure 16) are very small, and present a high impedance for low frequencies thus blocking the low-frequency currents. However, fast rising pulses produced by modern converters contain frequencies so high that even the small capacitances inside the electrical machine provide a low-impedance path for current to flow.

8.4.2 Major component of capacitance

The largest share of the electrical machine's capacitance is formed between the stator windings and the electrical machine frame. This capacitance is distributed around the circumference and length of the stator. As the current leaks into the stator along the coil, the high frequency content of the current entering the stator coil is greater than the current leaving it.

This net axial current produces a high frequency magnetic ring flux circulating in the stator laminations, inducing an axial voltage in the loop described in 8.1.2. If the shaft voltage becomes large enough, a high-frequency circulating current can flow through the shaft and both bearings and, in some cases, through the shaft and bearings of the load electrical machine. This circulating current typically causes damage to the bearings with typical peak values of 3 A to 20 A, depending on the size of the electrical machine, the rate of rise of the voltage at the electrical machine terminals and the d.c. link voltage level.



Key

D Converter	Sh Shaft	R Rotor	St Stator
W Winding	C_{rs} Rotor-stator capacitance	C_{rw} Rotor-winding capacitance	B Bearing
b Ball or roller	C_{wst} Winding-stator capacitance	I Inner race	O Outer race
L Lubricant film			

Figure 16 – Electrical machine capacitances

8.4.3 Other capacitances

The capacitance between the stator winding and the laminations is an important element of the common-mode circuit. There are other capacitances, such as the capacitance between the overhang of the stator windings and the rotor, or that existing in the electrical machine's air gap between the stator iron and the rotor surface. The bearings themselves also have capacitance.

Fast changes in the common-mode voltage from the converter cannot only result in currents in the capacitance around the circumference and length of the electrical machine, but also between the stator windings and the rotor into the bearings.

The current flow into the bearings can change rapidly, depending on the condition of the bearing. For instance, the presence of capacitance in the bearings is only sustained for as long as the balls of the bearings are covered in lubricant and are non-conducting. This capacitance can be short-circuited if the bearing voltage exceeds the threshold of the breakover value or if the bearing lubricant film is depleted and makes contact with both bearing races. At very low speed, the bearings may also have metallic contact due to the lack of insulating lubricant film.

8.5 Consequences of excessive bearing currents

Figure 17 and Figure 18 show typical bearing damage due to electrical discharge and common-mode currents.

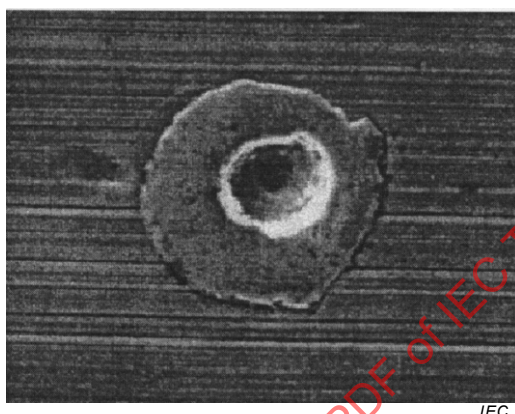


Figure 17 – Bearing pitting due to electrical discharge (pit diameter 30 μm to 50 μm)

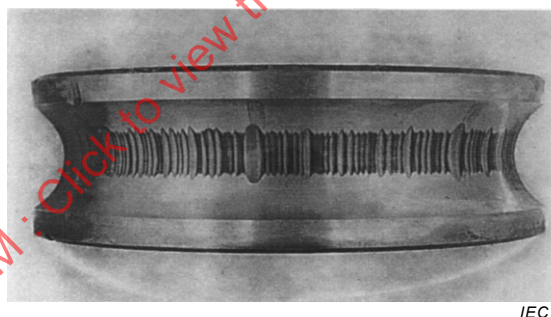


Figure 18 – Fluting due to excessive bearing current

8.6 Preventing high-frequency bearing current damage

8.6.1 Basic approaches

There are three basic approaches used to prevent high-frequency bearing currents, which can be used individually or in combination:

- a proper cabling and earthing system;
- modifying the bearing current loops;
- damping the high frequency common-mode voltage.

All these tend to decrease the voltage across the bearing lubricant to values that do not cause high-frequency bearing current pulses at all, or dampen the value of the pulses to a level that has no effect on bearing life. For different types of high-frequency bearing currents, different measures need to be taken.

The basis of all high-frequency current solutions is the proper earthing system. Standard equipment earthing practices are mainly designed to provide a sufficiently low impedance connection to protect people and equipment against system frequency faults. A variable speed drive can be effectively grounded for high common-mode current frequencies, if the installation follows the principles of Clause 9.

8.6.2 Other preventive measures

- Use insulated bearing(s).

NOTE Several kinds of bearing insulation with different thickness and placed at different locations (for example, between shaft and inner bearing race, between outer bearing race and end-bracket, between end-bracket and frame) are in practical use. Anti-friction bearings with a ceramic coating at the outer surface (so-called coated bearings) are customary. Bearings with ceramic rolling elements are also available.

- Use a filter that reduces common-mode voltages and/or du/dt .
- Use non-conductive couplings for loads or other devices which may be damaged by bearing currents.
- Use brush contact(s) between shaft and electrical machine frame.
- Use lower voltage electrical machine and converter if possible.
- Run the converter at the lowest switching frequency that satisfies audible noise and temperature requirements.
- Avoid the use of double transitions (parallel switching).

Table 5 compares the effectiveness of some of these measures.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TS 60034-25:2014

Table 5 – Effectiveness of bearing current countermeasures

Counter measure	Current type			Additional comments
	Circulating currents (8.1.2, 8.2.2)	Shaft earthing currents (8.2.3)	Capacitive discharge currents (8.2.4)	
1) NDE insulated, or ceramic rolling elements	Effective	Not effective: Only protects one bearing	Not effective: Only protects one bearing	NDE insulated to avoid need for an insulated coupling
2) NDE and DE insulated, or ceramic rolling elements	Effective: One insulated bearing is adequate for this current type	Effective	Effective: May require additional brush contact	Most effective for small frame sizes. Less practical for large frame sizes
3) NDE and DE insulated, or ceramic rolling elements + additional insulated coupling and shaft earthing brush	Effective	Effective	Effective	Most effective (especially for larger electrical machines). Helps to prevent possible damage to driven load. Servicing necessary
4) One brush contact No bearing insulation	Not effective: Only protects one bearing	Effective: Does not protect bearings in driven load	Effective: Care needed to ensure low brush contact impedance	Servicing necessary
5) Two brush contacts, DE and NDE No bearing insulation	Effective: Care needed to ensure low brush contact impedance	Effective: Does not protect bearings in driven load	Effective: Care needed to ensure low brush contact impedance	Servicing necessary
6) Low resistance lubrication and/or carbon-filled bearing seals	Poor	Poor	Effective: Depends on condition of materials	No long term experience. Lubrication effectiveness reduced
7) Rotor in Faraday cage	Not effective	Not effective	Very effective	Problems from converter generated circulating currents that normally only occur in larger electrical machines
8) Common-mode voltage filter	Effective: Reduced HF voltage also decreases LF currents	Effective	Effective	Greatest reduction of common-mode voltage if filter is fitted at converter output
9) Insulated coupling	Not effective	Very effective	Not effective	Also prevents possible damage to driven load
10) Frame to driven load connection	Not effective	Effective	Not effective	Also prevents possible damage to driven load
DE: Drive End; NDE: Non Drive End.				

8.6.3 Other factors and features influencing the bearing currents

- Large physical size or high output power of the electrical machine tends to increase the induced shaft voltage.

- The physical shape of the electrical machine also has an effect on the induced shaft voltage: short and thick shape is generally better than long and thin electrical machine design.
- High pole numbers tend to reduce the induced shaft voltage.
- High stator slot number tends to increase the shaft voltage.
- High break down torque means low stray reactance and higher shaft voltage.
- Short electrical machine cable increases the induced shaft voltage.
- Low running speed and high bearing temperature as well as high bearing load increase the bearing current risk due to thinner lubricant film.
- Roller bearings are more vulnerable than sleeve bearings but have higher endurance than ball bearings due to higher clearances and capacitances.
- An active front end of the converter may increase the bearing voltages considerably depending on the earthing configuration.
- Slip-ring-electrical machines supplied by voltage source converters in the rotor circuit require special attention because the bearing voltage ratio (BVR) is much higher ($BVR \approx 1$) than in stator-fed electrical machines.

8.7 Additional considerations for electrical machines fed by high voltage source converters

8.7.1 General

All the bearing current statements made before with respect to low-voltage electrical machines supplied by voltage source converters are valid in general for high-voltage electrical machines and converters, but there are also some differences, as shown in the following examples.

- High-voltage electrical machines have usually high output power (from hundreds of kW upwards) and they are rather big in frame size; therefore, they usually have one insulated bearing as standard.
- Thicker slot insulation reduces the winding-core capacitance, reducing also the electrical machine common-mode current and the circulating type bearing current risk.
- On the other hand the voltage steps of the common-mode voltage are much larger in high-voltage converters, in spite of the higher number of steps, increasing the circulating current risk.
- Due to high voltage at the d.c. bus the common-mode voltage amplitude is high and, therefore, the capacitive discharge bearing current risk is considerable (BVR of high-voltage electrical machines is in the same range as in low-voltage electrical machines).

8.7.2 Bearing protection of cage induction, brushless synchronous and permanent magnet electrical machines

The high-voltage in the converter intermediate circuit and the physical size of the electrical machine emphasize to protect the bearings. Use insulated bearing structure for both bearings or one insulated (NDE) bearing and an effective shaft earthing brush at the DE bearing or an effective common-mode filter at the converter output (see Table 5).

8.7.3 Bearing protection for slip-ring electrical machines and for synchronous electrical machines with brush excitation

As the electrical machine already has slip rings and brushes, an additional effective shaft earthing brushes in both ends will protect the bearings. Alternatively, another applicable method from Table 5 may be selected.

If the voltage source converter is connected into the rotor circuit, high common-mode voltage and BVR are to be expected. Therefore, special attention should be paid to the bearing protection in these circumstances.

8.8 Bearing current protection for electrical machines fed by high-voltage current source converters

Practical experience and tests have shown that current-source converter supply has little impact on shaft voltage and, therefore, no special measures for bearing protection are necessary.

Earthing brushes are recommended only for slip-ring-electrical machines supplied by current source converters in the rotor circuit shaft.

9 Installation

9.1 Earthing, bonding and cabling

9.1.1 General

The recommendations in 9.1 give general guidance only on the suitability of conductors for use as PE connections and electrical machine cables, and on reliability and EMC installation issues. For specific installations, local regulations concerning earthing should be followed and agreed with the system integrator, and the converter supplier's instructions concerning EMC should be observed. See IEC 61800-3 and IEC 61800-5-1 for more information on EMC and safety considerations for PDS. See also IEC 61000-5-1 and IEC 61000-5-2 for comprehensive guidance on general EMC installation techniques.

9.1.2 Earthing

9.1.2.1 Objectives of earthing

The objectives of earthing are safety and reliable, interference-free, operation. Traditional earthing is based on electrical safety. It helps to ensure personal safety and limits equipment damage due to electrical faults. For interference-free operation of the PDS more profound methods are needed to ensure that the earthing is effective at high frequencies. This may require the use of equipotential ground planes at building floor, equipment enclosure and circuit board levels.

In addition, correct earthing strongly attenuates electrical machine shaft and frame voltages, reducing high frequency bearing currents and preventing premature bearing failure and possible damage to auxiliary equipment (see Clause 8). The earthing configuration can also have an effect on the phase-to-ground insulation voltage stress levels (see 7.4).

9.1.2.2 Earthing cables

For safety, earthing cables are dimensioned on a case-by-case basis in accordance with local regulations. The appropriate selection of cable characteristics and cabling rules also helps to decrease the levels of electrical stresses applied to the different components of the PDS, and therefore increases its reliability. In addition, the cable types should follow the EMC requirements.

9.1.3 Bonding of electrical machines

Bonding should be implemented in a manner that will not only satisfy safety requirements, but will also enhance the EMC performance of the installation. For bonding straps, suitable conductors include metal strips, metal mesh straps or round cables. For these high frequency systems, metal strips or preferably copper braided straps are better. Experience has shown that a typical dimensional length/width ratio for these straps should be less than five.

With electrical machines from 100 kW upwards, the external earthing conditions of the driven machinery may require a bonding connection between the electrical machine frame and the driven machinery. Typical applications are pumps (grounded by water) and gearboxes with central lubrication (grounded by oil pipes). The purpose of this connection is to equalize the potentials and improve the earthing. It should have low inductance, so a metal strip or preferably copper braided strap should be used, and it should follow the shortest possible route. In some cases, additional bonding of the electrical machine components, for example between the electrical machine frame and the terminal box, may be required (see Figure 19).

Where a common lubrication system is used for electrical machine and driven load, care shall be taken to prevent coupling across insulated bearing housings, e.g. by using insulating sleeves and washers for the fasteners, and foundation bolts as well as use of insulating type pipe sections made of ceramic or high density oil resistant PVC.

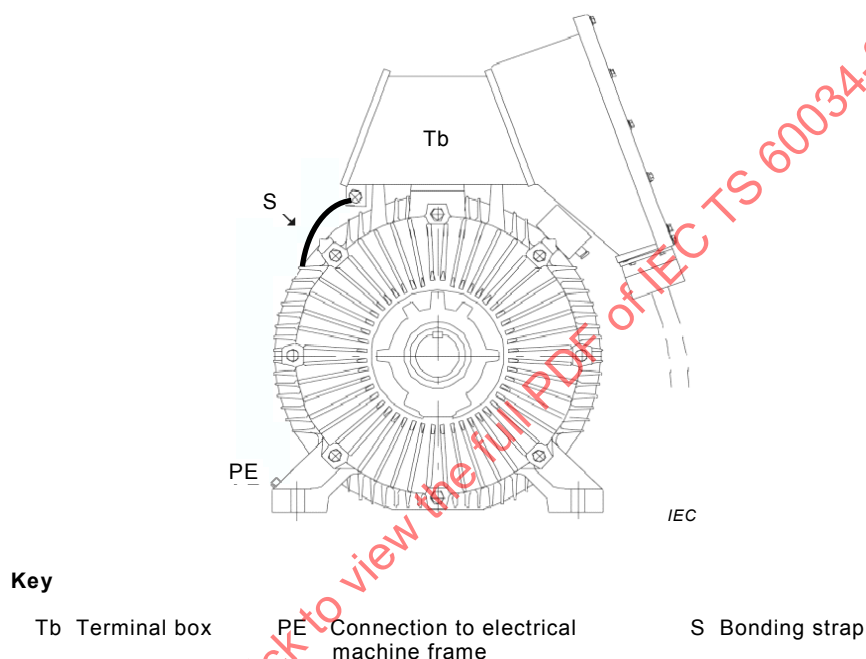


Figure 19 – Bonding strap from electrical machine terminal box to electrical machine frame

9.1.4 Electrical machine power cables for high switching frequency converters

9.1.4.1 Recommended configurations

For power levels greater than 30 kW, cables where the single core power and ground conductors are symmetrically disposed may be beneficial to reduce HF bearing currents and EMC effects.

Shielded multicore cables are preferred for lower powers and easy installation. Up to 30 kW electrical machine power and 10 mm² cable size, unsymmetrical cables may also be satisfactory but require more care in installation. A foil shield is common in this power range.

To operate as a protective conductor, the shield conductance should be at least 50 % of the phase conductor conductance. At high frequency, the shield conductance should be at least 10 % of the phase conductor conductance. These requirements are easily met with a copper or aluminium shield/armour. Because of its lower conductivity, a steel shield requires a larger cross-section, and the shield helix should be of low-gradient. Galvanizing will increase the high-frequency conductance. If the shield impedance is high, the voltage drop along it caused by high-frequency return currents may raise the electrical machine frame potential with respect to the (grounded) rotor sufficiently to cause undesirable bearing currents to flow (see

Clause 8). The EMC-effectiveness of the shield may be assessed by evaluation of its surface transfer impedance, which should be low even at high frequencies.

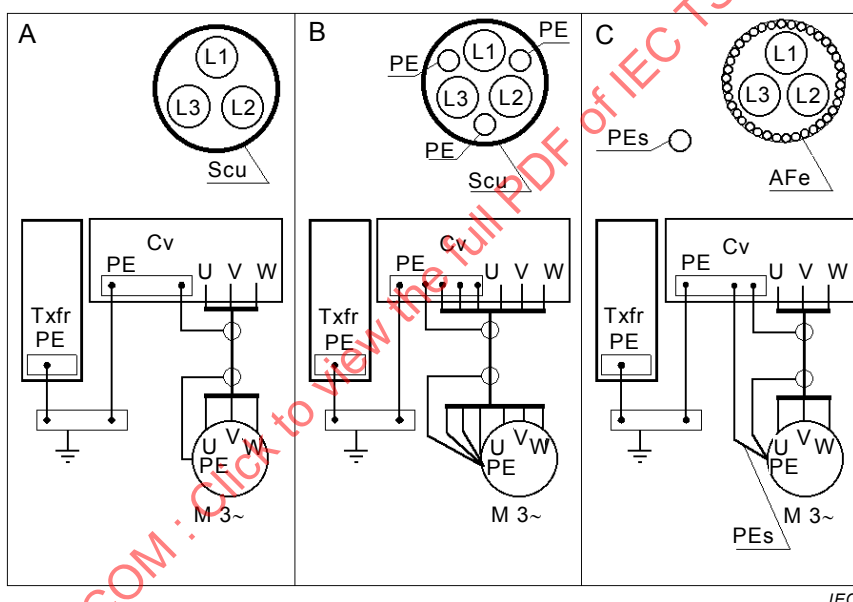
Cable shields should be grounded at both ends. 360° bonding of the shield will utilize the full high-frequency capability of the shield, corresponding to EMC good practice (see 9.1.4.3).

Some examples of suitable shielded cables are:

- three-core cable with a concentric copper or aluminium protective shield (see Figure 20 A). In this case, the phase wires are at an equal distance from each other and from the shield, which is also used as the protective conductor;
- three-core cable with three symmetrical conductors for protective earthing and a concentric shield/armour (see Figure 20 B). The shield of this cable type is for EMC and physical protection only;

NOTE For low-power systems, a single conductor for protective earthing might be satisfactory.

- three-core cable with a steel or galvanized iron, low pitch, stranded armour/shield (see Figure 20 C). If the shield has an insufficient cross-section for use as a protective conductor, a separate earthing conductor is needed.



Scu Concentric copper
(or aluminium) screen

AFe Steel armour

Txfr Transformer

Cv Converter

PEs Separate
ground
wire

Figure 20 – Examples of shielded electrical machine cables and connections

In all cases, the length of those parts of the cable which are to be connected at the frequency converter junction and at the electrical machine terminal box, and therefore have the shield removed, should be as short as possible.

Typically, shielded cable lengths up to about 100 m can be used without additional measures. For longer cables, special measures, such as output filters, may be required. When a filter is used, the above recommendations apply to the cable from the converter output to the filter. If the filter is EMC-effective, the cable from the filter to the electrical machine does not need to be shielded or symmetrical, but the electrical machine may require additional earthing.

Single-core unshielded cables may be suitable for electrical machine cables for higher powers, if they are installed close together on a metallic cable bridge which is bonded to the earthing

system at least at both ends of the cable run. Note that the magnetic fields from these cables may induce currents in nearby metalwork, leading to heating and increased losses.

9.1.4.2 Parallel symmetrical cabling

When cabling a high-power converter and electrical machine, the high current requirements may make it necessary to use several conductor elements in parallel. In this case, the appropriate cabling for easy (symmetrical) installation should be done according to Figure 21.

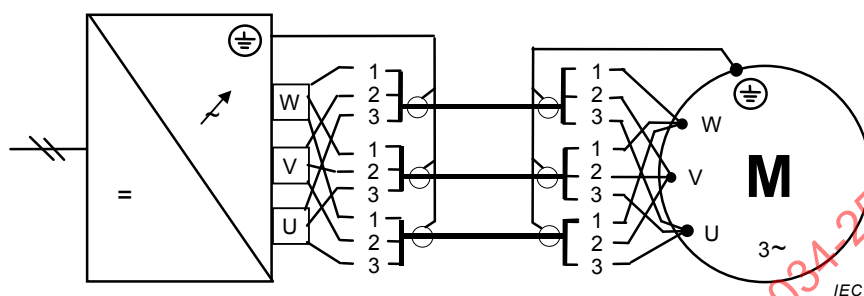
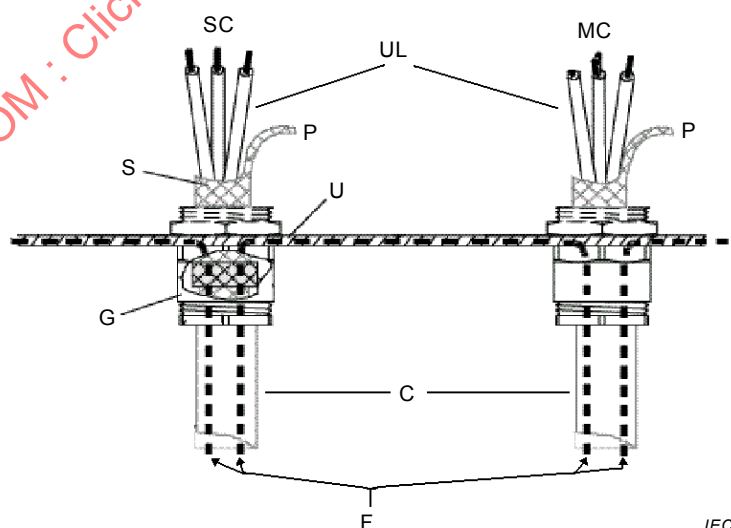


Figure 21 – Parallel symmetrical cabling of high-power converter and electrical machine

9.1.4.3 Cable terminations

When installing the electrical machine cable, it should be ensured that the shield is high frequency (HF) connected to both the converter and the electrical machine enclosure. This requires that the electrical machine terminal box is made of an electrically conductive material like aluminium, iron, etc. that is high frequency electrically connected to the enclosure. The shield connections should be made with 360° terminations, giving low impedance over a wide frequency range from d.c. to 70 MHz. This effectively reduces shaft and frame voltages and improves EMC performance.

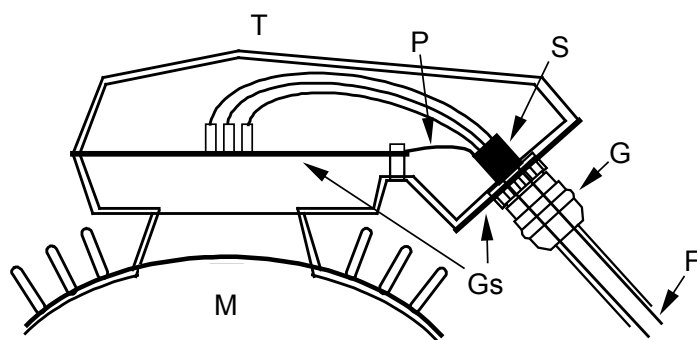
Examples of good practice for the converter and electrical machine ends with lower power are shown in Figure 22 and Figure 23 respectively.



Key

SC	Supply cable	MC	Electrical machine cable	UL	Unscreened length (as short as possible)
S	Cable shield	P	"Pigtail" (as short as possible)	U	Unpainted gland plate
G	EMC cable gland	C	Cables (outside enclosure)	F	Continuous Faraday cage

Figure 22 – Converter connections with 360° HF cable glands showing the Faraday cage



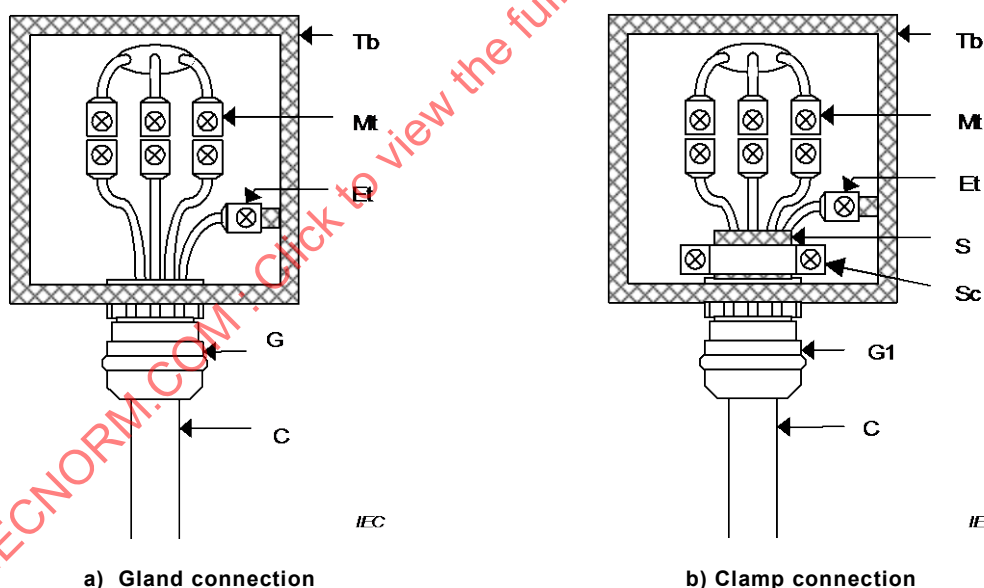
IEC

Key

T	Terminal box (conductive)	S	Cable shield	P	Pigtail (as short as possible)	M	Electrical machine frame
Gs	Conductive gaskets	G	EMC cable gland	F	Continuous Faraday cage		

Figure 23 – Electrical machine end termination with 360° connection

The shield connections at the electrical machine terminal box should be made with either an EMC cable gland as shown in Figure 24a or with a shield clamp as shown in Figure 24b. Similar connections are required at the converter enclosure.



IEC

IEC

a) Gland connection

b) Clamp connection

Key

Tb	Machine terminal box	Mt	Machine terminals	Et	Earthing terminal	S	Cable screen
Sc	Screen clamp	G	EMC cable gland	G1	Non-EMC cable gland	C	Cable

Figure 24 – Cable shield connection

9.1.4.4 Cabling and earthing of auxiliary devices

Auxiliary devices, such as tachometers, should be electrically insulated from the electrical machine in order to prevent the formation of current paths through them, leading to false readings or possible damage. An electrically insulating coupling is a possible solution for a coupling-type encoder. The insulation may be implemented for a hollow-shaft type tachometer by insulating the ball joints or the bar of the engaging arm. The shield of the tachometer cable

should be insulated from the tachometer frame. The other end of the shield is grounded at the converter.

Hollow-shaft tachometers with electrical insulation between the hollow-shaft and the tachometer frame will allow connection of the cable shield to the tachometer frame.

The use of double shielded cable is preferred for a pulse encoder. To minimize HF interference problems the shield should be grounded at the encoder end via a capacitor. Single shielded cable may be used with an analogue tachometer.

To prevent unwanted coupling, the cable routing of auxiliary devices should be separated from that of the power cabling.

9.1.4.5 Cabling of integrated sensors

In general, the recommendations for analogue tachometers given in 9.1.4.4 apply to integrated sensors (for example, thermocouples). However, as the wiring to integrated sensors is usually routed in close proximity to the power wiring within the electrical machine, its insulation needs to be adequate for the higher voltages encountered. In these cases, the use of shielded cable may not always be possible.

9.2 Reactors and filters

9.2.1 General

In some installations, for example to reduce voltage stress or to improve EMC performance, the use of reactors or output filters may be beneficial. However, the electrical machine performance may be affected due to the voltage drop across these components.

9.2.2 Output reactors

These are specially designed reactors which can accommodate the PWM waveform and are used to reduce the du/dt and peak voltage. However, care is needed as reactors can theoretically extend the duration of overshoot if incorrectly selected – particular care is needed with ferrite core inductors. In the case shown in Figure 25a, the addition of the reactor has increased the rise-time to around 5 μs and reduced the peak voltage to 792 V. Normally, the output reactor is mounted within the converter cabinet. Output reactors can also be used to compensate for cable charging currents and may be used for electrical machine cable lengths up to many hundred metres on larger drives.

9.2.3 Voltage limiting filter (du/dt filter)

In this case, a design consisting of capacitors, inductors and diodes or resistors may be used to limit the du/dt , drastically reducing the peak voltage and increasing the rise-time. In the example shown in Figure 25b, the peak voltage is reduced to 684 V with a du/dt of 40 V/ μs . Some increased losses of 0,5 % – 1,0 % should be accommodated, and there may be a reduction in breakaway and breakdown torque.

9.2.4 Sinusoidal filter

A special design of low pass filters allows the high frequency currents to be shunted away and the resulting voltage waveform on the output to the electrical machine becomes sinusoidal. The phase-to-phase output voltage (differential) for approximately 1,5 periods of the corner point frequency is shown in Figure 25c. Generally, there are the following two types of sinusoidal filters.

- a) Design with both phase-to-ground and phase-to-phase filtering.
- b) Design with only phase-to-phase filtering.

These filters are expensive and have also other limitations. They prevent the electrical machine voltage from exceeding 90 % of the supply voltage (thereby de-rating the converter). They also will not be suitable for applications that require high dynamic performance.

9.2.5 Electrical machine termination unit

An electrical machine termination unit can be connected at the electrical machine terminals. Its purpose is to match the electrical machine impedance to that of the cable, thereby preventing voltage reflections at the electrical machine. For the example illustrated in Figure 25d the peak voltage is now only 800 V with a rise-time of 2 μ s. Typically, these filters add around 0,5 % to 1,0 % losses.

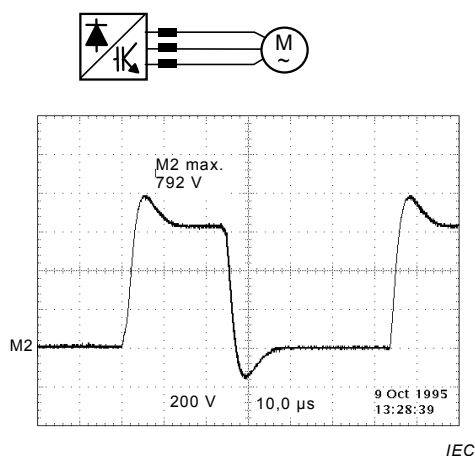


Figure 25a – Output reactor (3 % voltage drop)

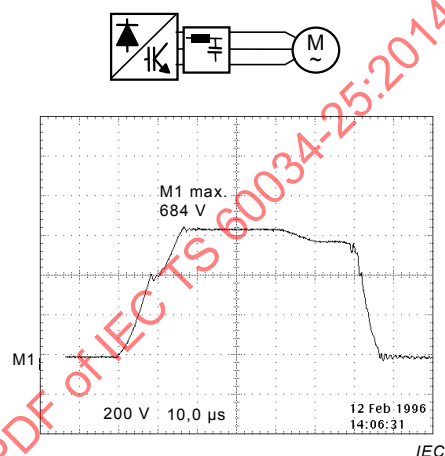


Figure 25b – Output du/dt filter

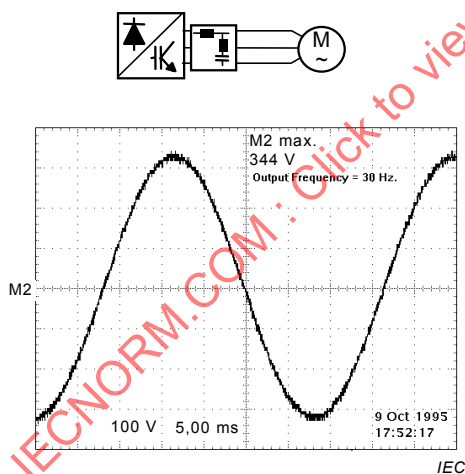


Figure 25c – Sinusoidal filter

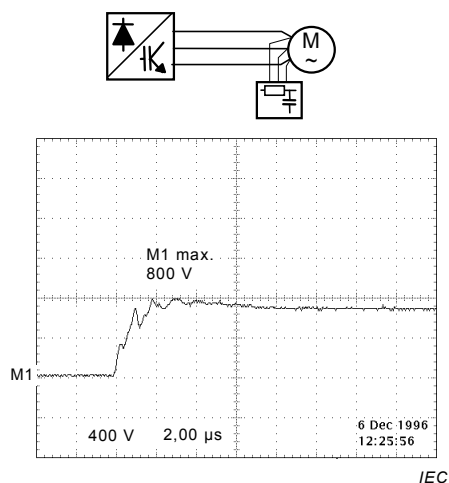


Figure 25d – Electrical machine termination unit

Figure 25 – Characteristics of preventative measures

9.3 Power factor correction

Power factor correction at the input of the converter should never be undertaken without harmonic analysis.

The use of power capacitors for power factor correction on the load side of an electronic control connected to an induction electrical machine is not recommended; damage to the control may occur and power factor capacitors are not generally rated for the high frequencies to which they are subjected.

Power factor correction at the input of a voltage source converter can be achieved by the use of a converter with an active front end.

See IEC TS 62578.

9.4 Integral electrical machines (integrated electrical machine and drive modules)

When a converter is mounted inside the electrical machine enclosure, i.e. in the electrical machine terminal box or in a separate compartment forming an integral part of the total electrical machine enclosure construction, where both converter and electrical machine utilize a common cooling system, the whole unit is called an integral electrical machine.

It has some clear benefits for the user:

- easy installation and commissioning (usually no special cables or additional bonding or earthing);
- common integral enclosure helps to fulfil the EMC-requirements (a Faraday cage). It also reduces the risk of shaft grounding current;
- no long cables or leads between the converter and the electrical machine keep the voltage reflections and peak voltage low and predictable but dv/dt is not reduced;
- compact solution i.e. savings in total required space and installation;
- a single supplier for electrical machine and converter, i.e. clear responsibility for the PDS.

But it has some disadvantages too:

- depending on the application, the environment may be very hostile for the converter electronics (high degree of enclosure protection required and shock and heat/cold resistant circuit boards and components);
- the technical life of the main components may differ significantly (electrical machines some 15 to 20 years but converters only 5 to 10 years).

10 Additional considerations for permanent magnet (PM) synchronous electrical machines fed by voltage source converters

10.1 System characteristics

The benefits of a PDS consisting of a voltage source converter and a permanent magnet synchronous electrical machine instead of an induction electrical machine are:

- lower VA rating of the converter, as a synchronous electrical machine can be rated for unity power factor;
- losses in the electrical machine might be lower. For system efficiency review the losses in the converter shall be taken into account;
- reduced machine size, compared with an induction electrical machine of the same rating;
- in a properly designed electrical machine, the rotor losses are minimal and therefore will have no effect on the thermal behavior of the rotor;
- simpler cooling arrangements of the electrical machine, due to minimal rotor losses.

On the other hand, operation in the field-weakening range requires special measures, as the field of the PM needs to be reduced by the stator current, which might require a reduction of the available output power.

10.2 Losses and their effects

The statements of Clause 5 remain valid.

As PM synchronous electrical machines do not usually have a damper winding, the harmonic currents can, depending on the rotor design, cause eddy currents in the permanent magnets or in the solid parts of the rotor (or both). The heating of the magnets due to increased stator losses and the eddy currents in the magnets can cause permanent demagnetization.

10.3 Noise, vibration and torsional oscillation

The statements of Clause 6 remain valid.

10.4 Electrical machine insulation electrical stresses

The statements of Clause 7 remain valid.

When the electrical machine is operating in regenerating mode, care should be taken that the back EMF does not exceed the capabilities of the installation. This should be a part of the installation risk analysis under particular fault circumstances, for example control loss during deep field weakening, or short circuit of the wiring, etc.

10.5 Bearing currents

The statements of Clause 8 remain valid.

NOTE There may also be an additional bearing in the feedback device.

10.6 Particular aspects of permanent magnets

Permanent magnet demagnetization during electrical machine operation usually occurs because of abnormally large demagnetizing current peaks, due for instance to fault conditions or motor control loss. Heating of permanent magnets can increase this risk, making demagnetization happen at lower current values.

11 Additional considerations for cage induction electrical machines fed by high voltage source converters

11.1 General

In general, the statements made with respect to low-voltage electrical machines supplied by voltage source converters are valid for medium-voltage or high voltage electrical machines and converters as well. Nevertheless, some differences exist.

11.2 System characteristics

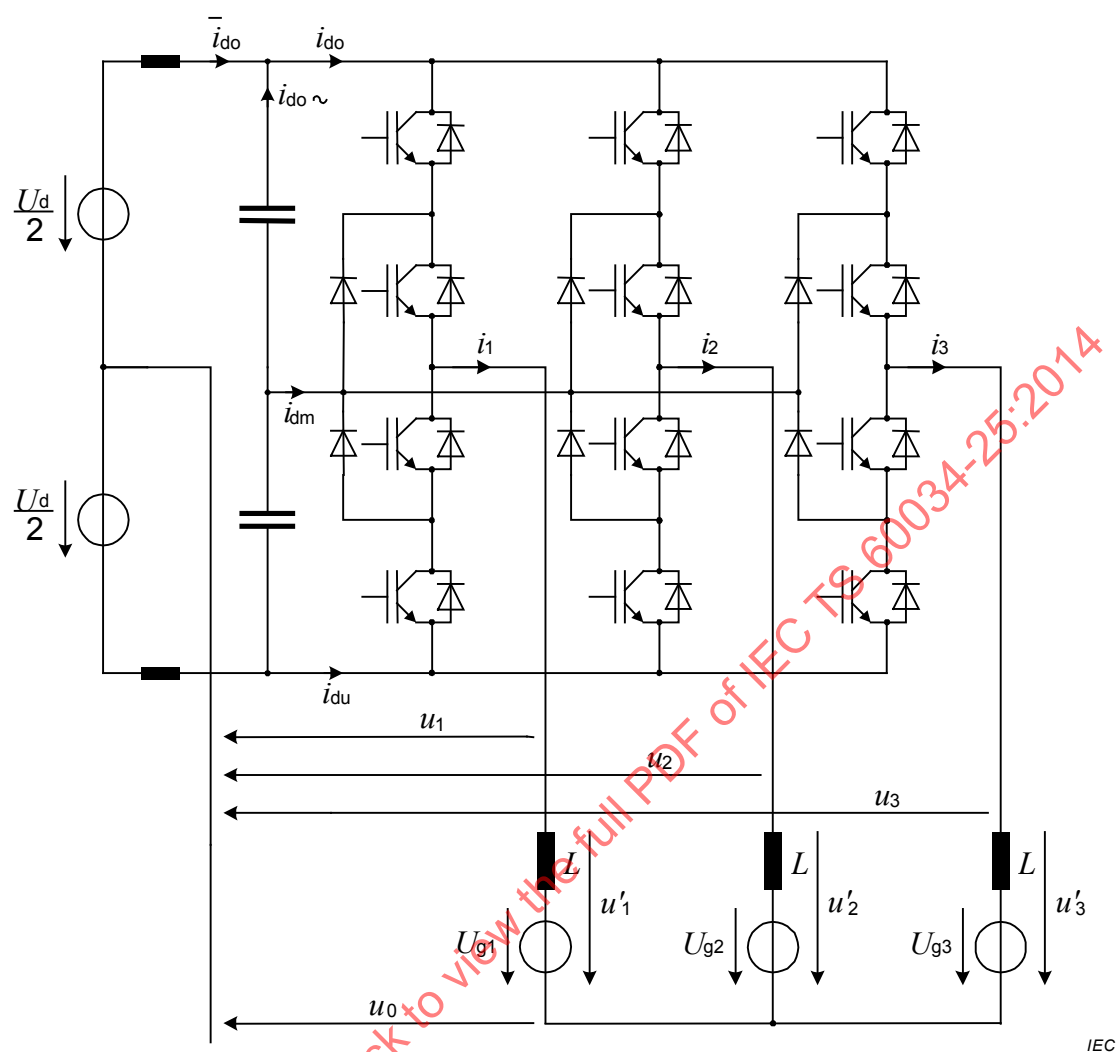


Figure 26 – Schematic of typical three-level converter

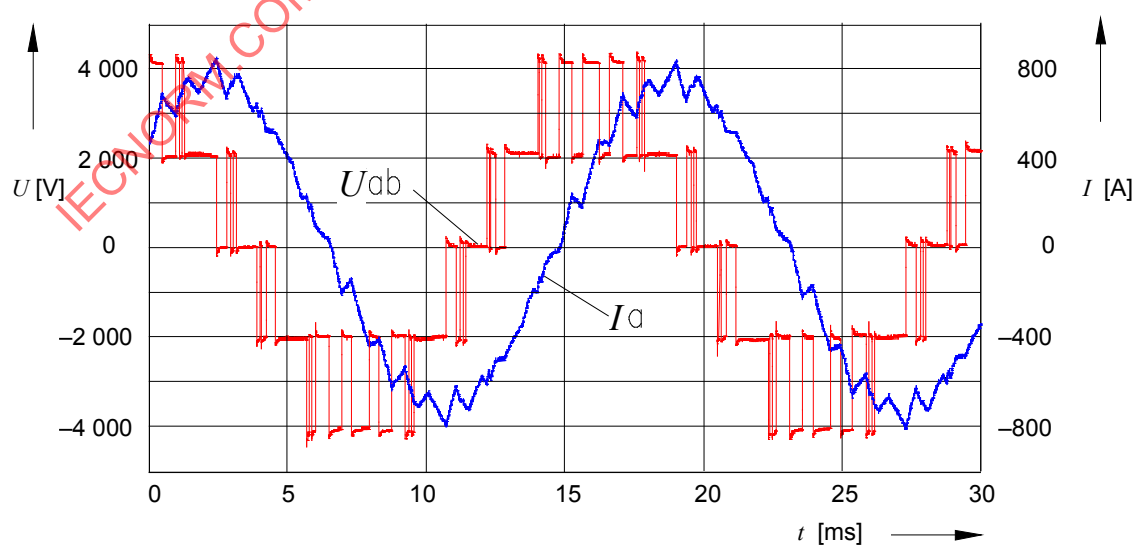


Figure 27 – Output voltage and current from typical three-level converter

Medium voltage converters might be three-level or multi-level converters, which means that they have more than one semiconductor power device in each branch of the inverter bridge connected in series (Figure 26). For a three-level converter, for example, the line-to-line voltage can be impressed in 5 different values ($-U_d$, $-\frac{1}{2} U_d$, 0, $\frac{1}{2} U_d$, U_d) instead of only 3 values ($-U_d$, 0, U_d) possible for two-level converters. On the one hand, this allows a better waveform of the output voltage, reducing harmonic currents (by approximately 50 % for each increase in level Figure 27). On the other hand, the pulse frequency of medium voltage converters is lower than that of low-voltage converters, reducing the frequency of the voltage harmonics and tending to increase the harmonic currents.

11.3 Losses and their effects

11.3.1 Additional losses in the stator and rotor winding

Each type of converter impresses a certain extent of harmonic current or of harmonic voltage causing harmonic currents into the electrical machine. The additional losses generated in the stator winding due to these harmonic currents depend significantly on the height of the strands of the stator winding and its arrangement in the cross-sectional area of the slots, since the effective a.c. resistance of the winding increases strongly with frequency and with the strand height. Where the level of harmonic currents is low, a special design of the strands or strand transposition is usually not necessary for electrical machines fed from voltage source converters.

As mentioned in 11.2, three-level or multi-level converters impress a better (more sinusoidal) waveform of the output voltage, reducing harmonic currents. High voltage converters usually have a lower pulse frequency, which reduces the additional iron losses but tends to increase the harmonic currents. Due to the numerous factors influencing the additional losses in the electrical machine, a general statement is not possible.

As discussed in 5.2, the rotor winding will also generate additional losses due to harmonics which are further increased by the skin effect.

11.3.2 Measurement of additional losses

For drives with power ratings in the megawatt range, a test of the complete PDS in the manufacturer's test field is often not economic, since it consumes a significant amount of time and cost. Nevertheless, the additional losses have to be considered for the overall efficiency of the PDS and for the thermal design of the electrical machine.

For a properly designed PDS, it is usually sufficient to rely on the calculated values. This calculation shall consider the main influencing factors like current displacement in stator and rotor windings.

By agreement between manufacturer and customer, tests may be performed according to the IEC 60034-2 series.

11.4 Noise, vibration and torsional oscillation

As explained in 11.3.2, it is usually not economic for PDS with power ratings in the megawatt range to perform measurements in a test site with the electrical machine supplied from a converter. If required, noise and vibration measurements of the complete PDS should be performed during the commissioning at site, but may be considerably influenced by the performance of the driven equipment.

For electrical machines with power ratings in the megawatt range and maximum operating speeds exceeding approximately 2 500 r/min, it is, in many cases, not possible or not beneficial to achieve a rotor dynamic design with the first lateral critical speed above the maximum operation speed. Consequently, it is – especially in case of a speed control range with a width of more than 50 % of the rated speed – not possible to keep the speed control range free of lateral critical speeds.

Since the operation at, or close to, a lateral critical speed can cause inadmissible shaft vibrations, it is recommended to skip these resonant frequencies. In cases where it is required to fix the skip bands in the design phase, their width might be some 100 r/min due to the limited accuracy for the prediction of the lateral critical speeds and the damping of the complete shafting. The skip band width can be kept significantly smaller, when determined during commissioning with the knowledge of the real critical speeds; this procedure might be preferable.

11.5 Electrical machine insulation electrical stresses

11.5.1 General

A critical parameter that determines the first-turn electrical stress is the maximum rate of voltage change (du/dt) on the winding (Figure 28). For low-voltage systems, the applied voltage will generally be within the range of 400 V to 690 V, and so the du/dt can be sufficiently specified by the rise-time. For high-voltage systems, there is a greater range of applied voltage, and so it is necessary to consider the actual du/dt .

NOTE Typical values of du/dt are 3 kV/ μ s to 4 kV/ μ s.

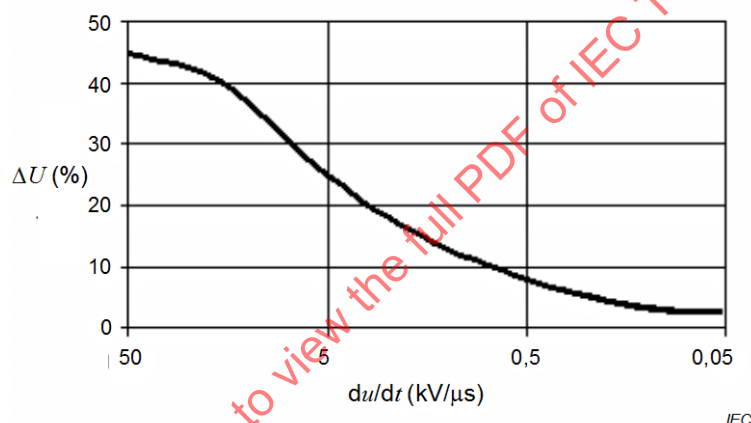


Figure 28 – Typical first turn voltage ΔU (as a percentage of the line-to-ground voltage) as a function of du/dt

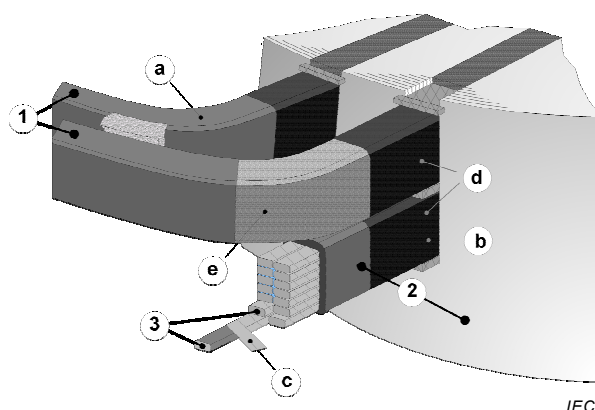
11.5.2 Electrical machine terminal overvoltage

In addition to the factors mentioned in 7.1 to 7.3, the overvoltage appearing at the terminals of a converter-fed electrical machine also depends on the number of converter stages. Voltage impulse levels shall be determined by the system integrator according to IEC TS 61800-8. The result shall be communicated to the electrical machine manufacturer so the insulation system can be designed accordingly.

11.5.3 Stator winding voltage stresses in converter applications

11.5.3.1 General

Converter-fed electrical machine form-wound stator windings, for sinusoidal voltage ratings of 2,3 kV and above, exposed to short rise-time surges with significant magnitudes and high frequencies, can be subjected to additional voltage stresses at the locations 1, 2 and 3 illustrated in Figure 29.



- | | |
|---|---|
| 1 | Location of phase-to-phase insulation |
| 2 | Location of phase-to-ground insulation |
| 3 | Location of turn-to-turn insulation |
| a | Phase insulation/end-winding insulation |
| b | Ground insulation |
| c | Strand insulation |
| d | Slot voltage stress control layer |
| e | End-winding voltage stress control layer (stress grading) |

Figure 29 – Medium-voltage and high-voltage form-wound coil insulating and voltage stress control materials

The effects of these additional stator winding voltage stresses on the stator winding insulation system are discussed in 11.5.3.2 to 11.5.3.5. It is important that the electrical machine designer is aware of the characteristics of converter output voltage waveforms, as seen at the electrical machine terminals, to ensure that these are taken into account during stator winding design.

11.5.3.2 Voltage stresses between adjacent conductors in line end coils

If there are air voids next to or between the turn insulation, failure from partial discharges (PD) can occur if inadequate turn insulation is used. Such failures result from continuous exposure to high-voltage surges having rise-times in the order of 50 ns to 2 μ s. Short rise-time voltage surges will have a non-uniform voltage distribution across the winding line end coils to significantly elevate turn-to-turn voltages stresses. Most electrical machine manufacturers are aware of this and use suitable strand or turn insulation and good vacuum pressure impregnation (VPI), or hot pressed resin rich coil insulation processes, in stator windings rated 2,3 kV and above. This approach is effective in minimizing the risk of turn failures from PD caused by continuous high frequency surges and air voids around the winding conductors.

11.5.3.3 Voltage stresses between conductors and ground

Voltage stresses between conductors and ground are influenced by the PDS earthing configuration. Care should be taken to avoid excessive dielectric heating of insulating materials, caused by high-frequency capacitive currents, which can raise the stator winding temperature and increase the rate of thermal ageing.

In addition, the properties of semi-conductive voltage stress control coatings can be degraded by this additional heating. Once the voltage stress relief coating degrades the process is accelerated by the ozone generated by PD activity.

11.5.3.4 Voltages between adjacent line end coils in different phases

Phase-to-phase PD can occur if the voltage stress between such coil components is greater than about 3 kV_{peak}/mm. This is more likely in converter-fed electrical machines due to the higher transient repetitive voltages that appear on each phase. Appropriate end-winding spacing is required for converter-fed electrical machines, or the voltage potential between coil surfaces in different phases should be reduced.

11.5.3.5 Across the semi-conductive/grading material voltage stress control layers

High-voltage electrical machines with form-wound coils may have a grading layer of material, normally having a non-linear resistivity, that overlaps the stress-control layer at each end, in order to attenuate high-voltage stresses at the interface between the stress-control layer and the end-windings (see Figure 29). Operating experience has shown that conventional voltage stress control materials can degrade fairly rapidly as a result of high frequency voltages significantly increasing dielectric heating in both the conductive and grading materials. The effect is exacerbated because the higher frequencies also cause the silicon carbide materials to be less effective in linearizing the voltage along the surface of the coils which tends to concentrate the heating to a shorter area near the core ends. Manufacturers and researchers are now looking at capacitive grading systems to overcome this problem which should be identified by IEC 60034-18-42 stator winding insulation system qualification tests.

11.6 Bearing currents

The statements of Clause 8 remain valid.

12 Additional considerations for synchronous electrical machines fed by voltage source converters

12.1 System characteristics

The benefits of a *PDS* consisting of a voltage source converter and a synchronous electrical machine instead of an induction electrical machine are as follows.

- Lower VA rating of the converter, as a synchronous electrical machine can be rated for unity power factor.
- Losses in the electrical machine might be lower. For system efficiency review the losses in the converter shall be taken into account.
- Higher pull-out torque in the field-weakening range of the converter.

All statements of 11.2 remain valid.

12.2 Losses and their effects

The statements of 11.3 remain valid.

In addition it shall be mentioned that the losses in the damper cage of synchronous electrical machines are not identical in all bars.

12.3 Noise, vibration and torsional oscillation

The statements of 11.4 remain valid.

12.4 Electrical machine insulation electrical stresses

The statements of 11.5 remain valid.

12.5 Bearing currents

The statements of 11.6 remain valid.

13 Additional considerations for cage induction electrical machines fed by block-type current source converters

13.1 System characteristics (see Figures 30 and 31)

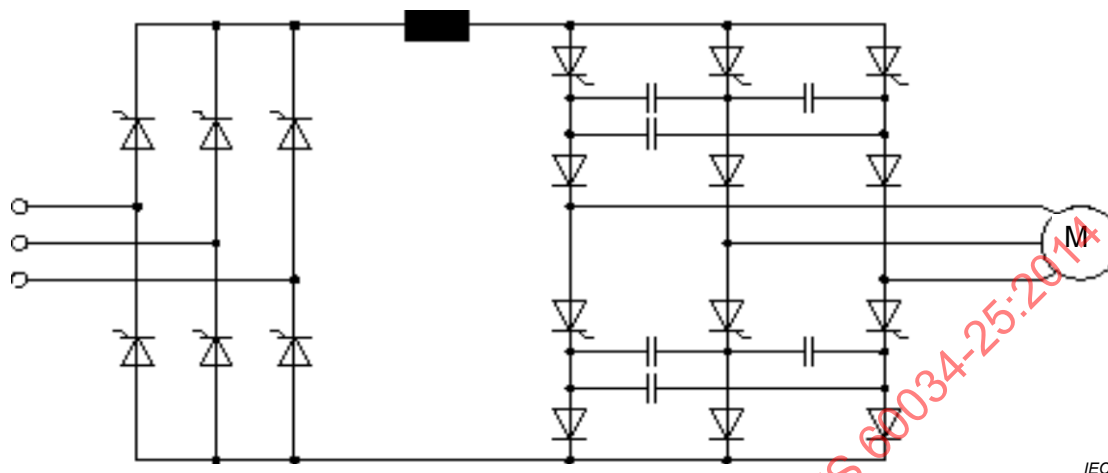


Figure 30 – Schematic of block-type current source converter

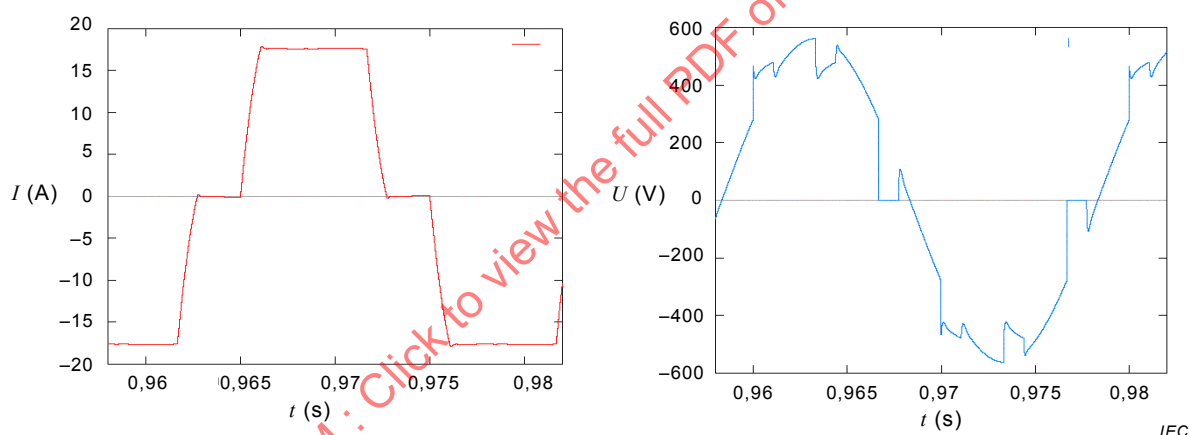


Figure 31 – Current and voltage waveforms of block-type current source converter

The converter is characterized by

- a controlled, line-commutated rectifier connected to the power supply;
- a large reactor in the intermediate circuit to smooth the d.c. current and;
- a controlled, self-commutated inverter connected to the electrical machine.

The electrical machine currents are block-type (120° blocks), containing harmonics of order $n = -5; +7; -11; +13; \dots$. The plus/minus sign indicates whether the magnetic field, which is excited by the harmonic currents, rotates in the same sense as the field of the fundamental current or reverse. The amplitudes of the harmonics are proportional to $1/n$. The phase-voltage of the electrical machine contains transients at all commutation intervals of the current.

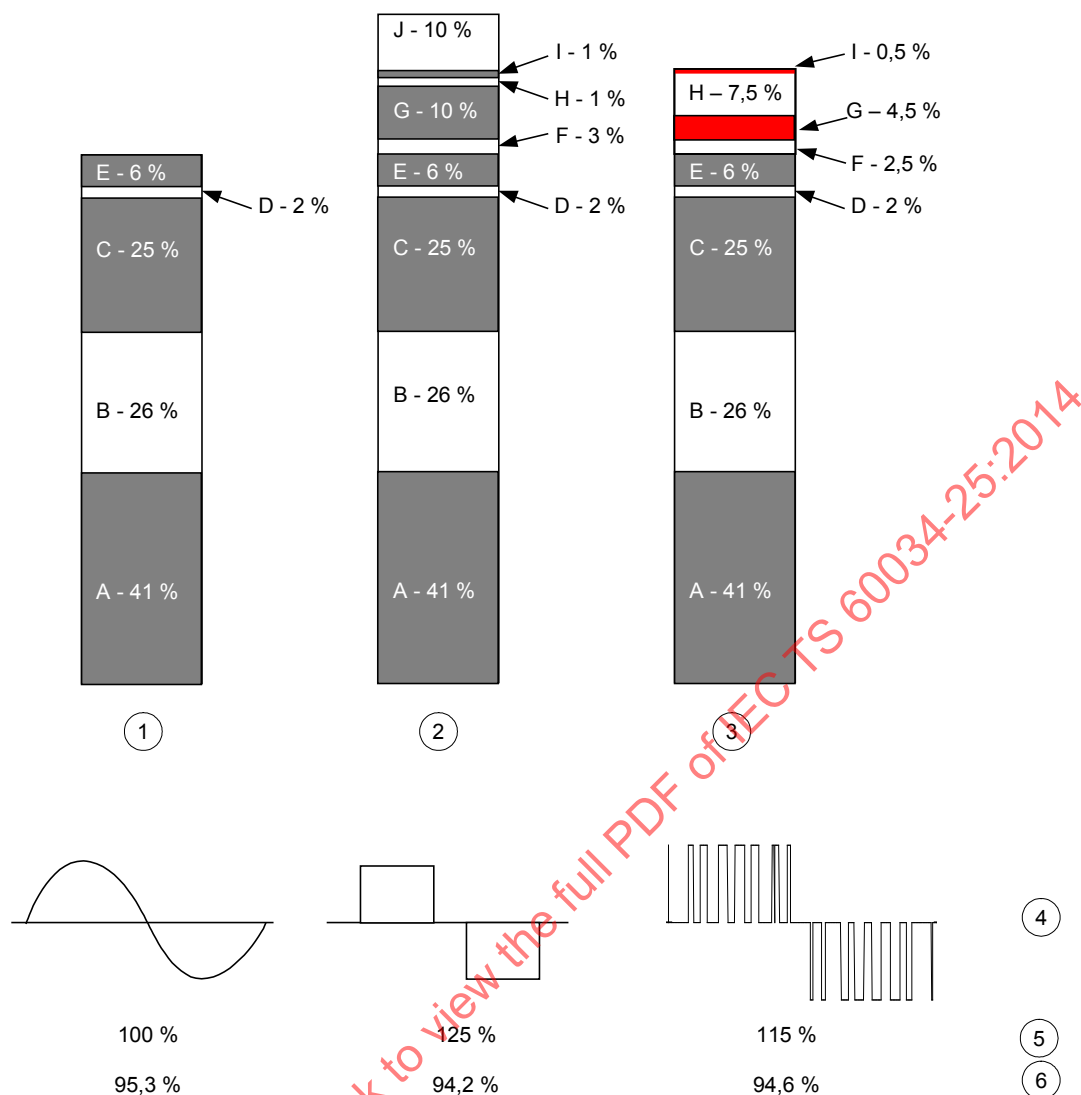
The stator winding is part of the commutation circuit. Therefore, the electrical machine should be designed for low leakage inductance; the converter manufacturer shall be familiar with its approximate value for proper design of the commutation capacitors.

13.2 Losses and their effects

Even though the phase voltage is nearly sinusoidal, the sudden jump of the currents during commutation is associated by fast changes of the slot leakage flux, causing additional iron losses (so-called commutation losses) especially in the stator teeth.

Another important part of extra losses caused by harmonics are the winding losses in the cage due to the high frequencies approximately $(n - 1)f_1$ of the harmonic currents. Therefore the extra losses of an electrical machine supplied by a current source converter at full load, are typically higher than the extra losses of the same electrical machine supplied by a PWM inverter. The columns in Figure 32 show, as an example, the calculated loss composition of a specific electrical machine (frame size 315 M; design N) when supplied both from different converters with different harmonic content and from a sinusoidal supply. The example illustrates the relative importance of the different types of losses for the converter systems most widely used today. The comparison cannot be transferred to other converter-fed cage induction electrical machines and other types of converters (with different modulation schemes and pulse frequencies). To facilitate comparison in Figure 32, the fundamental voltages and currents during converter operation are assumed to be the same as under rated conditions.

According to Figure 32, the harmonic losses are higher for supply by current source converters than by voltage source converters. The difference diminishes at partial load, because the harmonic losses are constant for voltage source converter supply, but the harmonic losses increase with load for current source converter supply.



IEC

Losses caused by corner point frequency	Losses caused by harmonics
E Frictional losses	J Commutation losses
D Additional load losses	I Additional load losses
C Iron losses	H Iron losses
B Rotor winding losses	G Rotor winding losses
A Stator winding losses	F Stator winding losses

Key

- | | |
|--|---|
| 1 Sinusoidal voltage | 2 Current source converter |
| 3 Voltage source converter with carrier modulation (switching frequency ≈ 3 kHz) | 4 Time dependence of the impressed quantity |
| 5 Losses | 6 Efficiency |

Figure 32 – Influence of converter supply on the losses of a cage induction electrical machine (frame size 315 M, design N) with rated values of torque and speed

The statement given in 11.3.1 on the influence of the strand height of the stator winding on the additional losses in the stator winding due to current harmonics is of special importance for electrical machines fed from current source converters. For strands of electrical machines with power ratings in the megawatt range designed for sinusoidal voltage supply, a height of

some millimetres is not unusual. In order to reduce the additional losses, it is recommended to design electrical machines fed from current source converters with smaller strands and to limit the number of parallel connected strands placed above each other in the slot to three. Alternatively, a transposition of the strands either within one coil (bar) or between adjacent coils might be required.

Subclause 11.3.2 is valid for these electrical machines as well.

13.3 Noise, vibration and torsional oscillation

Additional magnetic tones are produced by the interaction of the fundamental waves (number of pole pairs p) of the harmonics and of corner point frequency. The waves of tensile stress, which are responsible for the noise emission of magnetic tones, are of the modes $n = 0$ or $r = 2p$ and of the frequencies $f_r = (n \pm 1)f_1$ ($n = 1, 2, 3, \dots$) respectively. Since harmonics of order $n > 13$ are of small amplitude, they can normally be neglected. Therefore, the frequencies of the additional tones are less than 1 kHz, far away from the resonance frequencies of the stator which are much higher. The increase of noise at converter supply in comparison to the operation of the same electrical machine at sinusoidal supply (at the same values of U_1, f_1 and load) is relatively small (in the range 1 dB to 5 dB).

The most important negative effect of current source converters on the performance of cage induction electrical machines is the generation of pulsating torques of relatively high amplitudes. In a six pulse circuit, the oscillating torques with 6 and 12 times the operational frequency (f_1) are of practical importance; their amplitudes are in the order of 15 % (frequency $6 \times f_1$) and 5 % (frequency $12 \times f_1$) of the rated torque. In addition, oscillating torques are excited by harmonics which are based on the ripples of the d.c. current in the intermediate circuit; these torques are of the frequency $6(f_1 - f_p)$ and $12(f_1 - f_p)$, where f_p is the power frequency of the mains. The current ripple in the intermediate circuit $(i_{\max} - i_{\min})/i_{d.c.}$ is typically of the order of 10 %, and results in pulsating torques having amplitudes of a few per cent of the rating torque.

Because of these pulsating torques, a careful torsional analysis of the complete rotating assembly is highly recommended. If one of the torsional critical speeds coincides with the frequency of a pulsating torque within the speed setting range, continuous operation at this speed is not permitted and may be dangerous. This is especially the case when couplings of small damping coefficient (metal-elastic couplings) are used. In such cases skipping of a small frequency band is advisable.

13.4 Electrical machine insulation electrical stresses

As already stated in 13.1, the phase-voltage of the electrical machine contains transients at all commutation intervals of the current. These transients stress the winding insulation; however, since the inverters are usually equipped by thyristors, the peak values and the rise-time are not so extreme that an enhanced insulation system would be necessary.

13.5 Bearing currents

It is proven by tests and practical experience that current source converter supply has little impact on the shaft voltage. No special measures for bearing protection are necessary.

13.6 Additional considerations for six-phase cage induction electrical machines

The term six-phase winding is often paraphrased by the text “two identical three-phase windings shifted against each other by the circumferential angle $30^\circ/p$ ”. The two windings are supplied by two identical current source converters as described in 13.1, but having a phase difference of the fundamental output currents of 30° .

This arrangement has the advantage, that the air-gap fields, which are excited by the harmonic currents of order $n = -5$ and $n = 7$ by both windings, eliminate each other. As a

consequence, no rotor losses are produced by these harmonics and also no pulsating torques of 6 times the corner point frequency exist. The frequencies of the pulsating torques follow the expression $12kf_1$ ($k = 1; 2; \dots$).

The formula of the frequencies of the pulsating torques, based on the d.c. current ripple, remains unchanged (see 13.3).

All statements of 13.1 to 13.5 regarding other effects of current source converters remain valid.

14 Additional considerations for synchronous electrical machines fed by LCI

14.1 System characteristics

Synchronous electrical machines with static or brushless excitation can also be supplied by current source converters (LCI). For the electrical machine, this type of supply is the same as a block-type current source converter. A damper winding is required to reduce the pulsating torques caused by the harmonic fields. If a solid-pole construction is used, the induced eddy currents have the same effect as a damper winding.

The rectifier connected to the power supply is line-commutated.

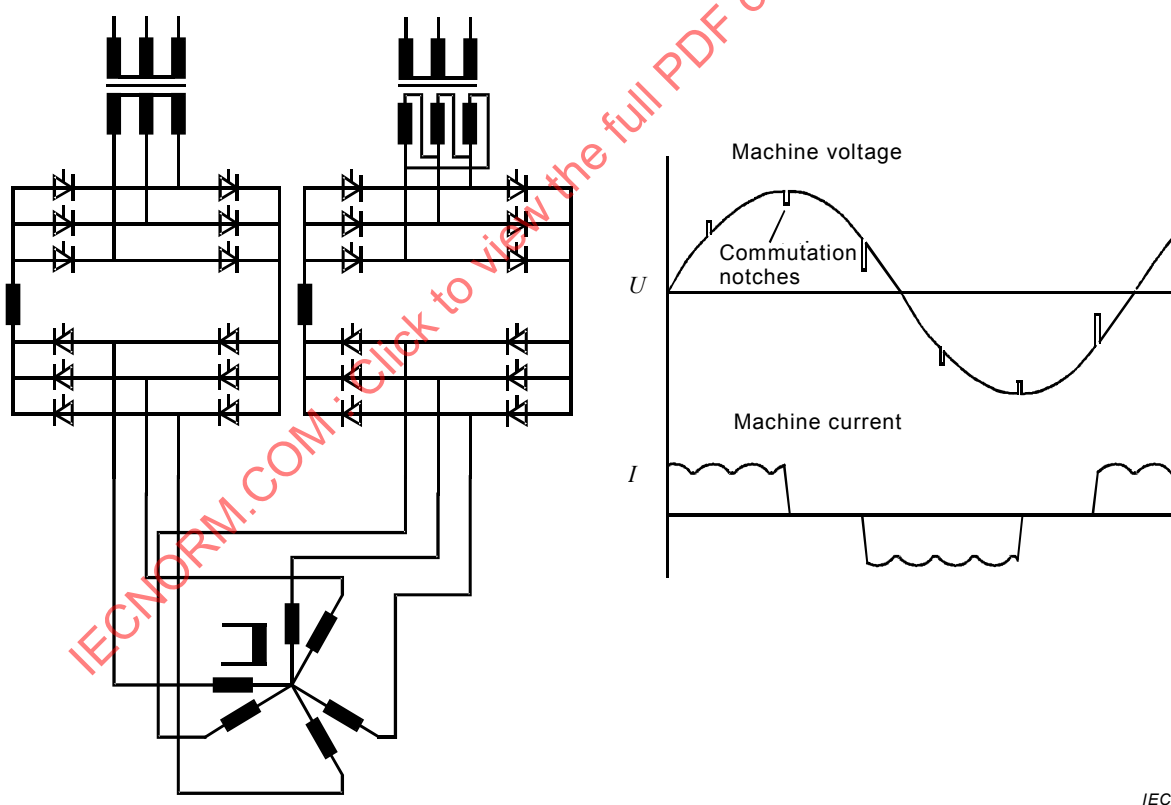


Figure 33 – Schematic and voltage and current waveforms for a synchronous electrical machine supplied from a current source converter

The inverter connected to the electrical machine is load-commutated. The synchronous electrical machine is operated overexcited in order to supply the reactive power which is necessary for the commutation of the inverter. In this case, the reactive power is not supplied by the converter, whereas in the case of an induction electrical machine both the active and the reactive power shall be supplied by the converter. Therefore, the converter of a

synchronous electrical machine can be designed to be smaller and less expensive. In addition, the commutation is as simple as that of the line-side inverter.

Another distinctive feature is that the synchronous electrical machine can produce reactive power only when it is turning, not at standstill. Therefore, starting would be impossible without additional measures such as d.c. link pulsing, whereby the reactive power, which is necessary for the operation of the commutation, can be supplied at very low speed, including standstill.

The six-phase arrangements shown in Figure 33 can be regarded as two six-pulse current source converters, each feeding one of the electrical machine's two three-phase windings. Alternatively, a real 12-pulse arrangement can be designed by using a three-winding transformer between the two six-pulse converters and a three-phase electrical machine. This arrangement eliminates in the transformer the frequencies $-5f_1$, $+7f_1$, $-17f_1$, $+19f_1$, ... (reducing additional losses in the stator winding). In addition, this arrangement allows the possibility to synchronize the electrical machine direct with the mains, in case speed adjustment is not required for some operation modes.

Electrical machines with eight or more poles are commonly salient pole electrical machines with laminated poles or pole shoes. A damper cage is incorporated in the pole shoes. For electrical machines with four or six poles, a laminated cylindrical rotor, or a rotor with laminated or solid salient poles is common. Two-pole electrical machines always have a cylindrical rotor, with either a laminated or a solid active part of the rotor. Cylindrical rotors always have a damper cage; in solid salient pole rotors damper currents will flow in the solid surface of the pole shoes. The copper damper cage of cylindrical rotors has the benefit of lower additional losses in the cage and somewhat lower pulsating torques compared to electrical machines with solid salient poles. Nevertheless, a general statement on the overall efficiency of both designs is not possible, since salient pole electrical machines naturally have lower windage losses than electrical machines with cylindrical rotor.

14.2 Losses and their effects

The statements of 13.2 and 13.6 remain valid.

The additional losses due to current harmonics require a proper design of the damper winding, especially in case of a three phase electrical machine supplied by a 6-pulse converter. Otherwise, these additional losses can have a negative influence on the temperature of the field winding.

As already stated in 14.1, a real 12-pulse converter arrangement will lead to a reduction of the additional losses in the stator winding.

14.3 Noise, vibration and torsional oscillation

The statements of 13.3 and 13.6 remain valid.

14.4 Electrical machine insulation electrical stresses

The statements of 13.4 remain valid.

14.5 Bearing currents

The statements of 13.5 remain valid.

15 Additional considerations for cage induction electrical machines fed by pulsed current source converters (PWM CSI)

15.1 System characteristics (see Figure 34)

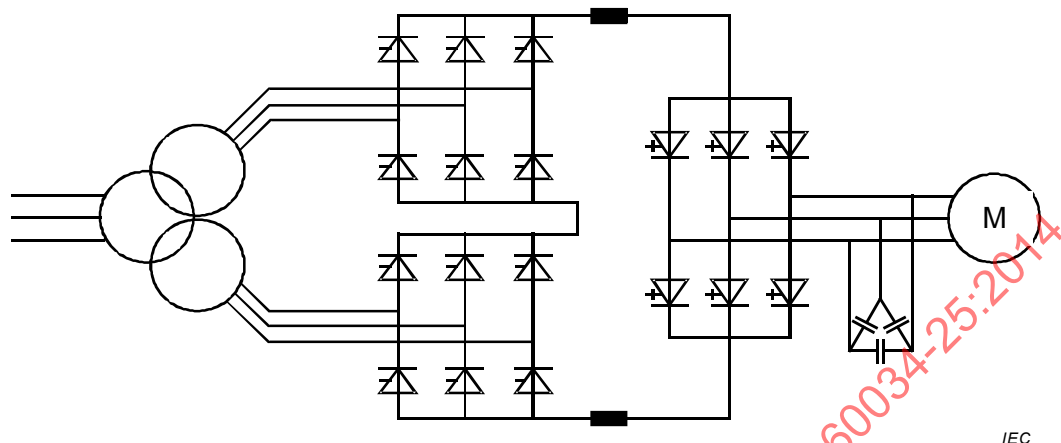
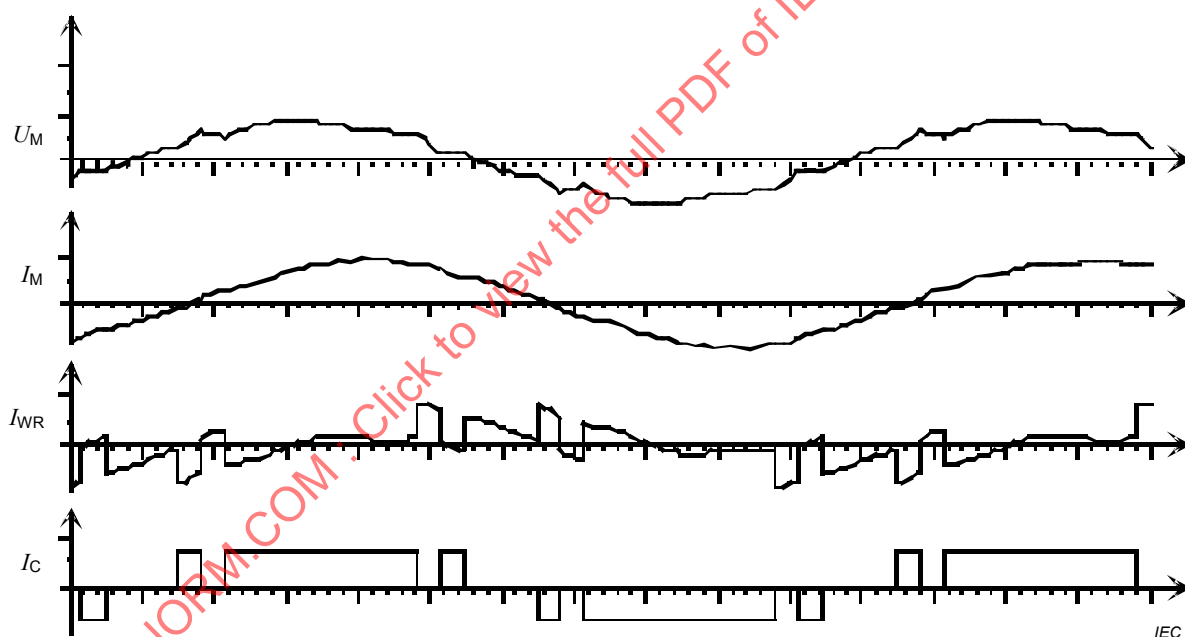


Figure 34 – Schematic of pulsed current source converter



Key

U_m	Electrical machine voltage	I_{wr}	Filter capacitor current
I_m	Electrical machine current	I_c	Inverter output current

Figure 35 – Voltages and currents of pulsed current source converter

A significant reduction of the harmonic voltages and currents caused by an current source converter can be achieved by a PWM of the inverter output current combined with filter capacitors at the converter output. Figure 35 shows that both electrical machine current and electrical machine voltage are close to a sinusoidal form. Nevertheless, the remaining harmonics need to be considered.

15.2 Losses and their effects

Due to the relatively low content of voltage and current harmonics, the additional iron losses are smaller than for electrical machines supplied by voltage source converters. There are no significant commutation losses to be expected. The additional losses in the stator winding are comparable to electrical machines supplied by voltage source converters, so that a strand transposition is usually not required.

NOTE Although the harmonic voltages of PWM CSI converters are lower than those of voltage source converters, their frequencies are also lower. It is therefore not possible to make a general statement concerning the relative amplitudes of the harmonic currents.

The statements of 11.3.2 remain valid.

15.3 Noise, vibration and torsional oscillation

The statements of 11.4 remain valid.

15.4 Electrical machine insulation electrical stresses

The statements of 13.4 remain valid.

15.5 Bearing currents

The statements of 13.5 remain valid.

16 Wound rotor induction (asynchronous) electrical machines supplied by voltage source converters in the rotor circuit

16.1 System characteristics

Slip-ring electrical machines with rotor supply from a voltage source converter are customary to be used as wind-turbine generators in the power range above 1 000 kW, but may be used also in electrical machine applications. The converters are usually equipped as an active infeed for power factor correction (see IEC TS 62578 for more details). The stator winding is connected directly to the mains. These electrical machines are also referred to as doubly fed electrical machines.

The speed of the drive is fixed by the formula $n = (f_1 \pm f_2)/p$, where f_1 is mains frequency and f_2 is converter output frequency. By this means, operation as electrical machine or generator is possible at speeds below and above the synchronous speed f_1/p .

The main advantage of this system is that the converter does not need to be rated for the full rated power of the induction electrical machine, but for a fraction only, which depends on the maximum slip and the reactive power requirement in case of power factor correction. Furthermore, it is possible to use a low voltage two level converter for the rotor circuit, even though the stator winding is for high voltage.

16.2 Losses and their effects

As the stator winding is connected directly to the mains, the harmonic content of the stator current is very low and additional losses are negligible. For the rotor winding, the general statements of Clause 5 apply. Special consideration needs to be given to the current displacement in the rotor winding: For wound rotor induction electrical machines with ratings in the MW range, the rotor winding is usually made from solid copper bars. As the rotor frequency of doubly fed electrical machines can exceed 10 Hz, the losses in the rotor winding can be significantly increased by current displacement, which increases the effective ohmic resistance of the rotor winding. This effect needs to be considered as well for the losses due to current harmonics in the rotor winding caused by the converter.

16.3 Noise, vibration and torsional oscillation

The statements of 11.4 remain valid.

16.4 Electrical machine insulation electrical stresses

As the stator winding is connected directly to the mains, its insulation stress does not differ from normal fixed-speed electrical machines. For the rotor winding, the statements of 11.5 remain valid.

16.5 Bearing currents

Due to the direct capacitive coupling, the bearing voltage ratio BVR is much higher in the case of electrical machines connected to a converter in the rotor circuit than in the case of a converter connected to the stator. Therefore the bearings are endangered. An earth brush and insulation of both bearings, to provide an impedance of at least $100\ \Omega$ at 1 MHz, are recommended. To protect the driven equipment and its auxiliaries, the coupling should be electrically isolating.

17 Other electrical machine/converter systems

17.1 Drives supplied by cyclo-converters

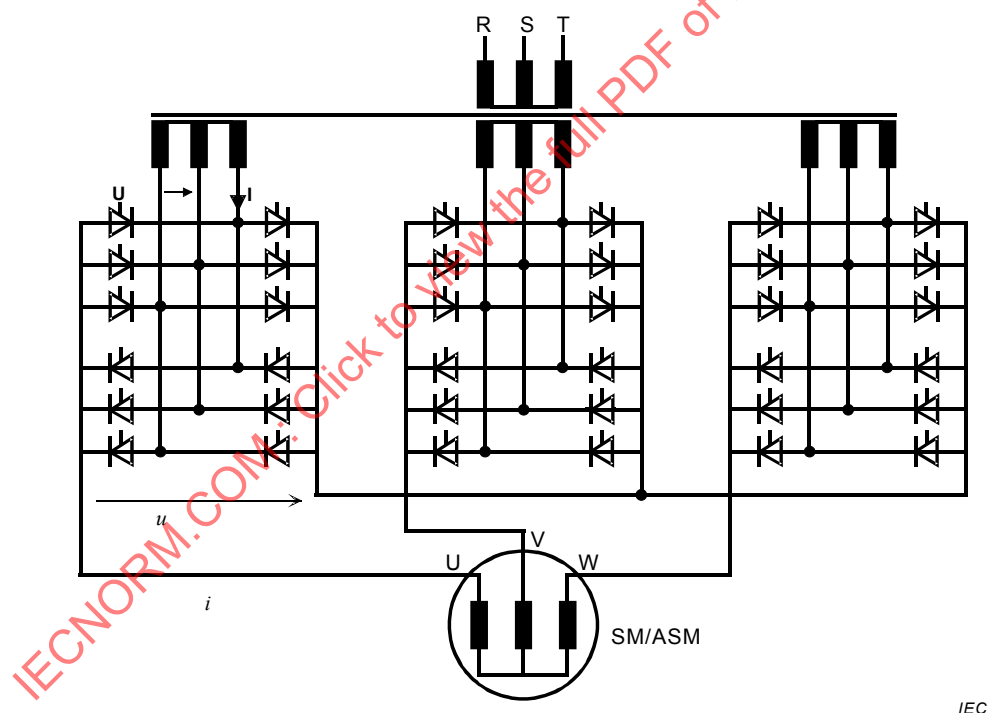


Figure 36 – Schematic of cyclo-converter

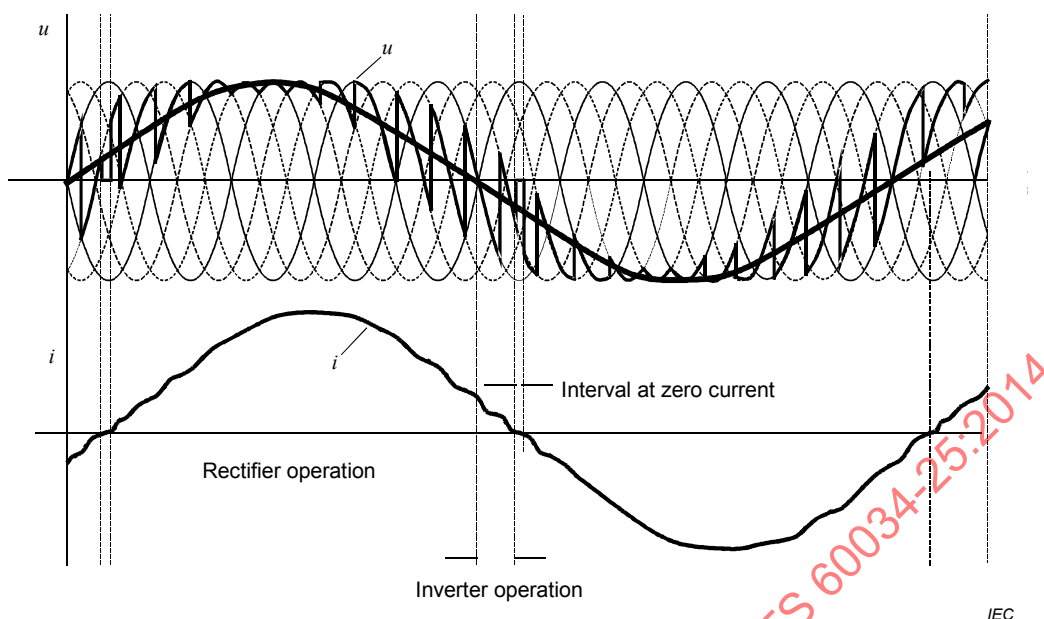


Figure 37 – Voltage and current waveforms of a cyclo-converter

A cyclo-converter has no intermediate d.c. circuit. It consists of three partial converters for each of the three electrical machine phases. These partial converters are controlled independently with the aim to generate a sinusoidal output current by directly connecting the electrical machine phase for a certain period of time with one of the mains. The output frequency has to be lower than 50 % of the frequency of the mains for the cyclo-converter of Figure 36. For synchronous electrical machines, a unity power factor is possible. See also Figure 37.

Even though the current is controlled to be nearly sinusoidal, cyclo-converter operation implies voltage impressing for the electrical machine. Consequently, it is not beneficial to supply an electrical machine with two circumferentially shifted winding systems with phase shifted voltages from two converter systems. In cases where two converter systems are used, their output voltages should be in phase and the electrical machine winding systems should not be circumferentially shifted. Alternatively, the converter systems can be connected in series to form a 12-pulse converter. Since the converters are usually equipped by thyristors, an enhanced insulation system is usually not required.

The frequencies of the voltage and current harmonics follow the rule:

$$f = (1 + 6g_1)f_1 + g_2z_p f_{\text{mains}}$$

where

z_p is the number of pulses of the converter (6 or 12);

$g_1, g_2 = 0; \pm 1; \pm 2; \dots$,

resulting in oscillating torque frequencies $f = 6g_1f_1 + g_2z_p f_{\text{mains}}$. The magnitude of the torque oscillations is fairly low but increases with increasing converter output frequency. Even though the harmonic components for $g_2 = 0$ are often not mentioned in literature, they are present resulting from the small time periods without current between positive and negative half-wave.

17.2 Wound rotor induction (asynchronous) electrical machines supplied by current source converters in the rotor circuit

These arrangements are known as subsynchronous (or super-synchronous) converter cascade (SSCC). The stator of the wound rotor induction electrical machine is directly connected to the mains. The slip-rings are connected to a current source converter, thus being able to feed the power sP_δ (s = slip, P_δ = power consumption from the mains minus stator losses) that appears electrically in the rotor circuit, back to the mains.

The advantage of this arrangement compared to converter-fed cage induction electrical machines is that the rated power of the converter required for a SSCC is only the fraction $s_{\max}$ of that required in the latter case, assuming that the speed control range is limited from $(1 - s_{\max})n_0$ to n_0 .

Since the rotor currents are block-type like the stator currents of cage induction electrical machines supplied by current source converters, the statements of 13.1 apply.

The rotor current contains harmonics of the order $n = +1, -5, +7, -11, +13, \dots$, causing additional losses in the rotor winding. In the cases where the rotor winding of wound rotor induction electrical machines usually is of the bar type, these additional losses will significantly rise due to current displacement. Since the converters are usually equipped by thyristors, an enhanced insulation system is commonly not required.

The harmonic currents result in oscillating torques with frequencies of $6sf_1$ and multiples, requiring a careful design with respect to torsional resonances of the rotating string.

An earth brush is recommended to prevent negative impacts on bearing currents.

18 Special consideration for standard fixed-speed induction electrical machines in the scope of IEC 60034-12 when fed from voltage source converter

18.1 Torque derating during converter operation

When the electrical machine is supplied from a converter at the electrical machine rated frequency, the available torque is usually less than the rated torque on a sinusoidal voltage supply due to increased temperature rise (harmonic losses). An additional reason for the reduction may be the voltage drop of the converter. Maintaining of the rated torque may reduce insulation service-life.

The full-line curve in Figure 38 refers to a converter producing approximately the same fundamental electrical machine flux as at sinusoidal supply. The electrical machine manufacturer can determine the temperature rise for this operating point if the harmonic spectrum of the converter is known. The temperature rise depends on the individual electrical machine design and the type of cooling (e.g. IC 01 or IC 0141). When determining the derating factor, the thermal reserve of the particular electrical machine is important. Taking all these influences into account, the derating factor at rated frequency typically ranges from 0,8 to 1,0.

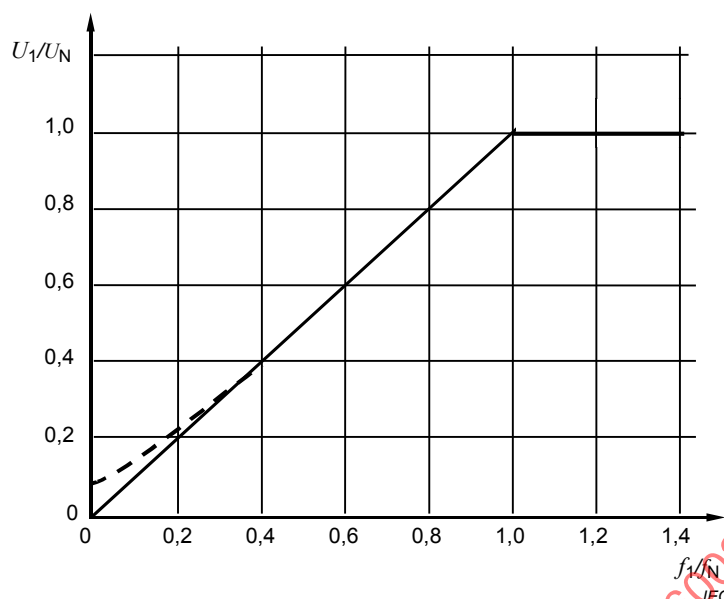


Figure 38 – Fundamental voltage U_1 as a function of operating frequency f_1

Frequently, in practice, the converter rating does not imply that the fundamental flux at rated frequency is the same as on sinusoidal voltage. The consequence is an additional torque deviation, the values of which depend on the individual parameters.

Within the speed setting range below the synchronous speed at electrical machine rated frequency, applying a constant ratio U_1/f_1 leads to a constant pull-out torque only if the stator winding resistance is negligible in comparison with the electrical machine reactances. To compensate for the effect of the electrical machine stator resistance, some converter controls are designed to have a characteristic in accordance with the dashed line in Figure 38. At low speeds, higher torques are generated than in the absence of such a compensation.

Above the 1,0 p.u. operation point of voltage and frequency in Figure 38, the converter output voltage is generally constant as the frequency increases (field-weakening range). In the event of this occurring within the frequency operating range, then the derating factor will change with a rapid reduction in torque capability similar to the characteristic shown in Figure 39 above $f_1/f_N = 1,0$.

Figure 39 shows an example of a derating curve for a typical electrical machine. Such a curve can be declared by the electrical machine manufacturer, if the harmonic spectrum and the voltage-frequency characteristics of the converter are known. With respect to the different cooling (IC 01 or IC 411) and ventilation methods (self-circulation cooling or independent cooling) it is not possible to produce a curve which applies to all cases. The derating is normally reduced as the switching frequency increases.

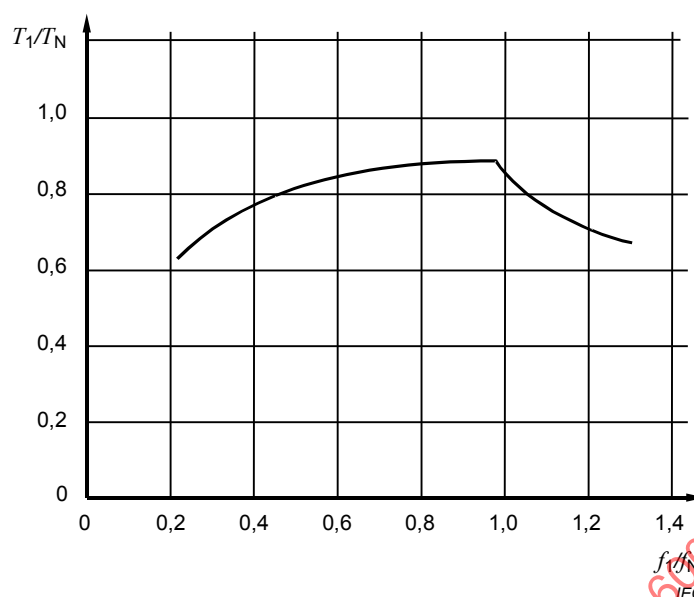


Figure 39 – Torque derating factor for cage induction electrical machines of design N, IC 0141 (self-circulating cooling) as a function of operating frequency f_1 (example)

18.2 Losses and their effects

In 7.2.1 of IEC 60034-1:2010 the permissible harmonic content of the supply voltage of cage induction electrical machines is expressed by one single numerical value called the harmonic voltage factor (HVF). However, this factor is not applicable for converter power supplies.

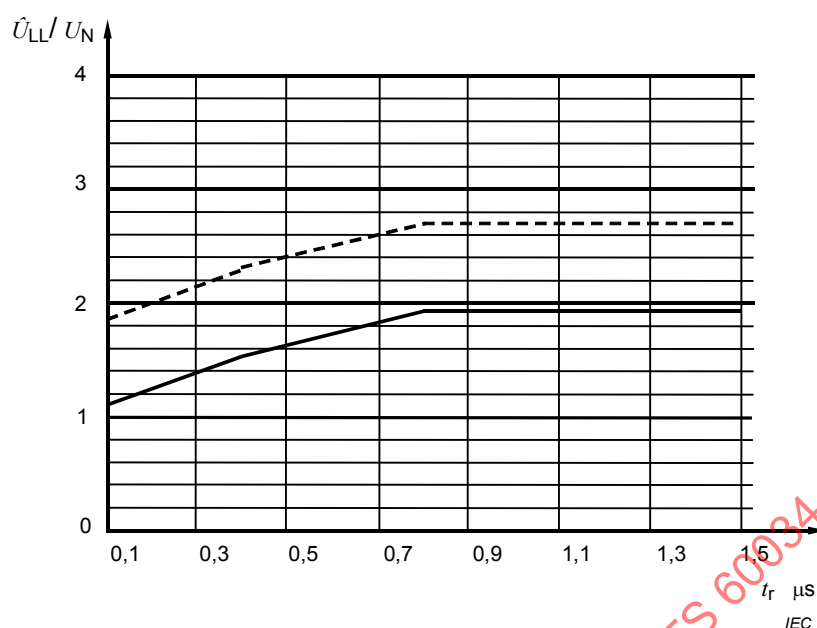
18.3 Noise, vibrations and torsional oscillation

The statements of Clause 6 remain valid.

18.4 Electrical machine insulation electrical stresses

The mechanisms of how the converter operation stresses the electrical machine insulation are given in Clause 7. Electrical machines with random wound windings with enamelled round wires will typically endure the pulse voltages of Figure 40 curve A, at the terminals without significant reduction of lifetime.

The combination of fast switching inverters with cables will cause peak voltages due to transmission line effects. For electrical machines rated at voltages less than or equal to 500 V a.c. the insulation system should typically give satisfactory life when subjected to peak voltages shown in Figure 40, curve A. Care shall be taken to avoid variable speed applications that involve rapid speed changes as these can cause regenerative voltages at the converter output up to twice the rated electrical machine voltage.

**Key**

A For typical electrical machines

B For electrical machines with older insulation system

Figure 40 – Limiting curve of admissible impulse voltage $\hat{U}_{LL}/U_N$ (peak value of line to line voltage including voltage reflection and damping/rated voltage) at the electrical machine terminals as a function of the rise-time t_r

For electrical machines rated over 500 V a.c., supplied from a fast switching inverter, an enhanced insulation system and/or filters at the converter output (designed to increase the rise-time and/or to limit the peak voltages) may be required.

The actual impulse voltage to be expected at the electrical machine terminal can be determined as described in IEC TS 61800-8 where U_{LL} is equivalent to V_{PP} .

The determined repetitive impulse voltage shall be less than that shown in Figure 40, curve A. The actual impulse voltage can be influenced by the topology of the PDS (power supply system input and output converter section, filtering section, cabling section and grounding conditions). The impulse withstand capability of older insulations systems may not be able to withstand levels higher than shown in curve B. It is recommended to contact the electrical machine manufacturer to confirm which levels are acceptable.

In some PDS impulse voltage line to ground $\hat{U}_{LG}$ may exceed impulse voltage line to line, therefore $\hat{U}_{LG}$ shall also be less than the limiting curves given in Figure 40.

18.5 Bearing currents

The mechanism for bearing currents is discussed in Clause 8.

For standard electrical machines, if a proper grounding system is installed, experiences shows that:

- electrical machines within the scope of this specification and with shaft heights up to and including 280 mm seldom experience bearing failure caused by converter operation. Nevertheless, the dielectric stress on the bearings varies widely with the type of control algorithm and especially with the switching frequency of the converter. When using converters having a switching frequency greater than 10 kHz and an output voltage greater than 400 V r.m.s., consideration should be given to the insulation of one bearing;

- for electrical machines within the scope of this specification the insulation of an antifriction bearing can be achieved by replacement with an insulated bearing of the same dimensions. For electrical machines with shaft height 315 mm and above the use of bearing insulation with the insulation impedance at least of 100 Ω at 1 MHz is advisable. The need to insulate both electrical machine bearings is seldom necessary. In such a case, the examination of the whole drive system by an expert is highly recommended and should include the driven electrical machine (insulation of the coupling) and the grounding system (possibly use of an earthing brush);
- for electrical machines within the scope of this specification and with shaft heights above 315 mm, for which the insulation of the electrical machine bearing is not possible or not desirable, it is recommended either:
 - to reduce the du/dt of the converter output voltage,
 - or to use a converter with a filter designed to reduce the zero-sequence component of the phase voltages (common-mode voltage).

18.6 Maximum safe operating speed

If an electrical machine is intended to be operated at speeds above its rated speed, the maximum safe operating speed is obtained from the rating plate of the electrical machine. The limits of 9.6 of IEC 60034-1:2010 apply if nothing else has been stated. Depending on the electrical machine design, the operation at higher speeds may be permitted, but this possibility should be verified by the manufacturer.

When operating at speeds above rated speed, noise and vibration levels will increase. It may also be required to refine the balance for acceptable operation above rated speed.

Operation at speeds close to the maximum safe operating speed for extended periods of time may cause considerable shortening of the service life of the bearings. Moreover, the shaft seals and/or the regreasing intervals (or the grease service life in the case of greased-for-life bearings) may be affected.

19 Additional considerations for synchronous reluctance electrical machine fed by voltage source converters

19.1 System characteristics

The benefits of a PDS consisting of a voltage source converter and a synchronous reluctance electrical machine instead of an induction electrical machine are:

- losses in the electrical machine might be lower. For system efficiency, a review the losses in the converter shall be taken into account
- reduced electrical machine size, compared with an induction electrical machine of the same rating
- no winding losses in the rotor gives lower bearing temperatures compared to an induction electrical machine
- simpler cooling arrangements of the electrical machine, due to minimal rotor losses

19.2 Losses and their effects

The statements of Clause 5 remain valid.

19.3 Noise, vibration and torsional oscillation

The statement of Clause 6 remains valid.

19.4 Electrical machine insulation electrical stresses

The statement of Clause 7 remain valid.

19.5 Bearing currents

The statement of Clause 8 remain valid.

19.6 Particular aspects of synchronous reluctance electrical machines

- Power factor is generally not as good as with induction electrical machines.
- Operation in field weakening range requires special measures to ensure that needed torque is available.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TS 60034-25:2014

Annex A (informative)

Converter characteristics

A.1 Converter control types

A.1.1 General

A.1.1.1 General remarks

There are various converter control types: scalar, vector (sensorless or feedback), direct flux and electrical machine torque control, etc. Each type has different characteristics, which are described in A.1.1.2 to A.1.1.4.

A.1.1.2 Scalar control

Scalar control is the original concept in a V/Hz converter. In such a converter, the output voltage is controlled according to the output frequency. Figure 3 shows examples of the ways in which this may be done.

With converter output voltage proportional to frequency, the electrical machine is operating with approximately constant flux even without speed feedback signals.

Voltage boost (a fixed voltage which is added to the converter output voltage), conventional IR (stator winding resistance voltage drop) compensation, or advanced dynamic voltage compensation are commonly used options to improve starting and operating performance in the low speed region.

Voltage boost has more effect at low speeds when the electrical machine voltage is low, and care should be taken to ensure that the boost voltage is not so high that the electrical machine saturates.

IR compensation, where at light loads the amount of boost voltage is proportional to the amount of current in the electrical machine, is an improvement. Many scalar controls use special algorithms to dynamically compensate for the voltage drop caused by electrical machine stator resistance and inductance. This provides even better starting and operating performance in the low speed region, and, by using additional electrical machine voltage and current feedback signals, such controls can generate torque values close to vector control even at lower frequency regions.

Scalar control is generally applied where fast response to torque or speed commands is not required and it is particularly useful if multiple electrical machines are to be supplied from a single converter.

A.1.1.3 Vector control

An a.c. vector controlled converter essentially decouples the components of the electrical machine current producing the magnetizing flux and the torque, in order to control them separately.

This decoupling is achieved by calculation of the electrical machine characteristics using an equivalent circuit (mathematical model) with or without speed feedback signals.

According to the level of performance required, different approaches may be taken for this equivalent circuit calculation. In addition, a speed feedback (sensor) signal may further improve the performance.

Vector control is usually applied when fast torque and speed responses are required.

A.1.1.4 Direct flux and electrical machine torque control

A direct flux and electrical machine torque controlled converter has a hysteresis (also known as sliding mode) control type, which adjusts the flux and the torque of the electrical machine by mathematical model calculation of the electrical machine, with or without speed feedback signals.

In this control type, there is no modulator, every switching transition of each converter power semiconductor being considered separately. In addition, a speed feedback (sensor) signal may further improve the performance.

Direct flux and electrical machine torque control is usually applied when fast torque and speed responses are required.

A.1.2 Converter type considerations

All three types of control can be used for constant torque applications, as well as for applications where the torque increases with speed (for example, centrifugal pumps or fans). However, when selecting a converter, each aspect of the performance requirement should be considered to ensure optimal operation.

In general, the following aspects should be noted:

- using scalar control, it is possible to operate electrical machines of different ratings in parallel with one converter (multi-machine operation);
- scalar control is typically insufficient for dedicated low speed load requirements (below approximately 10 % of corner point speed), although the low-speed performance can be improved by applying dynamic voltage compensation;
- the steady-state torque capability of scalar control can be made equivalent to the sensorless vector control by applying dynamic voltage compensation;
- the most significant difference between scalar control and vector or direct flux and electrical machine torque control is the dynamic response;
- vector or direct flux and electrical machine torque control may be required if one or more of the following characteristics are needed:
 - operation around zero speed;
 - precise torque control;
 - high peak torque at low speed;
- using vector control or direct flux and electrical machine torque control, multi-electrical machine operation can be realized with or without speed feedback, provided that electrical machines of the same rating are used;
- the characteristics of vector control and those of direct flux and electrical machine torque control are almost equivalent, because both use mathematical model calculations of the electrical machine with or without flux or speed sensors.

Further details are available in IEC 61800-2.

A.2 Converter output voltage generation (for voltage source converters)

A.2.1 Pulse width modulation (PWM)

PWM covers those schemes of output voltage generation where the transition switching commands of the converter are generated from a "carrier-frequency" synchronized controller (the "modulator").

The modulator controls the converter output switching pattern in such a way that the output voltage is equal to the desired reference value.

NOTE The output voltage is to be understood as an average value for times related to the switching frequency and an instantaneous value for times related to the fundamental output frequency of the converter.

The carrier frequency may optionally be synchronized to line or to output frequency. It may be selected to reduce losses, current ripple or generated noise, and it may be kept fluctuating ("wobbling" or "random" PWM) to distribute the harmonic spectra of the output voltage over a wide range.

Additionally, special control techniques may be used to optimize the current waveform or spectrum, for example to achieve minimum current peaks or to eliminate certain harmonics.

A.2.2 Hysteresis (sliding mode)

Hysteresis covers those schemes of output voltage generation where the transition switching commands of the converter are generated from a "carrierless" (and therefore unsynchronized) controller. Transition switching occurs as soon as a certain difference is exceeded between an actual and a reference value of a control parameter.

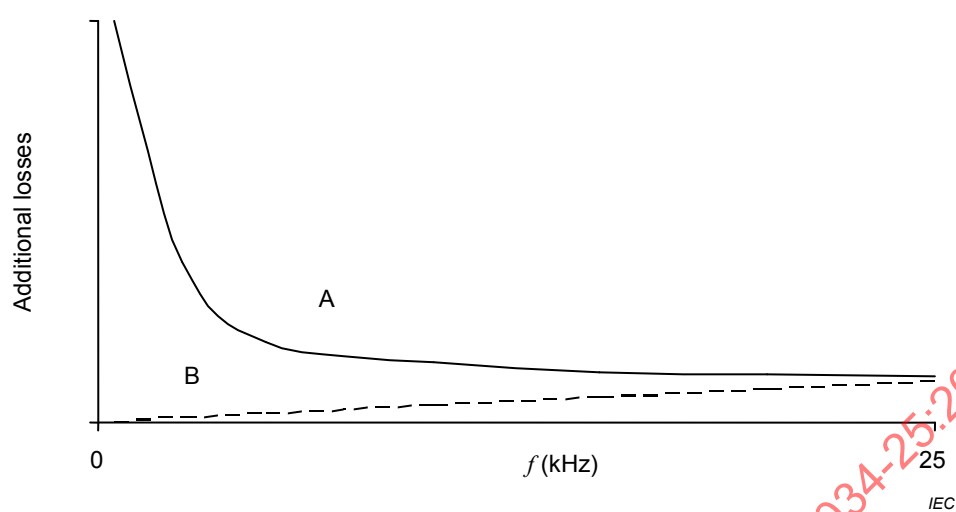
Hysteresis switching can be used with several control parameters: voltage, current, flux or torque, depending on the type of control.

A.2.3 Influence of switching frequency

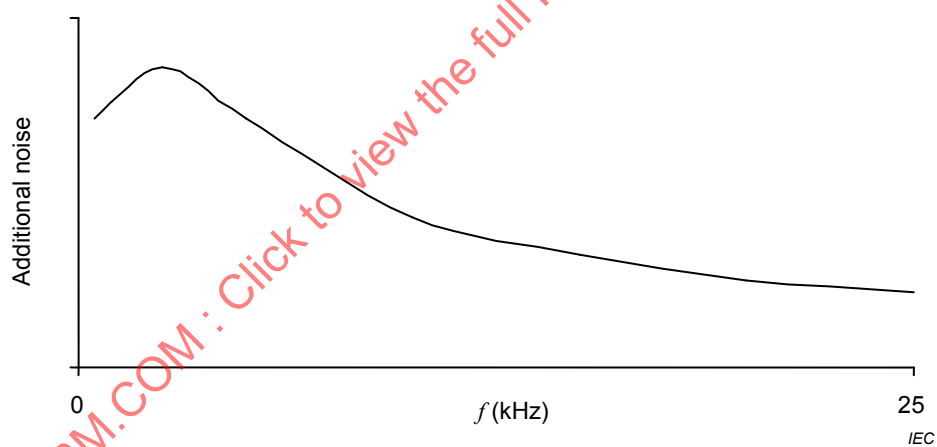
The converter output switching frequency will affect the losses (in the electrical machine and in the converter), acoustic noise and torque ripple of the overall PDS. It is not possible to provide precise data on these effects, but they are shown in a general manner by Figure A.1, Figure A.2 and Figure A.3. These figures are for illustration only, and it is not intended that comparative calculations should be made from them.

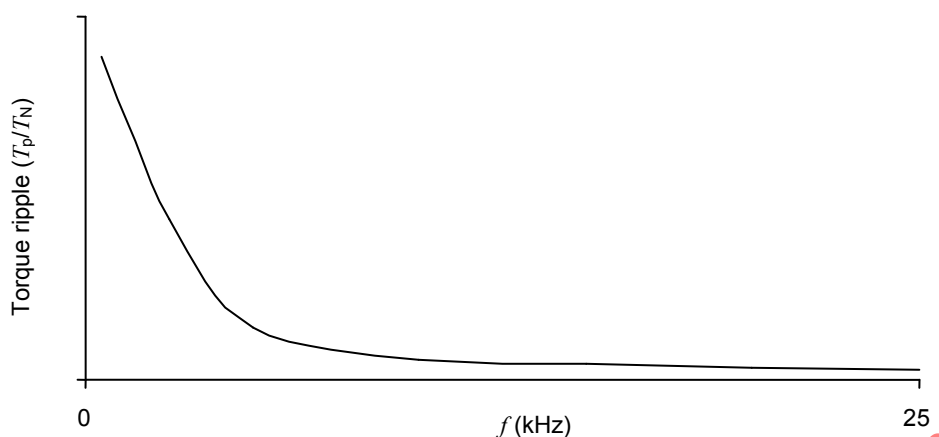
NOTE 1 In Figure A.1, the vertical scales for the electrical machine losses and converter losses are not the same.

NOTE 2 For modulation schemes which do not use fixed carrier frequencies, the expression "switching frequency" means the average number of switching pulses per second.

**Key**

- A Electrical machine losses
- B Converter losses

Figure A.1 – Effects of switching frequency on electrical machine and converter losses**Figure A.2 – Effects of switching frequency on acoustic noise**

**Key**

T_p Peak value of the pulsating torque

T_N Rated torque

Figure A.3 – Effects of switching frequency on torque ripple

A.2.4 Multi-level converters

In the two-level converter schemes described above, the output voltage is generated by switching between the positive and negative levels of the d.c. bus voltage.

Multi-level converters offer intermediate voltage potentials for switching, and therefore the “harmonic” frequency spectra are significantly reduced in amplitude and shifted to higher frequencies.

NOTE Since multi-level converters require more switching semiconductors, they are more common for high voltage applications (see IEC 61800-4).

A.2.5 Parallel converter operation

Where the converter consists of more than one inverter bridge working in parallel, it is often possible to design the electrical machine with the same number of parallel branches of the three-phase winding and connect each inverter bridge to a different winding branch.

Where voltage impressing converters contain significant harmonics of the fundamental, it is recommended that the output voltages of the inverter bridges should not be shifted in phase against each other, nor should the winding systems be shifted by a circumferential angle different from 0° or $360^\circ/p$, in order to prevent the generation of large harmonic currents.

For hysteresis controlled converters, winding systems mechanically shifted by $30^\circ/p$ and supplied with voltages having 30° phase shift can be used.

Annex B (informative)

Output characteristics of 2 level voltage source converter spectra

The converter output voltage waveform, and therefore the output voltage spectrum, differs according to the method of converter output voltage generation. Typical waveform is displayed in Figure B.1. Examples of the frequency components at the outputs of a converter with constant frequency (about 2,5 kHz) PWM switching and one with hysteresis switching (about 2,2 kHz average frequency) are shown in Figure B.2.

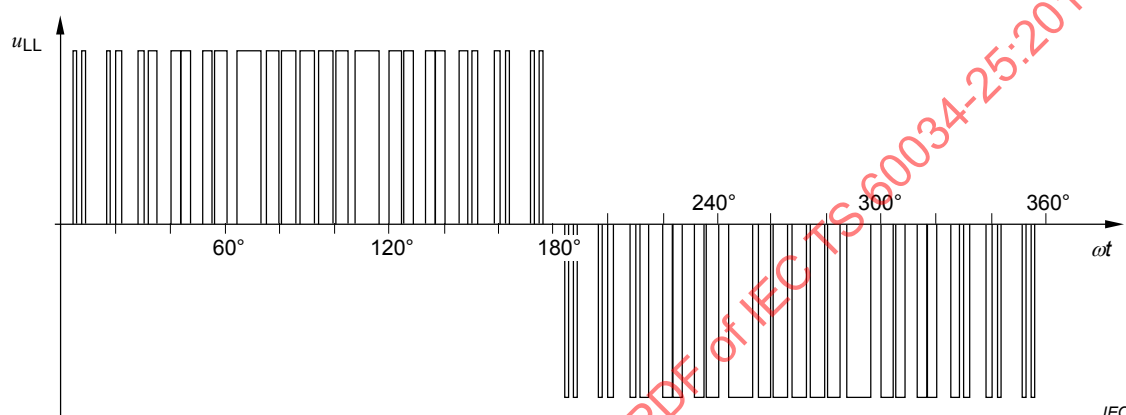


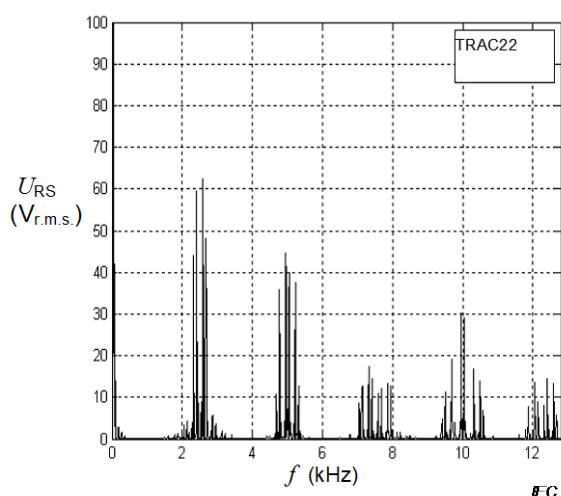
Figure B.1 – Waveform of line-to-line voltage U_{LL} for voltage source converter supply with switching frequency $f_s = 30 \times f_1$ (example)

Converters using carrier modulation, together with synchronised and asynchronous pulse patterns, as applied in many cases, produce the frequencies:

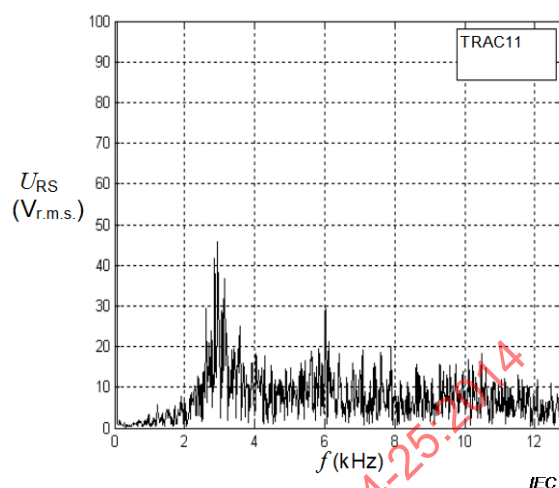
$$f = k_s \times f_s \pm k_1 \times f_1$$

where $k_s = 1, 2, 3, \dots$ and $k_1 = 1, 2, 4, 5, 7, \dots$ are multiplying factors of the switching frequency f_s and of the operating frequency f_1 , respectively. The formula is valid also in the case of converters with space-phaser modulation.

Converters with carrierless modulation, where no pre-determined switching frequency is existent, are also in practical use. In this case, the frequency spectrum of the output voltage is characterised by broadband random noise without spikes at specific frequencies.



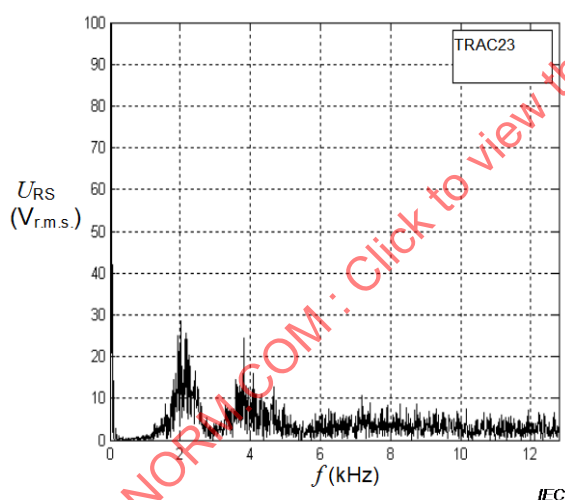
a) Constant frequency PWM control



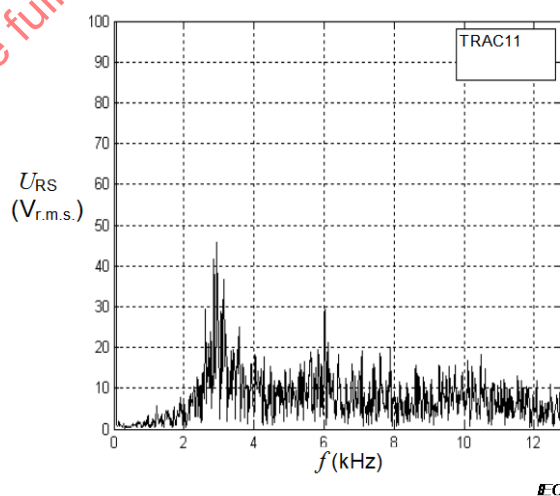
b) Hysteresis control

Figure B.2 – Typical frequency spectra of converter output voltage

Figure B.3 compares a typical spectrum of a random frequency (about 2,2 kHz average) PWM converter with that of a hysteresis switching converter.



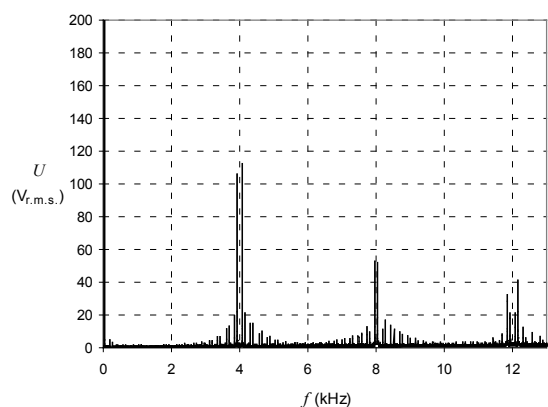
a) Random PWM control



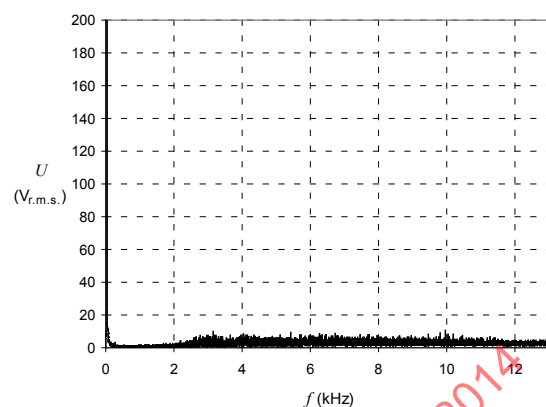
b) Hysteresis control

Figure B.3 – Typical frequency spectra of converter output voltage

Figure B.4 shows typical spectra of a) a two-phase modulated converter at 4 kHz carrier, average frequency about 2,7 kHz and b) a converter with hysteresis modulation and direct torque control at 2,7 kHz average frequency.



IEC



IEC

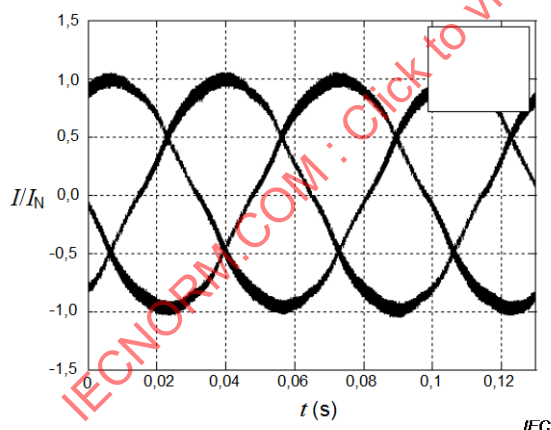
a) 4 kHz carrier with two-phase modulation;
2,7 kHz average

b) Hysteresis modulation, direct torque control,
2,7 kHz average

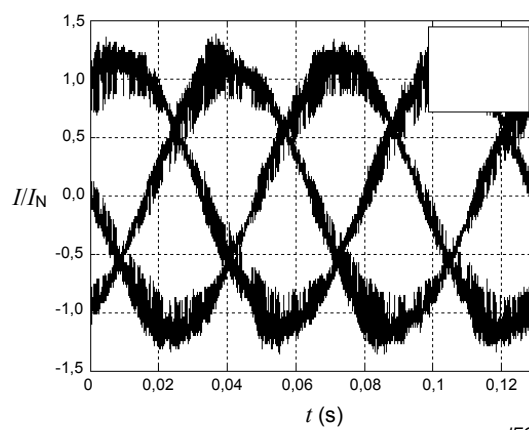
Figure B.4 – Typical spectra of converter output voltage

In all cases, the output frequency to the electrical machine was about 40 Hz, and the electrical machine load characteristics were kept constant. The frequency components of hysteresis or random frequency PWM switching are generally lower in amplitude than those of constant frequency PWM switching or two-phase modulation, but are distributed more widely over the frequency range.

Figure B.5 shows typical (normalized) electrical machine current time characteristics of the two converters having the spectra illustrated in Figure B.2. In this case, the output (rotational) frequency was about 10 Hz.



IEC



IEC

a) Constant frequency PWM control

b) Hysteresis control

Figure B.5 – Typical time characteristics of electrical machine current

Figure B.6 shows the time characteristics of the output of the two converters having the spectra illustrated in Figure B.4. Again, the output (rotational) frequency was about 10 Hz.

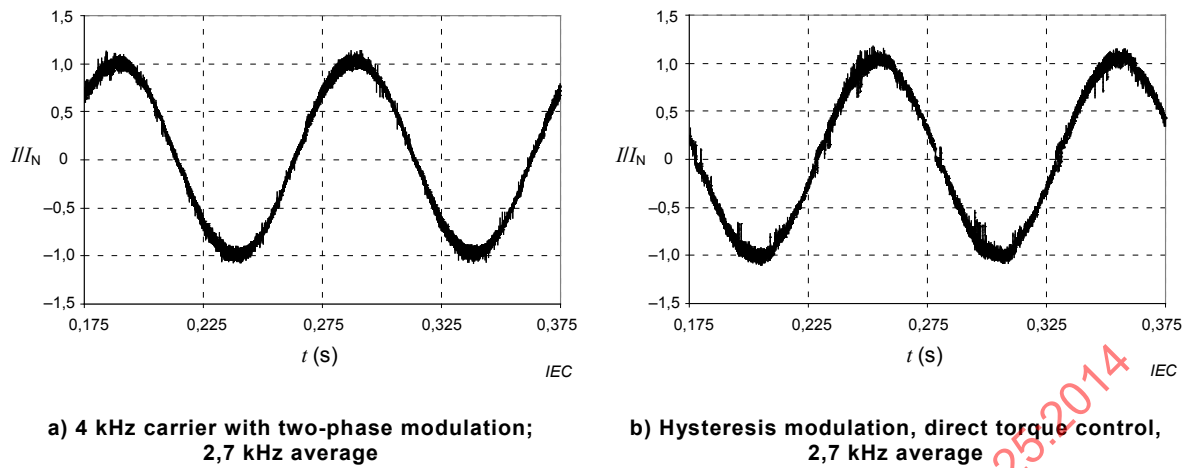


Figure B.6 – Typical time characteristics of electrical machine current

Figures B.1 to B.6 are for illustration only. They should not be used to qualify or disqualify the methods of voltage generation as such. All methods of output voltage generation can be optimized in special ways to balance advantages and disadvantages in the application.

Annex C (informative)

Voltages to be expected at the power interface between converter and electrical machine

In practice, the voltage to be expected at the terminals of an electrical machine fed from a converter – especially of a voltage source converter – differs from the ideal theoretical pulse patterns as given in Figure B.1 due to transient high frequency effects. Figure C.1 shows a typical example. These effects are significantly influenced by various parameters such as the cable length and cable type between electrical machine and converter, the details of the grounding system used, the rise-time of the voltage pulses, the use of output filters, etc.

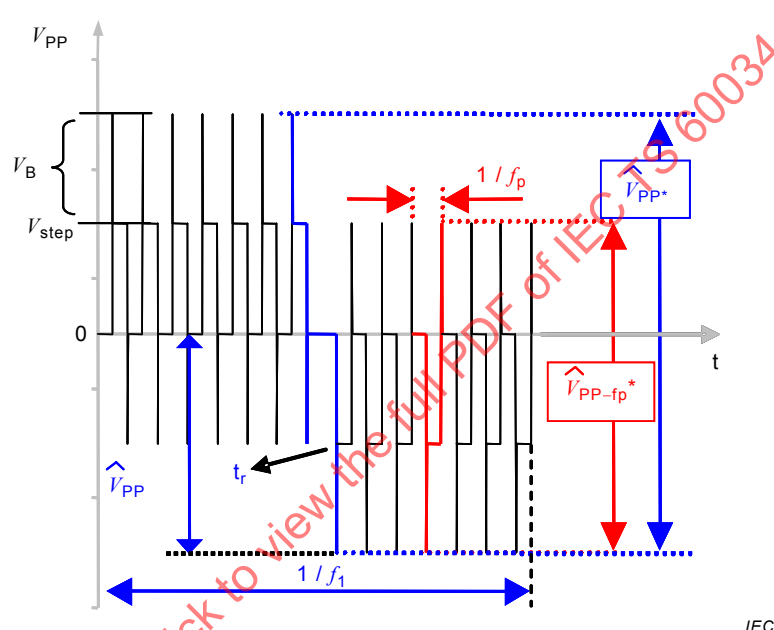


Figure C.1 – Example of typical voltage curves and parameters of a two level inverter versus time at the electrical machine terminals (phase to phase voltage; taken from IEC TS 61800-8)

This makes it impossible to specify general limits for the maximum voltage stress to be expected. Instead, it is necessary to determine the voltage stress for each application individually based on IEC TS 61800-8, which provides all required information.

NOTE IEC TS 61800-8 uses different symbols for quantities from IEC 60034. E.g., V instead of U is used for voltages, and the line-to-line voltage is addressed as V_{pp} instead of U_{LL} .

In order to identify the maximum values to be expected for the line-to-line and line-to-ground voltage at the electrical machine terminals and other values that influence the proper choice of the insulation system for the stator winding, the following information is required:

- Line section: Nominal voltage and type (TN, TT, IT) of supply system.
- Input converter (rectifier): Single phase, three phase diode or three-phase active infeed including kind of DC choke, if any.
- Output converter (inverter): Two-level, three-level or multi-level (with floating capacitor or multi DC-link).
- Filter section (if any): HF common-mode, dv/dt, output choke or sine wave.

- e) Cabling section: Length and characteristic parameters (capacity and inductance) per metre.

IEC TS 61800-8 provides the influence of these options on the maximum voltages in the form of tables with characteristic amplifying factors. The calculation scheme shall be demonstrated by two typical examples showing the significant dependency of the voltages on the PDS arrangement. All table, formula and subclause numbers refer to IEC TS 61800-8:2010.

Example 1: 3 kW electrical machine for 400 V fed by a two-level converter with diode rectifier via a 2 m cable without filter.

Line section:

TN type supply with star point grounding and 400 V nominal voltage

⇒ differential mode amplification factor (5.4, Table 1)

$$V_s/V_{sN} = 1,1 \text{ including } 10 \% \text{ line voltage tolerance}$$

⇒ common-mode amplification factor (5.5, Table 2)

$$k_{C0} = 0$$

Input converter section:

Three-phase diode input converter without DC choke and without dynamic breaking

⇒ differential mode amplification factor (6.8, Table 6)

$$k_{D1} = 1,35$$

⇒ common-mode amplification factor (6.9, Table 7)

$$k_{C1} = 0$$

Output converter section:

Two-level output converter

⇒ differential mode amplification factor (7.9, Table 18)

$$k_{D2} = 1$$

⇒ common-mode amplification factor (7.10, Table 19)

$$k_{C2} = \pm 1/2$$

⇒ dynamic parameters (7.11, Table 20)

$$t_{r2} = 50 \dots 200 \text{ ns}$$

$$f_P/f_1 = 5 \dots 300$$

Filter section:

No filter

⇒ differential mode amplification factor (8.4, Table 21)

$$k_{D3} = 1$$

⇒ common-mode amplification factor (8.5, Table 22)

$$k_{C3} = 1$$

⇒ dynamic parameters (8.4 and 8.5, Tables 21 and 22)

$$t_{r3} = t_{r2} = 50 \dots 200 \text{ ns}$$

Cabling and electrical machine section:

Rated electrical machine power below 3,7 kW, 2 m cable with characteristic inductance 650 nH/m, characteristic capacity 130 pF/m

⇒ propagation velocity (9.1, formula 27)

$$v = 1 / \sqrt{(650 \text{ nH/m} \cdot 130 \text{ pF/m})} = 109 \text{ m}/\mu\text{s}$$

⇒ critical cable length (9.1, formula 28)

$$l_{cr} = 1/2 \cdot 109 \text{ m}/\mu\text{s} \cdot (50 \dots 200 \text{ ns}) = 2,725 \text{ m} \dots 10,9 \text{ m}$$

cable length is below critical length

⇒ reflection coefficient (Clause 9.2, Table 23)

$$\Gamma = 0,95$$

⇒ differential mode amplification factor (9.3, Table 24)

$$k_{D4} = (2 \cdot 0,95 / 2,725 + 1) = 1,7$$

⇒ common-mode amplification factor (9.3, Table 24)

$$k_{C4} = (2 \cdot 0,95 / 2,725 + 1) = 1,7$$

⇒ dynamic parameters (9.3, Table 24)

$$t_{r4} = (50 \dots 200) \text{ ns} \cdot (2 \cdot 0,95 / 2,725 + 1) = 85 \dots 340 \text{ ns}$$

⇒ Peak value of phase-to-ground voltage at electrical machine terminals:

$$\begin{aligned} \hat{V}_{PG, \text{Machine}} &= 1,1 \cdot 400 \text{ V} / 1,732 \cdot (1,35 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,7) + 1,1 \cdot 400 \text{ V} \cdot (0 + 0 \pm \frac{1}{2}) \cdot 1 \\ &\cdot 1,7 \\ &= 583 \text{ V} \pm 374 \text{ V} = 209 \dots 957 \text{ V} \end{aligned}$$

⇒ Zero-to-peak value of phase-to-phase voltage at electrical machine terminals:

$$\hat{V}_{PP} = 1,1 \cdot 400 \text{ V} \cdot (1,35 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,7) = 1\,010 \text{ V}$$

Example 2: 3 kW electrical machine for 690 V fed by a two-level converter with diode rectifier and unsymmetrical DC choke via a 50 m cable without filter including dynamic breaking.

Line section:

IT type supply with 690 V nominal voltage

⇒ differential mode amplification factor (5.4, Table 1)

$$V_s/V_{sN} = 1,1 \text{ including } 10 \% \text{ line voltage tolerance}$$

⇒ common-mode amplification factor (5.5, Table 2)

$$k_{C0} = 0,577$$

Input converter section:

Three-phase diode input converter with unsymmetrical DC choke and dynamic breaking with resistor and chopper

⇒ differential mode amplification factor (6.8, Table 6)

$$k_{D1} = 1,6$$

⇒ common-mode amplification factor (6.9, Table 7)

$$k_{C1} = \pm 0,675$$

Output converter section:

Two-level output converter

⇒ differential mode amplification factor (7.9, Table 18)

$$k_{D2} = 1$$

⇒ common-mode amplification factor (7.10, Table 19)

$$k_{C2} = \pm \frac{1}{2}$$

⇒ dynamic parameters (7.11, Table 20)

$$t_{r2} = 50 \dots 200 \text{ ns}$$

$$f_p/f_1 = 5 \dots 300$$

Filter section:

No filter

⇒ differential mode amplification factor (8.4, Table 21)

$$k_{D3} = 1$$

⇒ common-mode amplification factor (8.5, Table 22)

$$k_{C3} = 1$$

⇒ dynamic parameters (8.4 and 8.5, Tables 21 and 22)

$$t_{r3} = t_{r2} = 50 \dots 200 \text{ ns}$$

Cabling and electrical machine section:

Rated electrical machine power below 3,7 kW, 50 m cable with characteristic inductance 650 nH/m, characteristic capacity 130 pF/m

⇒ propagation velocity (9.1, formula 27)

$$v = 1 / \sqrt{(650 \text{ nH/m} \cdot 130 \text{ pF/m})} = 109 \text{ m}/\mu\text{s}$$

⇒ critical cable length (9.1, formula 28)

$$l_{cr} = \frac{1}{2} \cdot 109 \text{ m}/\mu\text{s} \cdot (50 \dots 200 \text{ ns}) = 2,725 \text{ m} \dots 10,9 \text{ m}$$

cable length is above critical length

⇒ reflection coefficient (9.2, Table 23)

$$\Gamma = 0,95$$

⇒ differential mode amplification factor (9.3, Table 24)

$$k_{D4} = 1 + 0,95 = 1,95$$

⇒ common-mode amplification factor (9.3, Table 24)

$$k_{C4} = 1 + 0,95 = 1,95$$

⇒ dynamic parameters (9.3, Table 24)

$$t_{r4} = (50 \dots 200) \text{ ns} \cdot (1 + 0,95) = 97,5 \dots 390 \text{ ns}$$

⇒ Peak value of phase-to-ground voltage at electrical machine terminals:

$$\begin{aligned} \hat{V}_{PG, \text{Machine}} &= 1,1 \cdot 690 \text{ V} / 1,732 \cdot (1,6 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,95) + 1,1 \cdot 690 \text{ V} \cdot (0,577 \pm 0,675 \pm \frac{1}{2}) \cdot 1 \\ &\cdot 1,95 \\ &= (1367 \text{ V} - 885 \text{ V}) \dots (1367 \text{ V} + 2593 \text{ V}) = 482 \dots 3\,960 \text{ V} \end{aligned}$$

⇒ Zero-to-peak value of phase-to-phase voltage at electrical machine terminals:

$$\hat{V}_{PP} = 1,1 \cdot 690 \text{ V} \cdot (1,6 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,95) = 2\,368 \text{ V}$$

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TS 60034-25:2014

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TS 60034-25:2014

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	95
INTRODUCTION	97
1 Domaine d'application	98
2 Références normatives	98
3 Termes et définitions	99
4 Caractéristiques de système	101
4.1 Généralités	101
4.2 Informations de système	102
4.3 Considérations relatives au couple/à la vitesse	102
4.3.1 Généralités	102
4.3.2 Capacité couple/vitesse	102
4.3.3 Caractéristiques assignées de la machine électrique	103
4.3.4 Facteurs de limitation applicables à la capacité couple/vitesse	104
4.3.5 Vitesse de sécurité en fonctionnement, capacité et essai de survitesse	104
4.3.6 Dispositif de refroidissement	104
4.3.7 Caractéristiques de tension/fréquence	105
4.3.8 Gammes de vitesses résonantes	105
4.3.9 Cycles de service	106
4.4 Exigences relatives à la machine électrique	106
5 Pertes et leurs effets (pour les machines électriques à induction alimentées par des convertisseurs de source de tension)	109
5.1 Généralités	109
5.2 Emplacement des pertes supplémentaires dues à l'alimentation par convertisseur et méthodes de réduction de ces pertes	110
5.3 Caractéristiques du convertisseur visant à réduire les pertes de la machine électrique	111
5.3.1 Réduction des pertes fondamentales	111
5.3.2 Réduction des pertes supplémentaires dues à l'alimentation par convertisseur	111
5.4 Utilisation de filtres afin de réduire les pertes supplémentaires de la machine électrique dues à une alimentation par convertisseur	112
5.5 Influence de la température sur la durée de vie utile	112
5.6 Détermination du rendement des machines électriques	113
6 Bruit acoustique, vibrations et vibrations de torsion	113
6.1 Bruit acoustique	113
6.1.1 Généralités	113
6.1.2 Variations de l'émission de bruit dues aux variations de la vitesse	113
6.1.3 Bruit d'origine magnétique	114
6.1.4 Détermination et limites du niveau de puissance acoustique	116
6.2 Vibrations (à l'exclusion des vibrations de torsion)	116
6.2.1 Généralités	116
6.2.2 Détermination et limites des niveaux de vibrations	117
6.3 Vibrations de torsion	117
7 Contraintes électriques d'isolation des machines électriques	118
7.1 Généralités	118
7.2 Causes	118

7.3	Contraintes électriques des enroulements.....	120
7.4	Limites et responsabilité	122
7.4.1	Conception de machines électriques pour basse tension ($\leq 1\,000\text{ V}$)	122
7.4.2	Machines électriques conçues pour une tension moyenne et élevée ($> 1\,000\text{ V}$)	123
7.5	Méthodes de réduction de la contrainte de tension.....	124
7.6	Limitation de la contrainte d'isolation	124
8	Courants parasites de paliers	125
8.1	Sources des courants parasites de paliers dans les machines électriques alimentées par convertisseurs.....	125
8.1.1	Généralités	125
8.1.2	Asymétrie magnétique	125
8.1.3	Cumul électrostatique	125
8.1.4	Tensions à haute fréquence.....	125
8.2	Génération de courants parasites de paliers à haute fréquence.....	125
8.2.1	Généralités	125
8.2.2	Courant circulant	126
8.2.3	Courant de mise à la terre de l'arbre.....	126
8.2.4	Courant de décharge capacitive.....	126
8.3	Circuit en mode commun	127
8.3.1	Généralités	127
8.3.2	Écoulement du courant en mode commun du système.....	127
8.4	Capacités parasites	128
8.4.1	Généralités	128
8.4.2	Composante principale de la capacité.....	128
8.4.3	Autres capacités	129
8.5	Conséquences de courants parasites de paliers excessifs	130
8.6	Prévention d'un endommagement par un courant parasite de palier à haute fréquence	130
8.6.1	Principes	130
8.6.2	Autres mesures de prévention	131
8.6.3	Autres facteurs et caractéristiques qui influent sur les courants parasites de paliers	133
8.7	Considérations supplémentaires pour les machines électriques alimentées par des convertisseurs de source de tension élevée	133
8.7.1	Généralités	133
8.7.2	Protection des paliers des machines électriques synchrones à aimants permanents, sans balai et à induction à cage	133
8.7.3	Protection des paliers pour les machines électriques à bagues et pour les machines électriques synchrones avec excitation par balai	134
8.8	Protection contre les courants parasites de paliers pour les machines électriques alimentées par des convertisseurs de source de courant à haute tension.....	134
9	Installation.....	134
9.1	Mise à la terre, liaison équipotentielle et câblage	134
9.1.1	Généralités	134
9.1.2	Mise à la terre	134
9.1.3	Liaison équipotentielle des machines électriques.....	135
9.1.4	Câbles d'alimentation de la machine électrique pour des convertisseurs à fréquence de commutation élevée	136
9.2	Bobines de réactance et filtres	140

9.2.1	Généralités	140
9.2.2	Bobines de réactance de sortie.....	140
9.2.3	Filtre de limitation de la tension (filtre du/dt)	140
9.2.4	Filtre sinusoïdal	141
9.2.5	Bloc terminal de la machine électrique.....	141
9.3	Correction du facteur de puissance	142
9.4	Machines électriques intégrées (machine électrique et modules d'entraînement intégrés)	143
10	Considérations supplémentaires pour les machines électriques synchrones à aimants permanents (PM) alimentées par des convertisseurs de source de tension.....	143
10.1	Caractéristiques de système	143
10.2	Pertes et leurs effets.....	144
10.3	Bruit, vibrations et vibrations de torsion	144
10.4	Contraintes électriques d'isolation des machines électriques	144
10.5	Courants parasites de paliers.....	144
10.6	Aspects particuliers des aimants permanents.....	144
11	Considérations supplémentaires pour les machines électriques à induction à cage alimentées par des convertisseurs de source de tension élevée.....	144
11.1	Généralités	144
11.2	Caractéristiques de système	145
11.3	Pertes et leurs effets.....	146
11.3.1	Pertes supplémentaires dans l'enroulement du stator et du rotor	146
11.3.2	Mesure des pertes supplémentaires	146
11.4	Bruit, vibrations et vibrations de torsion	146
11.5	Contraintes électriques d'isolation des machines électriques	147
11.5.1	Généralités	147
11.5.2	Surtension aux bornes de la machine électrique	147
11.5.3	Contraintes de tension dans l'enroulement du stator dans les applications avec convertisseur	148
11.6	Courants parasites de paliers.....	149
12	Considérations supplémentaires pour les machines électriques synchrones alimentées par des convertisseurs de source de tension	149
12.1	Caractéristiques de système	149
12.2	Pertes et leurs effets.....	150
12.3	Bruit, vibrations et vibrations de torsion	150
12.4	Contraintes électriques d'isolation des machines électriques	150
12.5	Courants parasites de paliers.....	150
13	Considérations supplémentaires pour les machines électriques à induction à cage alimentées par des convertisseurs de source de courant du type pleine onde.....	150
13.1	Caractéristiques de système (voir Figures 30 et 31).....	150
13.2	Pertes et leurs effets.....	151
13.3	Bruit, vibrations et vibrations de torsion	154
13.4	Contraintes électriques d'isolation des machines électriques	154
13.5	Courants parasites de paliers.....	154
13.6	Considérations supplémentaires pour les machines électriques à induction à cage hexaphasées	155
14	Considérations supplémentaires pour les machines électriques synchrones alimentées par LCI	155
14.1	Caractéristiques de système	155
14.2	Pertes et leurs effets.....	157

14.3	Bruit, vibrations et vibrations de torsion	157
14.4	Contraintes électriques d'isolation des machines électriques	157
14.5	Courants parasites de paliers.....	157
15	Considérations supplémentaires pour les machines électriques à induction à cage alimentées par des convertisseurs de source de courant pulsés (MLI CSI)	158
15.1	Caractéristiques de système (voir Figure 34)	158
15.2	Pertes et leurs effets.....	159
15.3	Bruit, vibrations et vibrations de torsion	159
15.4	Contraintes électriques d'isolation des machines électriques	159
15.5	Courants parasites de paliers.....	159
16	Machines électriques (asynchrones) à induction à rotor bobiné alimentées par des convertisseurs de source de tension dans le circuit du rotor	159
16.1	Caractéristiques de système	159
16.2	Pertes et leurs effets.....	159
16.3	Bruit, vibrations et vibrations de torsion	160
16.4	Contraintes électriques d'isolation des machines électriques	160
16.5	Courants parasites de paliers.....	160
17	Autres systèmes machine électrique/convertisseur	160
17.1	Entraînements alimentés par des cycloconvertisseurs	160
17.2	Machines électriques (asynchrones) à induction à rotor bobiné alimentées par des convertisseurs de source de courant dans le circuit du rotor.....	162
18	Considération particulière pour les machines électriques à induction à vitesse fixe normales dans le domaine d'application de l'IEC 60034-12, et alimentées par un convertisseur de source de tension	162
18.1	Déclassement du couple pendant le fonctionnement du convertisseur	162
18.2	Pertes et leurs effets.....	164
18.3	Bruit, vibrations et vibrations de torsion	164
18.4	Contraintes électriques d'isolation des machines électriques	164
18.5	Courants parasites de paliers.....	165
18.6	Vitesse maximale de sécurité en fonctionnement	166
19	Considérations supplémentaires pour une machine électrique à réluctance synchrone alimentée par des convertisseurs de source de tension	166
19.1	Caractéristiques de système	166
19.2	Pertes et leurs effets.....	167
19.3	Bruit, vibrations et vibrations de torsion	167
19.4	Contraintes électriques d'isolation des machines électriques	167
19.5	Courants parasites de paliers.....	167
19.6	Aspects particuliers des machines électriques à réluctance synchrones.....	167
Annexe A (informative)	Caractéristiques du convertisseur.....	168
A.1	Types de commande du convertisseur	168
A.1.1	Généralités	168
A.1.2	Considérations relatives au type de convertisseur	169
A.2	Génération de tension de sortie du convertisseur (pour les convertisseurs de source de tension)	170
A.2.1	Modulation d'impulsions en largeur (MLI).....	170
A.2.2	Hystérésis (mode de glissement)	170
A.2.3	Influence de la fréquence de commutation	170
A.2.4	Convertisseurs multiniveaux	172
A.2.5	Fonctionnement du convertisseur en parallèle	172

Annexe B (informative) Caractéristiques des spectres de convertisseurs de source de tension à 2 niveaux	173
Annexe C (informative) Tensions prévisibles à l'interface de puissance entre le convertisseur et la machine électrique	177
Figure 1 – Capacité couple/vitesse	103
Figure 2 – Courant de sortie du convertisseur	103
Figure 3 – Exemples de caractéristiques possibles de tension/fréquence de sortie du convertisseur	105
Figure 4 – Exemple de dépendance des pertes de la machine électrique dues aux harmoniques P_h , liées aux pertes P_{f1} à la fréquence de fonctionnement f_1 , sur la fréquence de commutation f_s en cas d'alimentation par convertisseur de source de tension de niveau 2	110
Figure 5 – Exemple de pertes mesurées P_L en fonction de la fréquence f et du type d'alimentation	111
Figure 6 – Pertes supplémentaires ΔP_L d'une machine électrique (même machine électrique qu'à la Figure 5) dues à une alimentation par convertisseur en fonction de la fréquence d'impulsion f_p , à une fréquence de rotation de 50 Hz	112
Figure 7 – Bruit relatif du ventilateur en fonction de sa vitesse	114
Figure 8 – Modes de vibration du noyau du stator	115
Figure 9 – Surtensions typiques aux bornes d'une machine électrique alimentée par un convertisseur MLI	119
Figure 10 – Surtensions typiques sur une phase au niveau du convertisseur et aux bornes de la machine électrique (2 ms/division)	120
Figure 11 – Surtension individuelle à temps de montée de courte durée issue de la Figure 10 (1 μ s/division)	120
Figure 12 – Définition du temps de montée t_r de l'impulsion de tension aux bornes de la machine électrique	121
Figure 13 – Tension appliquée sur la première spire en fonction du temps de montée	122
Figure 14 – Impulsion de décharge suite à une surtension générée par le convertisseur aux bornes de la machine électrique (100 ns/division)	124
Figure 15 – Courants parasites de paliers potentiels	126
Figure 16 – Capacités de la machine électrique	129
Figure 17 – Formation de piqûres sur les paliers due à une décharge électrique (diamètre de piqûre compris entre 30 μ m et 50 μ m)	130
Figure 18 – Formation de cannelures due à un courant parasite de palier excessif	130
Figure 19 – Bride de mise au potentiel entre la boîte à bornes et le châssis de la machine électrique	135
Figure 20 – Exemples de câbles et de connexions de machines électriques blindées	137
Figure 21 – Câblage symétrique parallèle de convertisseur et machine électrique à grande puissance	138
Figure 22 – Connexions du convertisseur avec presse-étoupe à haute fréquence sous un angle de 360° représentant la cage de Faraday	138
Figure 23 – Connecteur d'extrémité de la machine électrique avec une connexion sous un angle de 360°	139
Figure 24 – Connexion du blindage de câble	139
Figure 25 – Caractéristiques des mesures préventives	142
Figure 26 – Représentation schématique d'un convertisseur à trois niveaux type	145
Figure 27 – Tension et courant de sortie d'un convertisseur à trois niveaux type	145

Figure 28 – Tension type de première spire ΔU (en pourcentage de la tension phase-terre) en fonction du rapport du/dt	147
Figure 29 – Matériaux isolants et de protection antieffluves dues aux contraintes de tension exercées sur les bobines préformées à moyenne tension et à haute tension	148
Figure 30 – Représentation schématique du convertisseur de source de courant du type pleine onde	150
Figure 31 – Formes d'onde de courant et de tension du convertisseur de source de courant du type pleine onde	151
Figure 32 – Influence de l'alimentation par convertisseur sur les pertes d'une machine électrique à induction à cage (taille de carcasse 315 M, conception N) avec valeurs assignées de couple et de vitesse	153
Figure 33 – Représentation schématique des formes d'onde de tension et de courant pour une machine électrique synchrone alimentée par un convertisseur de source de courant	156
Figure 34 – Représentation schématique du convertisseur de source de courant du type pleine onde	158
Figure 35 – Tensions et courants du convertisseur de source de courant pulsé	158
Figure 36 – Représentation schématique d'un cycloconvertisseur	160
Figure 37 – Formes d'ondes de tension et de courant d'un cycloconvertisseur	161
Figure 38 – Tension fondamentale U_1 en fonction de la fréquence de fonctionnement f_1	163
Figure 39 – Facteur de déclassement du couple des machines électriques à induction à cage de conception N, IC 0141 (refroidissement par autocirculation), en fonction de la fréquence de fonctionnement f_1 (exemple)	164
Figure 40 – Courbe limite de tension de choc admissible $\hat{U}_{LL}/U_N$ (valeur de crête de la tension entre phases incluant la réflexion et l'amortissement de la tension assignée) aux bornes de la machine électrique en fonction du temps de montée t_r	165
Figure A.1 – Effets de la fréquence de commutation sur les pertes dans la machine électrique et dans le convertisseur	171
Figure A.2 – Effets de la fréquence de commutation sur le bruit acoustique	171
Figure A.3 – Effets de la fréquence de commutation sur l'ondulation de couple	172
Figure B.1 – Forme d'onde de la tension entre phases U_{LL} pour une alimentation par convertisseur de source de tension avec fréquence de commutation $f_s = 30 \times f_1$ (exemple)	173
Figure B.2 – Spectres de fréquences types de la tension de sortie du convertisseur	174
Figure B.3 – Spectres de fréquences types de la tension de sortie du convertisseur	174
Figure B.4 – Spectres de fréquences types de la tension de sortie du convertisseur	175
Figure B.5 – Caractéristiques temporelles types du courant de machine électrique	175
Figure B.6 – Caractéristiques temporelles types du courant de machine électrique	176
Figure C.1 – Exemple de courbes et de paramètres de tension types d'un onduleur à deux niveaux par rapport au temps aux bornes de la machine électrique (tension entre phases, donnée dans l'IEC TS 61800-8)	177

Tableau 1 – Facteurs importants qui affectent la capacité couple/vitesse	104
Tableau 2 – Considérations de conception des machines électriques	107
Tableau 3 – Paramètres de la machine électrique pour l'accord du convertisseur	108
Tableau 4 – Tension de fonctionnement aux bornes en unités de U_N , lorsque les machines électriques peuvent fonctionner de manière fiable sans accord particulier entre les fabricants et les intégrateurs de système.....	123
Tableau 5 – Efficacité des mesures de prévention applicables aux courants parasites de paliers.....	132

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TS 60034-25:2014

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES –

**Partie 25: Machines électriques à courant alternatif utilisées
dans les entraînements électriques de puissance –
Guide d'application**

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 tâche principale des comités d'études de l'IEC est l'élaboration des Normes internationales. Exceptionnellement, un comité d'études peut proposer la publication d'une spécification technique

- lorsqu'en dépit de maints efforts, l'accord requis ne peut être réalisé en faveur de la publication d'une Norme internationale, ou
- lorsque le sujet en question est encore en cours de développement technique ou quand, pour une raison quelconque, la possibilité d'un accord pour la publication d'une Norme internationale peut être envisagée pour l'avenir mais pas dans l'immédiat.

Les spécifications techniques font l'objet d'un nouvel examen trois ans au plus tard après leur publication afin de décider éventuellement de leur transformation en Normes internationales.

L'IEC 60034-25, qui est une spécification technique, a été établie par le comité d'études 2 de l'IEC: Machines tournantes.

Cette troisième édition de l'IEC TS 60034-25 annule et remplace la deuxième édition de l'IEC TS 60034-25, publiée en 2007, et la quatrième édition de l'IEC TS 60034-17, publiée en 2006. Elle constitue une révision technique.

Les principales modifications techniques par rapport aux éditions précédentes de l'IEC TS 60034-25 et de l'IEC TS 60034-17 sont les suivantes:

- a) fusion de l'IEC TS 60034-17 avec l'IEC TS 60034-25, avec ajout de l'Article 18 qui inclut désormais toutes les exigences spécifiques concernant les machines électriques standard à usage non déterminé. Combinaison des informations et des connaissances d'ordre général avec les autres articles de l'IEC TS 60034-25;
- b) remplacement de "Convertisseur U" par "convertisseur de source de tension";
- c) remplacement de "Convertisseur I" par "convertisseur de source de courant";
- d) réécriture de l'Article 7;
- e) ajout du paragraphe 9.2.6;
- f) suppression de l'Annexe C: Noise increments due to converter supply.

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

Projet d'enquête	Rapport de vote
2/1731/DTS	2/1750/RVC

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

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

NOTE Un tableau des correspondances de toutes les publications du comité d'études 2 de l'IEC peut être trouvé sur le site web de l'IEC, à la page d'accueil de ce comité.

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

- transformée en Norme internationale;
- 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 caractéristiques de fonctionnement et les données de fonctionnement des machines électriques alimentées par convertisseurs dépendent du système d'entraînement complet, comprenant le réseau d'alimentation, le convertisseur, le câblage, la machine électrique, la transmission mécanique et l'équipement de commande. Chacun de ces composants existe dans de nombreuses variantes techniques. Toutes les valeurs citées dans cette spécification technique sont donc données uniquement à titre indicatif.

Compte tenu des corrélations techniques complexes dans le système et de la variété des conditions de fonctionnement, le domaine d'application et l'objet de la présente spécification technique n'incluent pas la spécification des valeurs numériques ou des valeurs limites de toutes les grandeurs importantes pour la conception de l'entraînement électrique de puissance.

Dans la pratique courante, les entraînements électriques de puissance sont de plus en plus fréquemment constitués de composants produits par différents fabricants. La présente spécification technique a pour objet d'expliquer, dans toute la mesure du possible, l'effet de ces composants sur la conception de la machine électrique et de ses caractéristiques de fonctionnement.

La présente spécification technique traite à la fois des machines électriques à courant alternatif conçues spécifiquement pour une alimentation par convertisseur et des machines électriques alimentées par convertisseur, comprises dans le domaine d'application de l'IEC 60034-12, qui sont conçues à l'origine pour l'alimentation réseau.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TS 60034-25:2014

MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES –

Partie 25: Machines électriques à courant alternatif utilisées dans les entraînements électriques de puissance – Guide d'application

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 60034 décrit les caractéristiques de fonctionnement des machines électriques à courant alternatif destinées à être utilisées avec les alimentations par convertisseur. Des caractéristiques de conception sont définies pour les machines électriques conçues spécifiquement pour une application avec alimentation par convertisseur. La présente spécification technique spécifie également les paramètres d'interface et les interactions entre la machine électrique et le convertisseur, y compris les lignes directrices pour l'installation, comme partie intégrante d'un entraînement électrique de puissance, à l'exception toutefois de la tension à l'interface de puissance décrite dans l'IEC 61800-8.

Les exigences générales des parties correspondantes de la série de normes IEC 60034 s'appliquent également aux machines électriques comprises dans le domaine d'application de la présente spécification technique.

Pour les machines électriques fonctionnant dans des atmosphères explosibles, des exigences supplémentaires telles que décrites dans la série IEC 60079 ou la série IEC 61241 pour la protection contre l'inflammation des poussières s'appliquent.

La présente spécification technique ne traite pas principalement de la sécurité. Toutefois, certaines de ses recommandations peuvent avoir des implications pour la sécurité qu'il convient de prendre en considération le cas échéant.

Lorsqu'un fabricant de convertisseur fournit des recommandations d'installation spécifiques, il convient que ces dernières prévalent sur les recommandations de la présente spécification technique.

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 60034-1:2010, *Machines électriques tournantes – Partie 1: Caractéristiques assignées et caractéristiques de fonctionnement*

IEC 60034-2-1, *Machines électriques tournantes – Partie 2-1: Méthodes normalisées pour la détermination des pertes et du rendement à partir d'essais (à l'exclusion des machines électriques pour véhicules de traction)*

IEC 60034-2-2, *Machines électriques tournantes – Partie 2-2: Méthodes spécifiques pour déterminer les pertes séparées des machines de grande taille à partir d'essais – Complément à la CEI 60034-2-1*

IEC 60034-2-3, *Machines électriques tournantes – Partie 2-3: Méthodes d'essai spécifiques pour la détermination des pertes et du rendement des moteurs à induction en courant alternatif alimentés par convertisseur*

IEC 60034-6, *Machines électriques tournantes – Partie 6: Modes de refroidissement (Code IC)*

IEC 60034-9:2003, *Machines électriques tournantes – Partie 9: Limites de bruit*
Amendement 1:2007

IEC 60034-12, *Machines électriques tournantes – Partie 12: Caractéristiques de démarrage des moteurs triphasés à induction à cage à une seule vitesse*

IEC 60034-14:2003, *Machines électriques tournantes – Partie 14: Vibrations mécaniques de certaines machines de hauteur d'axe supérieure ou égale à 56 mm – Mesurage, évaluation et limites de l'intensité vibratoire*
Amendement 1:2007

IEC TS 60034-18-41:2014, *Machines électriques tournantes – Partie 18-41: Systèmes d'isolation électrique sans décharge partielle (Type I) utilisés dans des machines électriques tournantes alimentées par des convertisseurs de tension – Essais de qualification et de contrôle qualité*

IEC TS 60034-18-42, *Machines électriques tournantes – Partie 18-42: Essais de qualification et d'acceptation des systèmes d'isolation électrique résistants aux décharges partielles (Type II) utilisés dans des machines électriques tournantes alimentées par des convertisseurs de tension*

IEC 60050 (toutes les parties), *Vocabulaire Electrotechnique International* (disponible à <<http://www.electropedia.org>>)

IEC TR 61000-5-1, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 5: Guides d'installation et d'atténuation – Section 1: Considérations générales – Publication fondamentale en CEM*

IEC TR 61000-5-2, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 5: Guides d'installation et d'atténuation – Section 2: Mise à la terre et câblage*

IEC 61800-2:1998, *Entraînements électriques de puissance à vitesse variable – Partie 2: Exigences générales – Spécifications de dimensionnement pour systèmes d'entraînement de puissance à fréquence variable en courant alternatif et basse tension*

IEC 61800-3, *Entraînements électriques de puissance à vitesse variable – Partie 3: Exigences de CEM et méthodes d'essais spécifiques*

IEC 61800-5-1, *Entraînements électriques de puissance à vitesse variable – Partie 5-1: Exigences de sécurité – Électrique, thermique et énergétique*

IEC TS 61800-8:2010, *Adjustable speed electrical power drive systems – Part 8: Specification of voltage on the power interface* (disponible en anglais seulement)

IEC TS 62578:2009, *Power electronics systems and equipment – Operation conditions and characteristics of active infeed converter applications* (disponible en anglais seulement)

3 Termes et définitions

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

3.1

rapport de la tension de palier

BVR

rapport de la tension de palier à couplage capacitif sur la tension en mode commun

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

3.2

liaison

connexion électrique des parties métalliques d'une installation entre elles et à la terre

Note 1 à l'article: Pour les besoins de la présente partie de l'IEC 60034, cette définition combine les éléments de l'IEC 60050-195:1998, 195-01-10 (liaison équipotentielle) et 195-01-16 (liaison équipotentielle fonctionnelle).

3.3

tension (courant) en mode commun

moyenne arithmétique des tensions (courants) de phase à la terre

3.4

convertisseur

unité de conversion de la puissance électronique, qui modifie une ou plusieurs caractéristiques électriques et qui comprend un ou plusieurs dispositifs de commutation électronique et composants associés, tels que des transformateurs, des filtres, des dispositifs d'assistance à la commutation, des commandes, des dispositifs de protection et des auxiliaires, lorsqu'ils existent

Note 1 à l'article: Cette définition est issue de l'IEC 61800-2 et, pour les besoins de la présente spécification technique, elle englobe les termes "ensemble module d'entraînement" (CDM – complete drive module) et "module d'entraînement de base" (BDM – basic drive module) tels qu'ils sont utilisés dans la série IEC 61800.

[SOURCE: IEC 61800-2:1998, 2.2.1, modifiée (Note 1 à l'article ajoutée)]

3.5

machine électrique alimentée par convertisseur

machine électrique alimentée par un convertisseur de fréquence indépendamment du fait qu'elle soit conçue spécifiquement pour une alimentation par convertisseur, ou qu'elle soit une machine électrique dans le domaine d'application de l'IEC 60034-12 qui est conçue à l'origine pour une alimentation réseau

3.6

machine électrique à vitesse fixe

machine électrique prévue pour être alimentée par une puissance de sortie réseau à une fréquence de 50 Hz et/ou 60 Hz

Note 1 à l'article: Les machines électriques à vitesse fixe peuvent fonctionner en convertisseur de fréquence à vitesse variable.

3.7

compatibilité électromagnétique

CEM

aptitude d'un appareil ou d'un système à fonctionner dans son environnement électromagnétique de façon satisfaisante et sans produire lui-même des perturbations électromagnétiques intolérables pour tout ce qui se trouve dans cet environnement

[SOURCE: IEC 60050-161:1990, 161-01-07]

3.8

affaiblissement du champ

mode de fonctionnement d'une machine électrique où le flux de cette dernière est inférieur au flux correspondant à ses caractéristiques assignées

3.9

temps de montée

intervalle de temps compris entre les points à 10 % et 90 % de la tension nulle à la tension de crête (voir Figure 12)

3.10**entraînement électrique de puissance****PDS**

système comprenant un équipement de puissance (composé d'une section convertisseur, d'une machine électrique à courant alternatif, et d'un autre équipement tel que, sans toutefois s'y limiter, la section d'alimentation), et un équipement de commande (composé d'une commande de commutation – sous tension/hors tension par exemple – d'une commande de régulation de tension, fréquence ou courant, d'un système d'allumage, d'un dispositif de protection, d'un système de contrôle d'état, d'un système de communication, d'essais, d'un système de diagnostic, d'une interface/ d'un port de processus, etc.)

Note 1 à l'article: L'abréviation "PDS" est dérivée du terme anglais développé correspondant "power drive system".

3.11**mise à la terre pour des raisons de protection****PE**

mise à la terre d'un ou de plusieurs points d'un réseau, d'une installation ou d'un matériel pour des raisons de sécurité électrique

Note 1 à l'article: L'abréviation "PE" est dérivée du terme anglais développé correspondant "protective earthing".

[SOURCE: IEC 60050-195:1998, 195-01-11, modifiée ("électrique" ajouté après "sécurité")]

3.12**largeur de saut**

faible bande de fréquences de fonctionnement sur laquelle le régime permanent du PDS est entravé

3.13**impédance linéique de transfert**

quotient de la tension induite par unité de longueur, dans le conducteur central d'une ligne coaxiale, par le courant dans le conducteur extérieur

[SOURCE: IEC 60050-161:1990, 161-04-15]

3.14**intégrateur de système**

personne ou organisme qui rassemble les composants d'un PDS selon l'étendue de la fourniture et qui est par conséquent responsable du système

3.15**tension assignée** **U_N**

tension que le fabricant attribue à une condition de fonctionnement de fréquence industrielle spécifiée pour une machine électrique; elle est indiquée sur sa plaque signalétique

3.16**saut de tension**

variation de tension aux bornes de la machine électrique, se produisant au début de chaque impulsion lorsqu'elle est alimentée par un convertisseur

4 Caractéristiques de système**4.1 Généralités**

Bien que les étapes de spécification des caractéristiques d'une machine électrique et d'un convertisseur soient similaires pour toute application, le type d'application influe fortement sur

les choix définitifs. Le présent article décrit ces étapes et détaille les effets des divers types de charge d'application.

4.2 Informations de système

Des informations exhaustives concernant l'application qui considèrent la charge entraînée, la machine électrique, le convertisseur, et l'alimentation de service, constituent le meilleur moyen d'obtenir les caractéristiques de fonctionnement exigées du système dans son intégralité. Il convient généralement que ces informations comprennent:

- les exigences relatives à la puissance ou au couple à des vitesses différentes;
- la gamme de vitesses souhaitée de la charge et de la machine électrique;
- les exigences concernant la vitesse d'accélération et de décélération du processus commandé;
- les exigences de démarrage y compris la fréquence des démarrages et une description de la charge (inertie observée au niveau de l'arbre de la machine électrique, couple de charge lors du démarrage);
- le cycle de service de l'application (processus continu ou combinaison de démarrages, d'arrêts et de variations de vitesse; voir 3.1 de l'IEC 60034-1:2010);
- une description générale du type d'application, y compris l'environnement de fonctionnement des composants du PDS;
- une description de la fonctionnalité supplémentaire qui peut ne pas être satisfaite uniquement avec la machine électrique et le convertisseur (par exemple: surveillance de la température de la machine électrique, capacité de contournement du convertisseur si nécessaire, chaînes séquentielles ou signaux de référence de vitesse particuliers pour la commande du PDS);
- une description de l'alimentation électrique et du câblage disponibles. La configuration finale peut être affectée par les exigences du système sélectionné.

4.3 Considérations relatives au couple/à la vitesse

4.3.1 Généralités

Les caractéristiques typiques du couple/de la vitesse des machines électriques alimentées par convertisseurs, les facteurs déterminants importants et leurs conséquences sont présentés à la Figure 1, à la Figure 2 et à la Figure 3. Selon les exigences concernant les caractéristiques de fonctionnement du PDS, différentes conceptions de machine électrique sont possibles en vue d'une adaptation des valeurs limites individuelles.

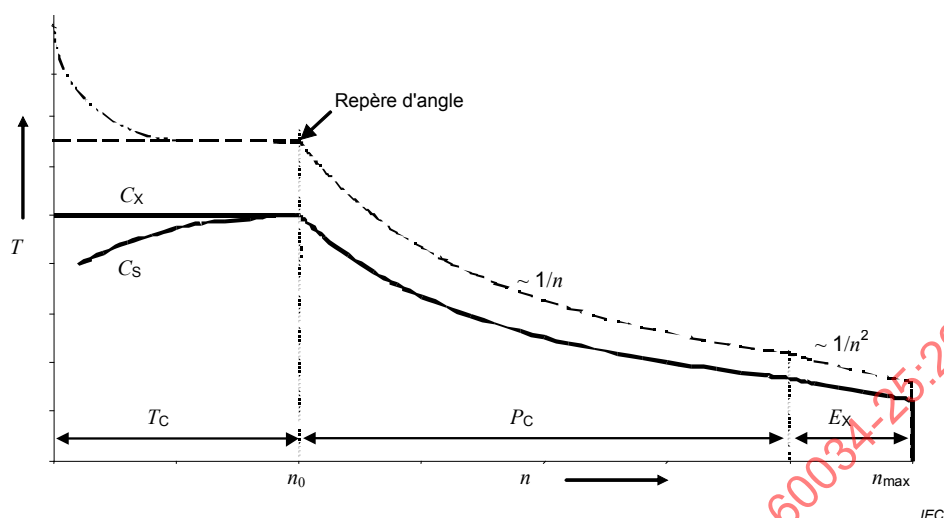
NOTE Les représentations de la Figure 1 à la Figure 3 ne montrent pas les largeurs de saut possibles (voir 4.3.8).

4.3.2 Capacité couple/vitesse

La Figure 1 montre la capacité couple/vitesse des machines électriques alimentées par convertisseurs. Le couple maximal disponible est limité par les caractéristiques assignées de la machine électrique et par la limitation de courant du convertisseur. Au-delà de la fréquence d'affaiblissement du champ f_0 et de la vitesse n_0 , la machine électrique peut fonctionner à vitesse constante avec un couple proportionnel à $1/n$. Pour les machines électriques à induction, lorsque le couple de rupture minimum (proportionnel à $1/n^2$) est atteint, la puissance est tenue d'être réduite davantage proportionnellement à $1/n$, produisant un couple proportionnel à $1/n^2$ (gamme étendue). Pour les machines électriques synchrones, la gamme étendue ne s'applique pas. La vitesse maximale opérationnelle $n_{\max}$ est limitée non seulement par la réduction du couple due à l'affaiblissement du champ à des vitesses supérieures à n_0 , mais également par la résistance mécanique et la stabilité du rotor, par la capacité de vitesse du système de roulement, et par d'autres paramètres mécaniques.

À basse fréquence, le couple disponible peut être réduit dans les machines électriques autorefroidies afin d'éviter toute possibilité de surchauffe.

Dans certaines applications, il peut être possible d'appliquer une assistance au couple temporaire pour le démarrage.



Légende

— Fonctionnement continu	T_C Gamme de couples constants	C_X Refroidissement distinct
- - - - - Fonctionnement temporaire	P_C Gamme de puissances constantes	C_S Autorefroidissement
· · · · · Démarrage de l'assistance au couple	E_X Gamme étendue (pour les machines électriques à induction)	

Figure 1 – Capacité couple/vitesse

La Figure 2 montre la capacité correspondante du courant de sortie du convertisseur (I).

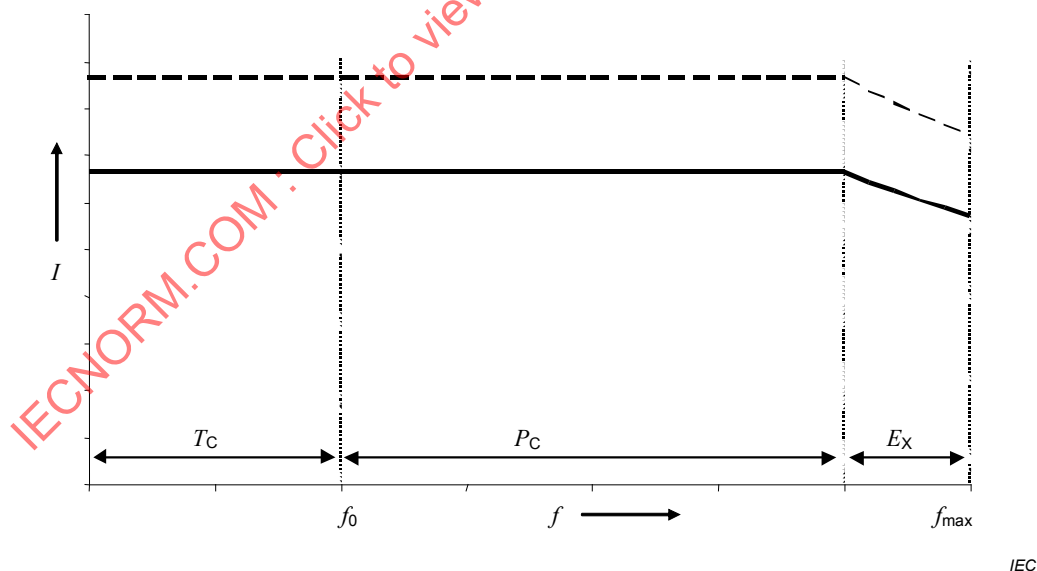


Figure 2 – Courant de sortie du convertisseur

4.3.3 Caractéristiques assignées de la machine électrique

Le point assigné auquel la machine électrique conçue pour une application avec convertisseur présente ses vitesse, tension, courant, couple et puissance assignés, est généralement le point auquel la machine électrique fournit son couple et sa puissance maximums, c'est-à-dire le point au repère d'angle n_0 à la Figure 1 où $n_N = n_0$. La vitesse maximale de fonctionnement peut être supérieure à la vitesse assignée et, selon les

caractéristiques de fréquence de tension (voir 4.3.7), la tension maximale de fonctionnement peut être supérieure à la tension assignée.

4.3.4 Facteurs de limitation applicables à la capacité couple/vitesse

Les facteurs importants qui influent sur la capacité couple/vitesse sont présentés dans le Tableau 1.

Tableau 1 – Facteurs importants qui affectent la capacité couple/vitesse

Condition	Machine électrique	Convertisseur
Démarrage	Capacité de flux maximale	Courant maximum
Flux constant	Refroidissement (pertes I^2R)	Courant maximum
Affaiblissement du champ (flux réduit)	Vitesse maximale (résistance mécanique et stabilité) Couple maximum (couple de rupture)	Tension maximale
Réponse dynamique	Paramètres du circuit équivalent (déterminés par modélisation)	Capacité de commande

4.3.5 Vitesse de sécurité en fonctionnement, capacité et essai de survitesse

Pour les machines électriques conçues spécifiquement pour une application avec convertisseur, il convient que le fabricant définisse leurs caractéristiques et les indique sur la plaque signalétique. Pour les moteurs à induction à cage basse tension, la vitesse de sécurité en fonctionnement est définie au 9.6 de l'IEC 60034-1:2010.

La survitesse des machines électriques à courant alternatif est définie en 9.7 de l'IEC 60034-1:2010, mais un essai de survitesse n'est normalement pas considéré comme nécessaire. Un essai a pour objet, lorsque cela est spécifié et convenu, de vérifier l'intégrité de conception du rotor par rapport aux forces centrifuges. Bien qu'il soit quasiment impossible pour une machine électrique à vitesse fixe d'atteindre une vitesse de fonctionnement supérieure à sa vitesse synchrone, la turbine peut accélérer la vitesse des générateurs électriques au-delà de leur vitesse synchrone, par exemple, dans le cas d'une réjection de charge subite.

Pour les machines électriques alimentées par convertisseurs, une accélération à une vitesse supérieure à la vitesse maximale de fonctionnement déterminée dans la commande du convertisseur est peu probable. Plus particulièrement pour les machines électriques "super-synchrones" de grande taille, il est souvent avantageux pour la conception globale de concevoir une machine électrique capable d'atteindre une survitesse maximale égale à 1,05 fois la vitesse maximale de fonctionnement. Un essai peut également être effectué à une vitesse égale à 1,05 fois la vitesse maximale de fonctionnement. Il n'existe aucun argument techniquement valable contre ce type d'accord.

Il convient de considérer qu'avec un fonctionnement à vitesse élevée, un équilibrage précis du rotor peut être exigé. Lorsqu'une vitesse élevée est exigée pendant une durée supérieure à de courtes périodes, la durée de vie des paliers peut être réduite. De même, pour des applications à vitesse élevée, il convient d'accorder une attention toute particulière tant à la durée de vie en service de la graisse qu'à la périodicité de regraissage.

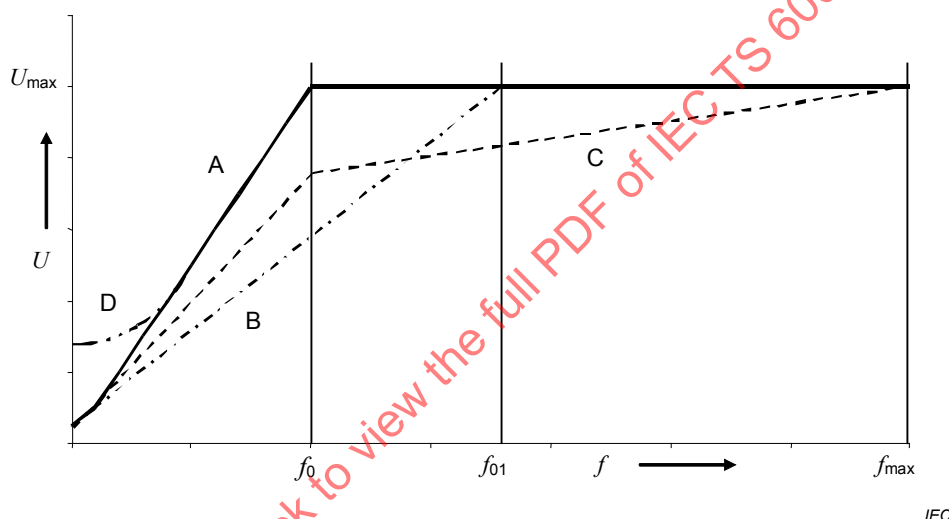
4.3.6 Dispositif de refroidissement

Comme l'indique la Figure 1, le type de refroidissement influence la capacité couple/vitesse maximale du PDS. Les machines électriques dont les puissances assignées sont exprimées en mégawatts comportent souvent un dispositif de refroidissement consistant en un circuit primaire de refroidissement (l'air étant habituellement le fluide de refroidissement primaire) et un circuit secondaire de refroidissement (l'air ou l'eau étant le fluide de refroidissement secondaire). Un échangeur de chaleur transfère les pertes thermiques du circuit primaire vers le circuit secondaire.

- Lorsque les deux fluides de refroidissement, primaire et secondaire, sont déplacés par un dispositif séparé, et lorsque leur écoulement est ainsi indépendant du régime du rotor de la machine électrique (par exemple, IC656 conformément à l'IEC 60034-6), la courbe illustrée à la Figure 1 propre au refroidissement séparé s'applique.
- Lorsque le fluide de refroidissement secondaire est déplacé par un dispositif séparé et le fluide de refroidissement primaire est déplacé par un dispositif entraîné par un arbre (par exemple, IC81W ou IC616), la courbe illustrée à la Figure 1 propre à l'autorefroidissement s'applique.
- Lorsque les deux fluides de refroidissement, primaire et secondaire, sont déplacés par un dispositif entraîné par un arbre, il convient que le couple de sortie ne dépasse pas la courbe $T/T_N = n^2/n_0^2$ et il est recommandé que la vitesse minimale de fonctionnement soit ≥ 70 % de la vitesse assignée.

4.3.7 Caractéristiques de tension/fréquence

La relation entre la tension de sortie du convertisseur (U) et la fréquence peut avoir plusieurs caractéristiques, comme indiqué à la Figure 3.



Légende

- A La tension augmente avec la fréquence, et la tension de sortie maximale du convertisseur $U_{\max}$ est obtenue à la fréquence d'affaiblissement du champ f_0 .
- B La tension augmente avec la fréquence, et la tension de sortie maximale du convertisseur $U_{\max}$ est obtenue au-dessus de la fréquence f_0 à une nouvelle fréquence d'affaiblissement du champ f_{01} . Ceci donne une gamme de vitesses étendue à un flux constant (couple constant), mais le couple disponible dans cette gamme de vitesses est inférieur à celui du cas A.
- C La tension augmente avec la fréquence, f_0 , puis augmente à une vitesse inférieure, la tension de sortie maximale du convertisseur $U_{\max}$ étant atteinte à la fréquence $f_{\max}$. Ceci évite une réduction excessive du couple dans la gamme de flux constants.
- D Une augmentation de tension est appliquée à de très basses fréquences afin d'améliorer les caractéristiques de démarrage, et d'empêcher une augmentation indésirable du courant.

Dans tous ces cas, la dépendance tension/fréquence peut être linéaire ou non linéaire, selon les exigences de couple-vitesse de la charge.

Figure 3 – Exemples de caractéristiques possibles de tension/fréquence de sortie du convertisseur

4.3.8 Gammes de vitesses résonantes

La gamme de vitesses d'une machine électrique alimentée par convertisseur peut inclure des vitesses qui peuvent exciter des résonances dans des parties du stator de la machine électrique, dans la machine électrique/le réseau d'arbres de charge ou dans le matériel entraîné. Selon le convertisseur, il peut être possible de sauter les fréquences résonantes.

Toutefois, même lorsque l'on saute les fréquences résonantes, la charge est soumise à accélération par cette vitesse lorsque la machine électrique est réglée pour fonctionner à toute vitesse supérieure à cette vitesse résonante. La réduction du temps d'accélération peut faciliter la réduction du temps effectif de résonance. La gamme de vitesses doit être convenue avec le fabricant de la machine.

4.3.9 Cycles de service

4.3.9.1 Généralités

Les applications de cycles de service sont celles dans lesquelles les transitions entre les vitesses ou les charges sont communes (voir IEC 60034-1). Plusieurs aspects de ce type d'application affectent la machine électrique et le convertisseur.

- La dissipation de chaleur de la machine électrique est variable, selon la vitesse de rotation et la méthode de refroidissement.
- Des sollicitations de couple supérieures au couple à pleine charge de la machine électrique peuvent être exigées. Un fonctionnement au-delà du couple à pleine charge de la machine électrique peut être exigé pour accélérer, traiter les charges de pointe, et même décélérer la charge. Un fonctionnement au-delà du courant assigné de la machine électrique accroît l'échauffement de la machine électrique. Ceci peut exiger une classe d'isolation thermique supérieure, une machine électrique assignée pour la surcharge appliquée, ou une évaluation du cycle de service afin de déterminer si le refroidissement de la machine électrique est suffisant pour l'application (voir IEC 60034-1, type de service S10).
- Un freinage par injection de courant continu, dynamique ou par contre-courant peut être exigé pour réduire la vitesse de la machine électrique. Indépendamment du fait que la machine électrique produit un couple pour entraîner l'application, réalimente le convertisseur du fait que la machine est entraînée par la charge, ou qu'elle fournit un couple de freinage pendant la décélération par l'application d'un courant continu sur les enroulements, un échauffement de cette même machine se produit environ proportionnellement à la valeur carrée du courant en cours d'application. Il convient d'inclure cet échauffement dans l'analyse des cycles de service. De plus, il convient de contrôler les couples transitoires exercés sur l'arbre par freinage, à un niveau qui ne provoque pas d'endommagement.

NOTE L'IEC 61800-6 fournit des informations sur le cycle de charge et la détermination du courant pour le PDS dans son ensemble.

4.3.9.2 Charges d'impact élevées

Elles constituent un cas particulier de service et existent dans certaines applications de couple intermittentes (par exemple, IEC 60034-1, type de service S6). Dans ces applications, l'application ou le retrait de la charge de la machine électrique est très rapide. Il est également possible que ce couple de charge soit positif (sens opposé au sens de rotation de la machine électrique) ou négatif (dans le même sens de rotation que la machine).

La charge d'impact produit une augmentation ou une diminution rapide de la sollicitation du courant (de la part du convertisseur). Si le couple est négatif, la machine électrique peut réacheminer le courant vers le convertisseur. Ces courants transitoires génèrent des contraintes dans l'enroulement du stator. L'amplitude de ces courants transitoires est fonction de la taille du convertisseur et de la machine électrique.

4.4 Exigences relatives à la machine électrique

NOTE Le présent paragraphe se rapporte principalement aux machines électriques à induction, mais certaines exigences peuvent toutefois également s'appliquer à d'autres types de machines électriques.

Le Tableau 2 indique certains aspects individuels principaux, ainsi que certaines considérations de conception principales.

Tableau 2 – Considérations de conception des machines électriques

Aspect d'application exigé	Considération de conception
Fonctionnement de longue durée à faible vitesse	Surdimensionnement thermique ou refroidissement forcé. Pour un fonctionnement de longue durée des paliers à coussinets-douilles en dessous de 10 % de la vitesse de repère d'angle, il convient que le fabricant confirme les caractéristiques de fonctionnement des paliers. Il convient de tenir compte du type de graisse et des périodicités de graissage.
Rapport de vitesses important	Refroidissement indépendant de la vitesse (ventilateur séparé, ou autre milieu de refroidissement, par exemple, l'eau)
Dispositif de retour de vitesse	Mesures de prévention pour l'interface mécanique. L'isolation électrique du capteur de vitesse peut s'avérer nécessaire
Vitesse élevée (affaiblissement du champ)	Aspects mécaniques. Couple de rupture élevé (c'est-à-dire faible réactance de fuite). La caractéristique U/f est constante jusqu'à ce que $f > f_0$ (voir Figure 3).
Meilleur rendement de la machine électrique avec alimentation par convertisseur	Modèles de cage de rotor (des barres de rotor avec un effet pelliculaire réduit sont préférables, voir 5.2). Peut altérer la capacité de mise en route
Capacité de contournement actif ou de mise en route	Il faut que le modèle de cage de rotor soit approprié. Par conséquent, le modèle peut ne pas être optimisé pour réduire les pertes et améliorer le rendement – un compromis équilibré est nécessaire
Couple de détachement élevé	Si possible, augmenter le flux de 10 % à 40 % (selon la taille de la machine électrique) à des fréquences quasi nulles
Chute de tension dans le convertisseur en raison de la modulation du filtre ou du câblage	Adaptation de la tension assignée de la machine électrique afin de compenser la chute de tension, c'est-à-dire que la tension assignée de la machine peut être inférieure à la tension d'alimentation par convertisseur.
Fonctionnement de plusieurs machines électriques à une vitesse commune quasi synchronisée	Caractéristiques de glissement/couple similaires des machines électriques

Dans certaines applications, le concepteur de la machine électrique peut requérir les paramètres électriques du circuit équivalent de la machine (voir Tableau 3 pour des exemples) en vue d'accorder le convertisseur.

Tableau 3 – Paramètres de la machine électrique pour l'accord du convertisseur

Paramètre	Description/explication	Commande scalaire	Commande vectorielle ou flux direct et asservissement de couple
Valeurs maximales			
Vitesse maximale		Oui	Oui
Températures maximales des enroulements du stator et du rotor		Oui	Oui
Paramètres acoustiques			
Fréquences qu'il convient que le convertisseur saute afin d'éviter des résonances acoustiques et de la machine électrique		Oui, en cas de fréquences porteuses discrètes	
Paramètres mécaniques			
Inertie	Pour des vitesses d'accélération élevées	Facultatif	Facultatif
Coefficients k_1 et k_2 et sollicitation du couple du ventilateur ($m = k_1 \times n + k_2 \times n^2$)	Pour certaines tâches d'automatisation ou de production en usine, lorsqu'une détermination précise de la puissance de sortie mécanique est exigée	Facultatif	Facultatif
Paramètres électriques du schéma de circuits équivalents T pour les machines électriques à induction			
Résistance du stator (R_s)	À la température de fonctionnement	Facultatif pour la compensation de IR	Oui
Résistance du rotor (R'_r) (voir NOTE 1)	À la température de fonctionnement	Facultatif pour une commande scalaire avancée	Oui
Réactance de fuite du stator ($X_{\sigma s}$)	À la fréquence de repère d'angle	Facultatif pour une commande scalaire avancée	Oui
Réactance de fuite du rotor ($X'_{\sigma r}$) (voir NOTE 1)	Au point de fonctionnement assigné, différent de l'état du rotor bloqué	Facultatif pour une commande scalaire avancée	Oui
Réactance magnétisante (X_m)	À la fréquence de repère d'angle et au point de fonctionnement assigné	Facultatif pour une commande scalaire avancée	Oui
Conductance magnétisante (G_m)	À la fréquence de repère d'angle et au point de fonctionnement assigné	Facultatif pour une commande scalaire avancée	Oui
Inductance magnétisante en fonction de la tension.	Pour un affaiblissement du champ	Oui, pour une commande scalaire avancée	Oui
Vitesse critique latérale si inférieure à la vitesse maximale de fonctionnement	Vitesse à éviter pour un fonctionnement continu	Oui	Oui
Effet pelliculaire du rotor, (par exemple, circuit équivalent d'échelle)	Pour une détermination précise des pertes d'harmoniques et de l'échauffement dans les applications qui exigent une réponse rapide du courant et une commande dynamique précise	Facultatif	Facultatif
Effet pelliculaire du stator		Facultatif	Facultatif

NOTE 1 Les paramètres électriques du rotor R'_r et X'_{or} sont tels qu'ils se rapportent au circuit du stator.

NOTE 2 Certains convertisseurs n'exigent pas de valeurs de résistance et de réactance des moteurs pour accord, dans la mesure où celles-ci déterminent d'elles-mêmes les paramètres exigés.

On doit également prendre en considération les vitesses critiques en torsion avec lesquelles il faut également éviter un fonctionnement continu.

Pour une meilleure modélisation thermique, ou dans les applications qui exigent un couple élevé avec un asservissement précis à des vitesses faibles, il peut également être utile que le concepteur de la machine électrique fournisse des données sur les capacités thermiques internes et les résistances des composants de la machine électrique. Ces paramètres peuvent dépendre de la fréquence de rotation et de commutation.

5 Pertes et leurs effets (pour les machines électriques à induction alimentées par des convertisseurs de source de tension)

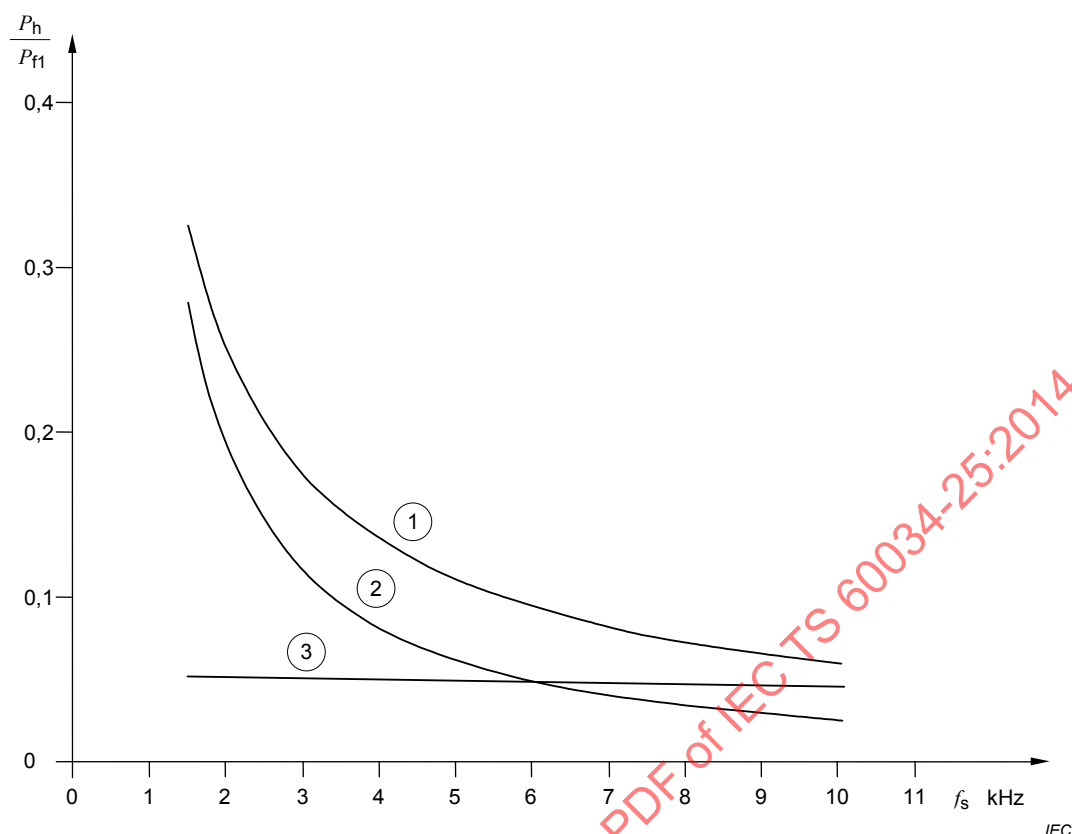
5.1 Généralités

Dans le cas de convertisseurs de source de tension, une connaissance du circuit équivalent de la machine électrique n'est normalement pas importante pour la conception du circuit de commutation, mais les impédances harmoniques de la machine électrique influencent notablement les pertes causées par les harmoniques. Les convertisseurs de source de tension appliquent leur tension de sortie sur les machines électriques associées. La tension de sortie synthétise une onde sinusoïdale au moyen d'impulsions de tension quasi rectangulaires, avec des pentes prononcées et une amplitude quasi constante (les convertisseurs à deux niveaux appliquent une valeur de crête à crête de la tension continue intermédiaire).

Outre les pertes bien connues dues à la tension et au courant fondamentaux, l'alimentation non sinusoïdale par un convertisseur génère des pertes supplémentaires dans la machine électrique. Ces pertes supplémentaires dépendent de la vitesse, de la tension et du courant, de la forme d'onde de tension de sortie du convertisseur, ainsi que de la conception et de la taille de la machine électrique. En l'absence d'inductances en série et de filtres, ces pertes peuvent avoisiner 10 % à 30 % des pertes fondamentales pour les convertisseurs à deux niveaux, et ainsi jusqu'à environ 1 % à 2 % de la puissance de sortie assignée de la machine électrique, avec une baisse proportionnelle à l'augmentation de la taille de la machine. Pour les convertisseurs à trois niveaux, les pertes supplémentaires dues à l'alimentation par convertisseur sont inférieures, généralement de 0,2 % à 1 % de la puissance de sortie assignée.

L'amplitude et le comportement caractéristique des pertes supplémentaires dues à l'alimentation par convertisseur dépendent de la conception de la machine électrique, du type et des paramètres du convertisseur, ainsi que de l'utilisation de circuits de filtrage.

La valeur totale des pertes supplémentaires provoquées par les harmoniques baisse proportionnellement à l'augmentation de la fréquence de commutation (voir Figure 4). Cet effet est provoqué par les pertes dans l'enroulement (pertes Joule) supplémentaires faibles aux fréquences de commutation élevées.



Légende

- 1 Pertes d'harmoniques totales
- 2 Pertes Joule harmoniques
- 3 Pertes dans le fer harmoniques

Figure 4 – Exemple de dépendance des pertes de la machine électrique dues aux harmoniques P_h , liées aux pertes P_{f1} à la fréquence de fonctionnement f_1 , sur la fréquence de commutation f_s en cas d'alimentation par convertisseur de source de tension de niveau 2

5.2 Emplacement des pertes supplémentaires dues à l'alimentation par convertisseur et méthodes de réduction de ces pertes

Pour les impulsions de sortie du convertisseur, la machine électrique apparaît comme une impédance dépendant de la fréquence. Les pertes de cette impédance sont dues principalement à l'effet pelliculaire sur les conducteurs (principalement les barres du rotor, mais dans certains cas, également les conducteurs du stator), ainsi qu'aux courants de Foucault présents dans les trajets de flux de fuite (notamment les tôles du stator).

Les pertes supplémentaires dues à l'alimentation par convertisseur peuvent être réduites au minimum par diverses mesures de calcul, par exemple:

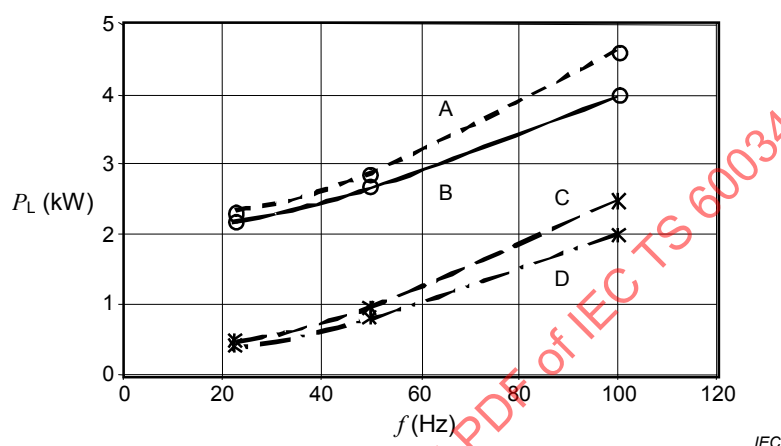
- conception des enroulements du rotor avec effet pelliculaire réduit;
- conception des enroulements du stator avec effet pelliculaire réduit;
- encoches de rotor ouvertes;
- prévention des courts-circuits entre les tôles du rotor;
- tôles du stator et du rotor plus minces afin de réduire les pertes dues aux courants de Foucault;

- pertes réduites dues aux courants de Foucault dans les inductances en série ou les filtres.

5.3 Caractéristiques du convertisseur visant à réduire les pertes de la machine électrique

5.3.1 Réduction des pertes fondamentales

La Figure 5 montre des exemples de pertes à vide et à pleine charge pour une machine électrique à une puissance de 37 kW et une fréquence de 50 Hz, alimentée par une tension sinusoïdale et un convertisseur de source de tension de 5,5 kHz. Il peut être observé que les pertes supplémentaires dues à une alimentation par modulation d'impulsions en largeur (MLI) sont faibles par comparaison avec les pertes fondamentales.



Légende

A Pleine charge, alimentation MLI

B Pleine charge, alimentation sinusoïdale

C À vide, alimentation MLI

D À vide, alimentation sinusoïdale

Figure 5 – Exemple de pertes mesurées P_L en fonction de la fréquence f et du type d'alimentation

L'optimisation du flux de la machine électrique selon la charge permet d'obtenir les meilleurs résultats de l'alimentation par convertisseur (par exemple, réduction du flux sous une charge partielle), étant donné que cela réduit les pertes fondamentales bien plus élevées que les pertes supplémentaires. Cette "optimisation du flux" est fréquemment utilisée dans les applications de pompes et de ventilateurs pour lesquelles le couple exigé est proportionnel au carré de la vitesse. À des vitesses inférieures, le couple est réduit de manière importante et peut par conséquent être généré avec un flux inférieur et avec des pertes moins importantes dans la machine électrique.

Le même principe s'applique à la "régulation du facteur de puissance constant" dans les applications où le couple de charge varie (pas nécessairement la vitesse), par un ajustement du flux de la machine électrique selon les besoins, de sorte que le facteur de puissance actuel de la machine électrique conserve sa valeur optimale.

Les pertes fondamentales peuvent également être réduites par une variation de la tension continue intermédiaire.

5.3.2 Réduction des pertes supplémentaires dues à l'alimentation par convertisseur

Les pertes supplémentaires dues à l'alimentation par convertisseur peuvent être réduites par une diminution du contenu harmonique de la tension de sortie du convertisseur par, par exemple:

- optimisation des diagrammes d'impulsions;

- augmentation de la fréquence de commutation; généralement, les pertes supplémentaires dues à l'alimentation par convertisseur dans la machine électrique présentent une forte baisse proportionnellement à l'augmentation de la fréquence d'impulsion jusqu'à quelques kHz (voir Figure 6). Cependant, les pertes par commutation dans le convertisseur augmentent avec la fréquence d'impulsion (voir Figure A.1) avec pour résultat une somme minimale des pertes à quelques kHz. Pour les convertisseurs à commande par MLI par hystérésis ou aléatoire, une fréquence de commutation moyenne s'applique qui peut également dépendre de la tension ou du courant;
- configuration de convertisseur multiniveaux.

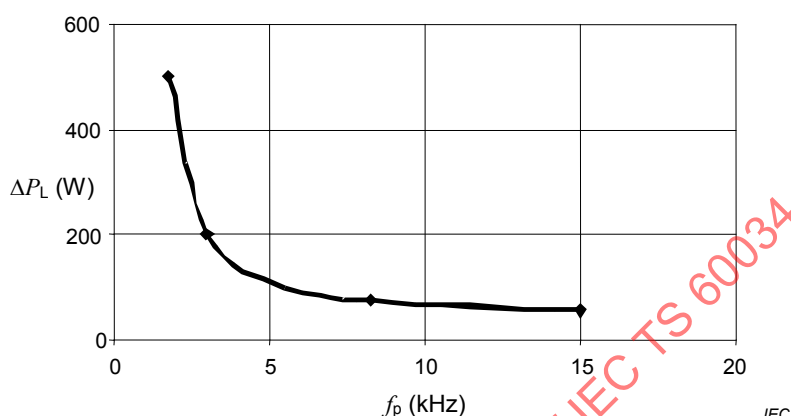


Figure 6 – Pertes supplémentaires ΔP_L d'une machine électrique (même machine électrique qu'à la Figure 5) dues à une alimentation par convertisseur, en fonction de la fréquence d'impulsion f_p , à une fréquence de rotation de 50 Hz

5.4 Utilisation de filtres afin de réduire les pertes supplémentaires de la machine électrique dues à une alimentation par convertisseur

Les filtres peuvent être utilisés à la sortie d'un convertisseur pour réduire l'amplitude et le rapport du/dt de la tension de commutation haute fréquence sans affecter de manière excessive la tension résultante basse fréquence qui apparaît aux bornes de la machine électrique. Les effets dans leur ensemble dépendent de l'application et du dimensionnement de la machine électrique et du filtre. La chute de tension dans le filtre réduit la tension aux bornes de la machine électrique, et il convient de tenir compte de cet élément afin d'éviter toute augmentation de la perte de courant fondamental dans ladite machine. De même, des pertes se produisent dans le filtre, mais celles-ci sont généralement inférieures à la réduction des pertes supplémentaires dans la machine électrique dues à l'alimentation par convertisseur, et de ce fait, le rendement global du PDS s'améliore.

Outre la réduction des pertes supplémentaires dans la machine électrique dues à l'alimentation par convertisseur, ces filtres peuvent également avoir un effet positif qui se traduit par une contrainte de tension réduite exercée sur les enroulements de la machine, l'ondulation réduite du couple, et l'amélioration des caractéristiques de CEM (voir 9.2). Toutefois, on observe un ralentissement de la réponse dynamique du PDS, et il peut y avoir d'autres limites dues à la chute de tension dans le filtre.

5.5 Influence de la température sur la durée de vie utile

La somme des pertes fondamentales et supplémentaires dues à la condition de charge et à la forme d'onde de tension entraîne un échauffement des enroulements de la machine électrique. L'échauffement est également affecté par une variation du refroidissement au point de fonctionnement dans la gamme de vitesses spécifiée.

Il existe plusieurs méthodes de prises en compte de cet effet, par exemple:

- utilisation d'une alimentation par refroidissement séparée, telle que IC0A6 ou IC1A7 (voir IEC 60034-6) pour une machine électrique refroidie par air;
- utilisation d'une classe d'isolation thermique supérieure (voir IEC 60034-1);
- compensation maximale de la température de fonctionnement ambiante prévue (voir IEC 60034-1);
- utilisation d'une machine électrique surdimensionnée;
- optimisation de la forme d'onde de sortie du convertisseur.

NOTE Des températures plus élevées peuvent affecter non seulement le vieillissement de l'isolation des enroulements, mais également la lubrification des paliers, et donc leur durée de vie.

L'influence d'une charge et d'une vitesse variables sur la température des enroulements est caractérisée par le type de service tel que défini dans l'IEC 60034-1. Les types de service les plus adaptés pour les machines électriques alimentées par convertisseurs sont S1 et S10. Le type de service S1 considère la température maximale admise, alors que S10 (pour un fonctionnement avec une charge et une vitesse variables) permet des échauffements qui dépassent les valeurs limites de la classe thermique pendant des périodes limitées. Les valeurs limites de l'échauffement sont données dans l'IEC 60034-1:2010, et l'Annexe A de cette norme donne une formule pour le calcul de la durée de vie utile thermique.

5.6 Détermination du rendement des machines électriques

Les méthodes recommandées de détermination du rendement des machines électriques avec une alimentation sinusoïdale sont données dans l'IEC 60034-2-1 et l'IEC 60034-2-2. Pour les moteurs à induction à cage alimentés par convertisseur de tension, une nouvelle méthode de détermination des pertes d'harmoniques est décrite dans l'IEC TS 60034-2-3.

Lorsque la pratique le permet et si cela est nécessaire pour une évaluation plus précise des pertes totales (y compris les pertes d'harmoniques supplémentaires), il convient de les déterminer avec le comportement du PDS final.

6 Bruit acoustique, vibrations et vibrations de torsion

6.1 Bruit acoustique

6.1.1 Généralités

Le convertisseur et sa fonction génèrent trois variables qui affectent directement le bruit émis. Ces variables sont les suivantes:

- variations de la vitesse de rotation qui peuvent aller d'une vitesse quasi nulle à des valeurs supérieures à la vitesse de repère d'angle. Les composants et les facteurs qui influencent les émissions de bruit sont les paliers et la lubrification, la ventilation et les autres caractéristiques éventuelles affectées par les variations de température;
- la fréquence et le contenu harmonique de l'alimentation de la machine électrique qui ont un impact significatif sur le bruit d'origine magnétique dans le noyau du stator et, dans une moindre mesure, sur le bruit de palier;
- les excitations de torsion et radiales du noyau du stator dues à l'interaction des ondes de différentes fréquences du champ magnétique dans l'entrefer de la machine électrique.

6.1.2 Variations de l'émission de bruit dues aux variations de la vitesse

6.1.2.1 Paliers à coussinets-douilles (ou lisses)

Le niveau de bruit émis par les paliers lisses ne varie pas de manière significative.

6.1.2.2 Paliers à éléments roulants

Les fréquences fondamentales de l'émission de bruit potentielle provenant d'un palier à éléments roulants varient directement avec la vitesse de rotation. Si le palier est "calme" à la vitesse de repère d'angle, il est peu probable que le niveau de bruit varie de manière significative lorsque la vitesse est réduite. Toutefois, lorsque l'on augmente la vitesse au-delà de la vitesse de repère d'angle, il est possible que le niveau de bruit puisse augmenter de manière considérable du fait de l'augmentation des harmoniques des fréquences fondamentales due au blocage des éléments roulants. Il a été démontré que la sensibilité à ce phénomène croît rapidement à des facteurs de vitesse (diamètre de palier en mm $\times$ vitesse de rotation en r/min) supérieurs à 180 000. L'expérience montre que l'accroissement du niveau de bruit peut être pris en compte par le renforcement de l'apport en lubrifiant pour le palier, en procédant à un regraisage à des périodicités très proches ou en utilisant une lubrification par bain d'huile ou par brouillard d'huile.

Lorsque la machine électrique fonctionne dans la gamme de ses vitesses les plus élevées, la température des paliers est plus élevée que lorsque la machine fonctionne à des vitesses moins élevées. Il est important par conséquent de s'assurer que la conception inclut une distance dans l'air nominale et/ou un dispositif à ressort appropriés.

Les paliers lubrifiés avec de la graisse fonctionnent parfaitement à des vitesses de fonctionnement faibles.

6.1.2.3 Bruit de ventilation

Pour un ventilateur monté sur l'arbre, le bruit engendré varie approximativement comme le niveau caractéristique illustré à la Figure 7 (pour une vitesse périphérique jusqu'à 50 m/s). Le bruit du ventilateur diminue d'environ 15 dB pour une réduction de la vitesse de 50 % et augmente d'environ 10 dB pour une augmentation de 50 % de la vitesse. En cas d'entraînement unidirectionnel, on peut obtenir une réduction de bruit très significative en utilisant un ventilateur placé sur la machine électrique, équipé de pales unidirectionnelles coudées.

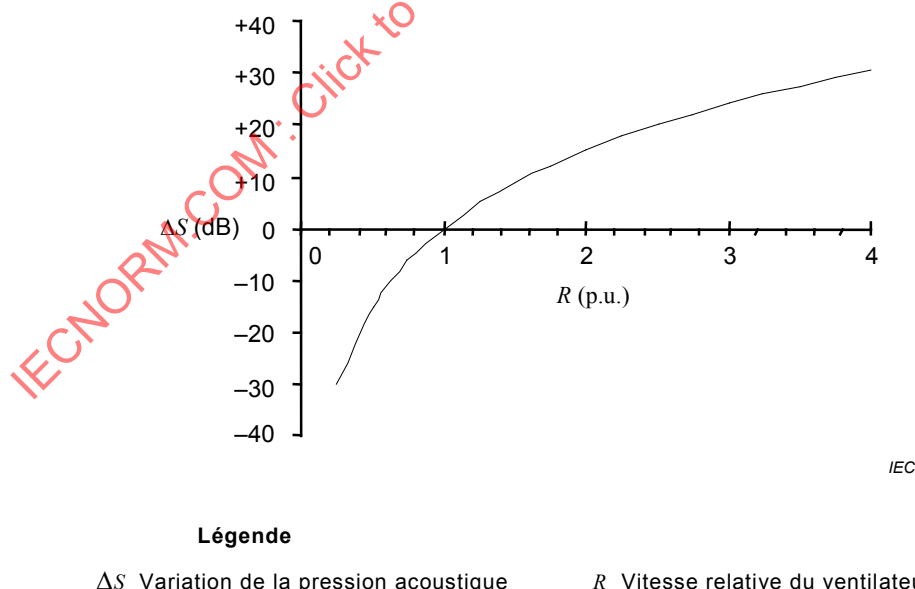


Figure 7 – Bruit relatif du ventilateur en fonction de sa vitesse

6.1.3 Bruit d'origine magnétique

Le bruit magnétique est essentiellement provoqué par des ondes de forces de traction agissant dans la direction radiale du circuit magnétique du stator. Ces forces dites de Maxwell sont excitées par l'interaction des divers champs magnétiques dans l'entrefer. La force de traction est caractérisée par son amplitude, sa fréquence et son mode. Étant donné que les

amplitudes sont faibles, la force de traction n'entraîne des bruits perturbants que lorsque la fréquence et le mode d'une onde spécifique coïncident avec la fréquence et le mode d'une fréquence naturelle du noyau du stator.

Dans le cas de tensions d'alimentation sinusoïdales, le bruit magnétique est provoqué par les harmoniques spatiaux du champ de l'entrefer. L'objectif d'une conception professionnelle est d'éviter les résonances aux conditions de fonctionnement assignées de la machine électrique. Cependant, en raison de la grande variété de champs harmoniques spatiaux qui contribuent au bruit, un bruit magnétique sonore est inévitable aux vitesses spécifiques, lorsque la machine électrique fonctionne à flux constant sur une large plage de réglage de vitesses, même lorsque la tension d'alimentation est sinusoïdale. Un saut d'une petite bande de fréquences est fréquemment utilisé pour éviter une émission de bruit trop élevée à la vitesse associée. Cela signifie que cet effet n'est pas associé à l'alimentation par convertisseur et se produirait également en cas de tensions d'alimentation sinusoïdales à fréquences variables.

Les indications données ci-dessus sont également valables lorsqu'une machine électrique est alimentée à partir d'un convertisseur. Cependant, dans ce cas, les champs magnétiques générés par les harmoniques de temps sont superposés. En ce qui concerne les bruits magnétiques considérables, il est suffisant de prendre en considération l'interaction des champs d'entrefer fondamentaux (nombre de paires de pôles p) de la fréquence de fonctionnement et les différents harmoniques. Par conséquent, les ondes générées en plus de la force de traction sont des modes $r = 0$ et $r = 2p$. Les fréquences naturelles de ces modes dépendent de la taille et de la conception de la machine électrique.

L'objectif des concepteurs d'un PDS est de générer des solutions acoustiques optimales, mais il convient toutefois de reconnaître que ces solutions ne relèvent pas de la seule responsabilité du concepteur du convertisseur, ni de celle du concepteur de la machine électrique, et que dans de nombreux cas, une collaboration en termes de conception est primordiale.

L'expérience montre qu'avec des fréquences d'impulsion inférieures à 3 kHz, les fréquences harmoniques peuvent être proches des fréquences naturelles du noyau et de la structure des machines électriques de taille moyenne et de grande taille, et par conséquent avec des applications de larges gammes de vitesses, les points de résonance sont quasiment inévitables en un point donné de la gamme de vitesses (voir Figure A.2). Les fréquences de résonance pour les modes $r = 0$ et $r = 2p$ (voir Figure 8 pour les illustrations des modes $r = 0$, 2 et 4) sont inférieures à 2,5 kHz pour les machines électriques à 2 pôles et 4 pôles, dont la hauteur d'arbre est supérieure à 315 mm. En revanche, la tendance d'augmentation de la fréquence d'impulsion du convertisseur à 4 kHz ou 5 kHz, voire plus, produit une résonance potentielle sur des machines électriques de taille progressivement plus petite.

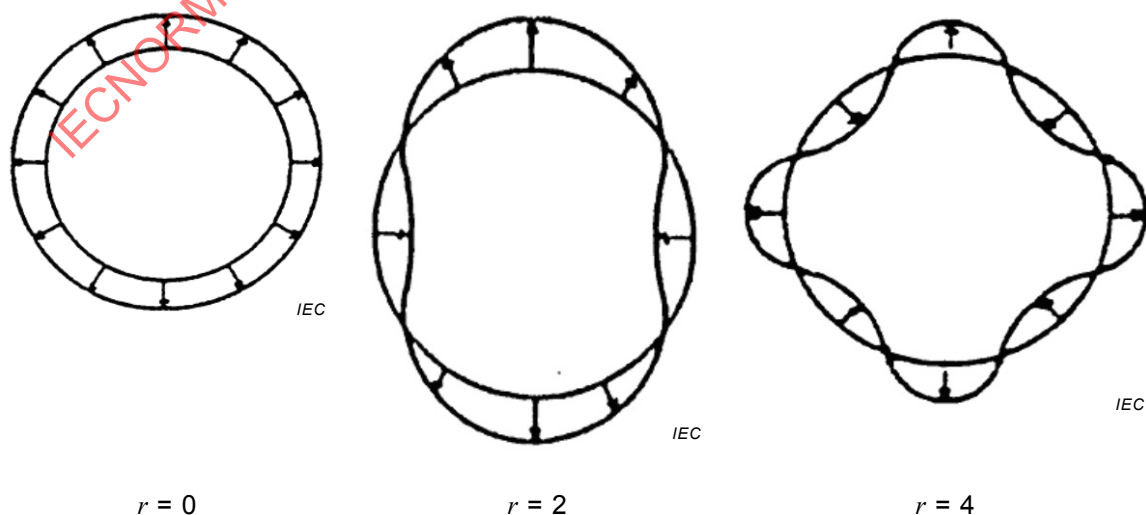


Figure 8 – Modes de vibration du noyau du stator

L'augmentation de bruit des machines électriques alimentées par convertisseurs à commande par MLI par comparaison avec la même machine électrique alimentée par tension sinusoïdale est relativement faible (quelques dB(A) uniquement), lorsque la fréquence de commutation est supérieure à 3 kHz environ. Pour des fréquences de commutation inférieures, l'augmentation de bruit peut être considérable (jusqu'à 15 dB(A) par expérience). Certains convertisseurs à commande par MLI ou par hystérésis de traitement préalable n'utilisent plus de fréquences porteuses fixes et génèrent par conséquent un spectre très large de fréquences non fondamentales. Ainsi, l'augmentation de bruit type et le bruit sonore subjectif peuvent être réduits de manière considérable.

Il peut s'avérer nécessaire de créer des «largeurs de saut» dans la gamme de vitesses de fonctionnement afin d'éviter les conditions de résonance.

Pour une indication de l'augmentation de bruit lorsque la machine fonctionne avec un convertisseur, voir IEC 60034-9:2007, Article 7.

6.1.4 Détermination et limites du niveau de puissance acoustique

6.1.4.1 Méthodes de mesure

Il convient de déterminer les niveaux de puissance acoustique conformément à l'IEC 60034-9 (voir 6.1.4.2).

6.1.4.2 Conditions d'essai

Lorsque la pratique le permet, il convient que la machine électrique soit installée sur un support rigide et il convient d'effectuer les essais avec la machine alimentée par un convertisseur avec les caractéristiques de sortie utilisées dans l'application.

En variante, et de préférence pour des machines électriques de plus grande taille, les essais peuvent être effectués à vide et à la fréquence assignée, sous une alimentation sinusoïdale.

6.1.4.3 Limites du niveau de puissance acoustique

Elles sont spécifiées dans l'IEC 60034-9:2007, dont l'Article 7 montre, sous forme de tableau, les augmentations de niveau prévues des machines électriques alimentées par convertisseurs, par comparaison avec une alimentation sinusoïdale.

6.2 Vibrations (à l'exclusion des vibrations de torsion)

6.2.1 Généralités

Le niveau de vibration produit par une machine électrique alimentée par convertisseur est influencé par les facteurs suivants:

- la conception électromagnétique de la machine électrique;
- la structure de la machine électrique, notamment le châssis;
- le montage de la machine électrique;
- la rigidité de l'arbre;
- la rigidité du couplage entre l'arbre de la machine électrique et le matériel entraîné;
- la forme d'onde de sortie du convertisseur.

Sous réserve que le convertisseur présente des caractéristiques de sortie adaptées et également qu'une attention toute particulière soit accordée aux caractéristiques mécaniques de la machine électrique et de son montage, des niveaux de vibration similaires à ceux générés par une machine électrique fonctionnant avec une alimentation sinusoïdale seront obtenus. Ainsi, il n'est pas nécessaire, pour les machines électriques alimentées par des convertisseurs de source de tension à MLI, d'établir des niveaux de vibration différents des

chiffres propres aux machines électriques par alimentation sinusoïdale, donnés dans l'IEC 60034-14.

L'IEC 60034-14 indique des limites de vibration d'essai pour les machines électriques lorsque celles-ci sont librement suspendues ou installées sur support rigide. Les chiffres d'essai mesurés donnent le niveau de vibration produit par une machine électrique non couplée dans des conditions de montage spécifiques et constituent ainsi une indication de la qualité de la machine électrique. Lorsque la machine électrique est montée sur un appareil ou sur un site couplé au matériel entraîné, le niveau de vibration est très différent.

Les résonances naturelles sont nombreuses dans le cas d'une machine électrique couplée à un matériel entraîné, et lorsque l'application exige de la machine qu'elle fonctionne sur une large gamme de vitesses, il peut être extrêmement difficile de toutes les éviter. En cas de problèmes, il est parfois possible de programmer le contrôleur de manière à "sauter" les bandes de fréquences qui excitent les résonances mécaniques (voir 4.3.8).

Il est tenu compte du fait que, dans la mesure où de nombreux facteurs qui influencent le niveau de vibration sont dus au système global, il n'est pas possible de traiter tous les problèmes de vibration en prenant en considération la conception proprement dite de la machine électrique.

6.2.2 Détermination et limites des niveaux de vibrations

6.2.2.1 Méthodes de mesure

Il convient de déterminer les niveaux de puissance acoustique conformément à l'IEC 60034-14 (voir 6.2.2.2).

6.2.2.2 Conditions d'essai

Lorsque la pratique le permet, il convient que la machine électrique soit installée sur un support rigide et il convient d'effectuer les essais avec la machine alimentée par un convertisseur avec les caractéristiques de sortie utilisées dans l'application.

En variante, selon accord entre le fabricant et le client, les essais peuvent être effectués à vide et à la fréquence assignée, sous une alimentation sinusoïdale.

NOTE 1 Cette recommandation peut augmenter la durée d'essai de manière significative, et n'est pas exigée par l'IEC 60034-14.

NOTE 2 Pour les mesures *in situ*, se reporter à l'ISO 10816-3.

6.2.2.3 Limites des niveaux de vibrations

Lorsque les essais sont effectués dans les conditions spécifiées en 6.2.2.2, il convient que l'amplitude de vibration mesurée sur les corps de paliers ne dépasse pas le niveau de vibration de catégorie A, donné dans le Tableau 1 de l'IEC 60034-14:2007.

6.3 Vibrations de torsion

Les couples asynchrones (permanents) générés par les harmoniques ont peu d'effet sur le fonctionnement de l'entraînement. Toutefois, ceci ne s'applique pas aux couples oscillatoires générés dans l'arbre des machines électriques alimentées par convertisseurs. L'amplitude de l'ondulation de couple et sa fréquence sont telles qu'elles peuvent produire des vibrations dans le système mécanique entier connecté, qu'il convient de vérifier avec soin afin d'éviter d'endommager les résonances mécaniques.

Dans les entraînements à convertisseurs à commande par impulsions, les fréquences des couples oscillatoires prépondérants sont déterminées par la fréquence de commutation, tandis que leurs amplitudes dépendent de la largeur d'impulsion. Ainsi, les amplitudes des

couples oscillatoires peuvent atteindre 15 %, sous réserve que la fréquence de commutation soit 10 fois supérieure à la fréquence de repère d'angle, ce qui est généralement le cas. Dans le cas des fréquences de commutation plus élevées (de l'ordre de $21 \times f_1$), les couples oscillatoires de fréquences $6 \times f_1$ et $12 \times f_1$ sont pratiquement négligeables, sous réserve d'appliquer une séquence appropriée d'impulsions (par exemple, modulation avec l'onde sinusoïdale de référence ou modulation par phaseur d'espace). De plus, des couples oscillatoires sont créés au double de la fréquence de commutation. Cependant, ceux-ci n'ont pas d'effets nuisibles sur le système d'entraînement, puisque leur fréquence est bien supérieure aux fréquences mécaniques critiques.

Un composant à courant continu ou un composant inverse produit par des asymétries de la tension de sortie du convertisseur produit un composant de couple égal à 1 ou 2 fois la fréquence d'alimentation fondamentale, et il convient en conséquence de l'éviter avec le plus grand soin. Il convient de se rappeler que, pour le courant continu, seule la résistance, et, pour un courant inverse, une impédance de court-circuit, sont effectives, et par conséquent de faibles tensions asymétriques génèrent des courants asymétriques plutôt élevés et ainsi des couples oscillatoires, notamment en cas de fréquence de résonance de la transmission. Les couples oscillatoires entraînent un endommagement du fait des espaces au niveau des trains d'engrenages, des couplages ou de certaines connexions d'arbre lorsque la surface de transmission des couples est capable de se déconnecter, puis de se "réarmer".

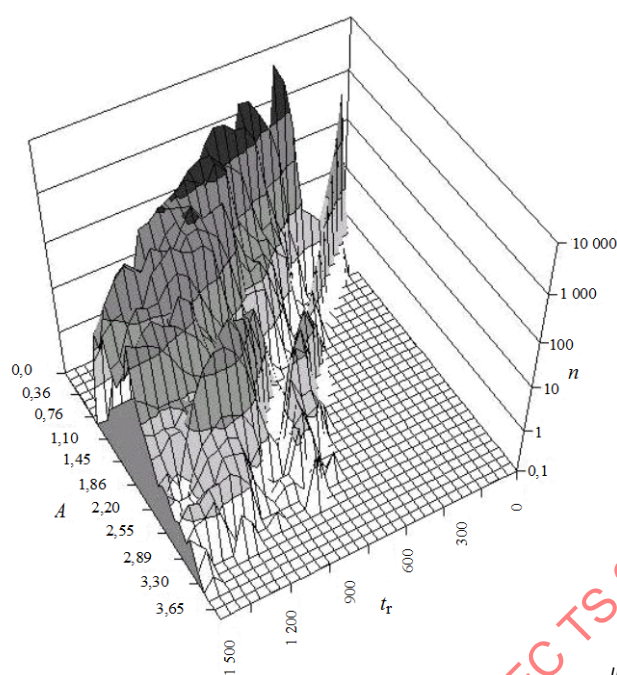
7 Contraintes électriques d'isolation des machines électriques

7.1 Généralités

Le système d'isolation de la machine électrique est soumis à une contrainte diélectrique plus élevée, lorsque celle-ci est alimentée par convertisseur, que dans le cas d'une source sinusoïdale alternative pure.

7.2 Causes

Un convertisseur de source de tension engendre des impulsions rectangulaires de tension d'amplitude fixe à largeur et fréquences variables. La tension d'amplitude des impulsions à la sortie du convertisseur est déterminée généralement par la tension de barre omnibus continue (1 p.u.), mais la superposition des effets transitoires en mode commun et en mode différentiel sur l'ensemble des topologies du système d'alimentation, du système de convertisseurs plus les auxiliaires tels que les conditions de mise à la terre, le câblage et le filtrage, est à analyser de manière claire et à prendre en compte (voir IEC TS 61800-8). Les temps de montée de la tension de sortie des convertisseurs basse tension modernes peuvent être compris dans une plage de 50 ns à 400 ns. Ils sont réduits le plus possible afin de réduire au minimum les pertes par commutation dans les semiconducteurs de sortie. Ces convertisseurs peuvent générer des dépassements de tension répétitive aux bornes d'une machine électrique reliée par un câble, qui peuvent réduire la durée de vie d'un système d'isolation d'une machine électrique s'ils dépassent son intensité de tension répétitive. La Figure 9 illustre le tracé du nombre de surtensions aux bornes d'une machine électrique alimentée par un convertisseur, mesuré sur une durée donnée dans diverses conditions de fonctionnement. Comme on peut l'observer, il n'existe pas de relation simple entre le nombre de surtensions, le temps de montée et l'amplitude. Cependant, le risque d'endommagement de l'isolation (dû à une décharge partielle, voir 7.3 et 7.6) est plus important avec des surtensions dans des conditions de temps de montée rapide et de tension élevée, ce qui indique que les surtensions présentes dans la partie droite supérieure de ce diagramme, lorsqu'elles sont observées depuis l'orientation de l'échelle t_r sont plus importantes.



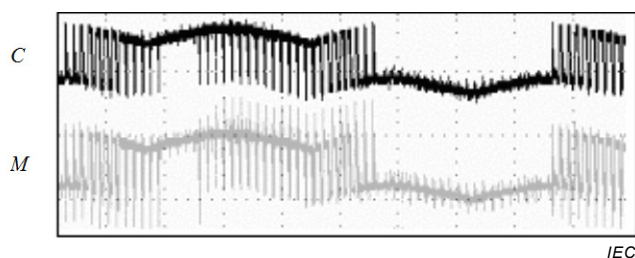
Légende

A Amplitude de surtension (p.u.) t_r Temps de montée (ns) n Nombre de surtensions (par seconde)

Figure 9 – Surtensions typiques aux bornes d'une machine électrique alimentée par un convertisseur MLI

Selon le temps de montée de l'impulsion de tension à la sortie du convertisseur, et selon la longueur de câble et l'impédance de la machine électrique, les impulsions engendrent des dépassements de tension aux bornes de la machine électrique (généralement jusqu'à 2 p.u. entre phases et de la phase à la terre). Ces dépassements de tension sont générés par des ondes réfléchies à l'interface entre le câble et les bornes de la machine électrique en raison d'une désadaptation d'impédance, et dépendent de la sortie du convertisseur, de la longueur de câble entre le convertisseur et la machine électrique, ainsi que de l'impédance aux bornes de la machine électrique. Ce phénomène s'explique pleinement par la théorie des lignes de transmission et des ondes progressives, qui utilise le contenu harmonique de la tension de sortie. La diminution du temps de montée est proportionnelle à l'augmentation des fréquences harmoniques présentes dans la forme d'onde de tension. Les surtensions typiques mesurées à la sortie d'un convertisseur et aux bornes de la machine électrique sont données à la Figure 10 avec une vue agrandie d'une surtension présentée à la Figure 11. Afin de faciliter une analyse complète, se reporter à l'IEC TS 61800-8.

Il convient que l'intégrateur de système du convertisseur et de la machine électrique mesure la tension phase-terre et la tension entre phases aux bornes de la machine électrique après installation du système afin de confirmer les valeurs attendues, dans la mesure où l'amplitude et le temps de montée réels sont complexes comme indiqué à la Figure 9. Si la surtension réelle est plus importante que les valeurs attendues, il convient que l'intégrateur de système prenne des mesures de prévention suivant 7.5 afin d'éviter les pannes de système en service imprévues.

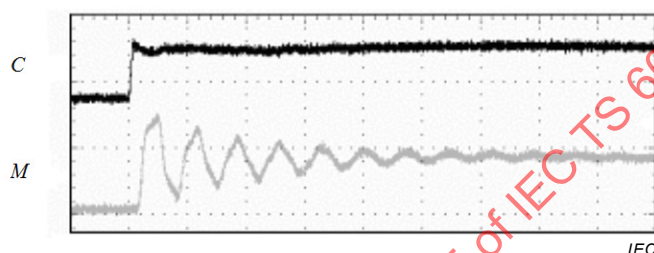


Légende

C Tension de phase au niveau du convertisseur

M Tension de phase au niveau de la machine électrique

Figure 10 – Surtensions typiques sur une phase au niveau du convertisseur et aux bornes de la machine électrique (2 ms/division)



Légende

C Tension de phase au niveau du convertisseur

M Tension de phase au niveau de la machine électrique

Figure 11 – Surtension individuelle à temps de montée de courte durée issue de la Figure 10 (1 μ s/division)

L'expérience montre que lorsque la longueur de câble augmente, le dépassement d'impulsion peut généralement augmenter jusqu'à un niveau maximum, puis peut diminuer. Dans l'intervalle, le temps de montée aux bornes de la machine électrique augmente. Les dépassements de tension pourraient être réduits dans le cas d'installations qui utilisent des convertisseurs placés à proximité immédiate de machines électriques associées, avec une longueur de câble réduite entre le convertisseur et la machine électrique.

7.3 Contraintes électriques des enroulements

La contrainte diélectrique de l'isolation des enroulements est déterminée par la tension de crête à crête et le temps de montée (pour la définition, voir Figure 12) de l'impulsion aux bornes de la machine électrique, et à la fréquence des impulsions produites par le convertisseur.

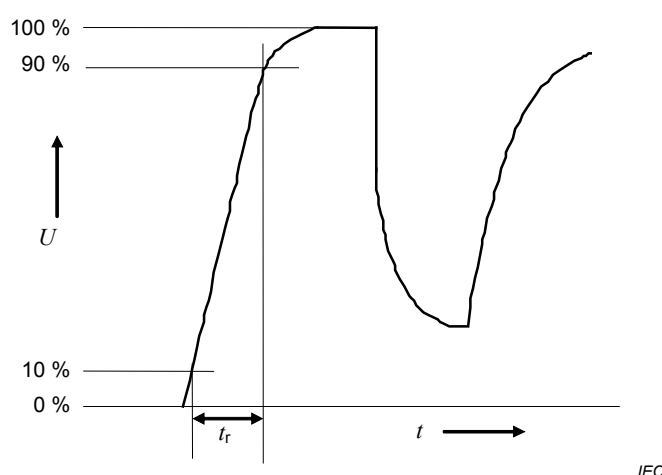


Figure 12 – Définition du temps de montée t_r de l'impulsion de tension aux bornes de la machine électrique

Une partie de la contrainte est déterminée par le niveau de tension appliqué sur l'isolation principale (entre phases ou de la phase à la terre) des bobines d'enroulement. L'autre partie de la contrainte est limitée par l'isolation entre spires et déterminée par le temps de montée des impulsions. Des impulsions à temps de montée réduit entraînent une répartition non uniforme de la tension dans les bobines, avec des niveaux de contrainte élevés présents entre les spires à la (aux) bobine(s) d'extrémité de ligne de l'enroulement de phase individuel.

La Figure 7 de l'IEC 60034-18-41:2014 reproduite ici en tant que Figure 13 montre la répartition la plus défavorable de la tension sur les première et dernière spires éventuellement contiguës d'un enroulement aléatoire en fonction du temps de montée.

Si cela n'est pas mieux identifié, on peut le considérer comme la tension la plus défavorable prévue exerçant une contrainte sur l'isolation entre spires de la machine électrique.

Comme illustré, plus le temps de montée est réduit, plus la tension appliquée sur la première spire de la bobine est importante.

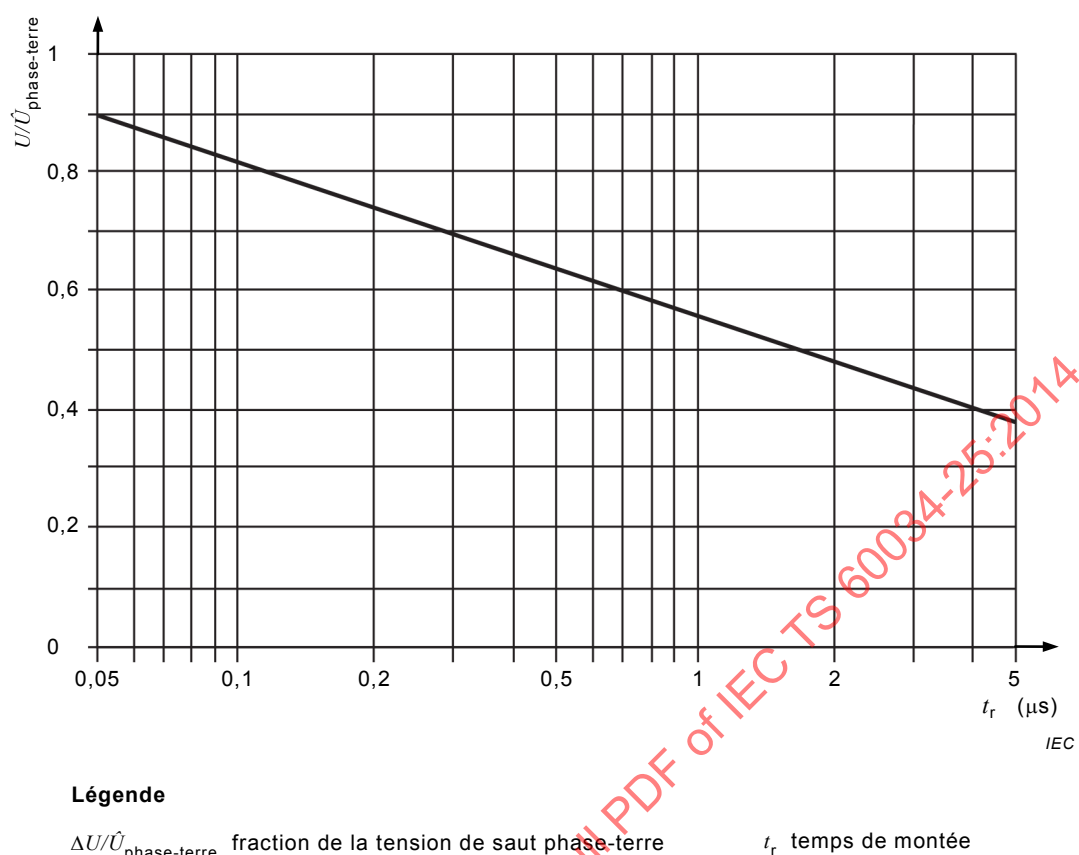


Figure 13 – Tension appliquée sur la première spire en fonction du temps de montée

Les impulsions à temps de montée réduit aux bornes de la machine électrique entraînent également des tensions entre spires élevées dans la (les) première(s) bobine(s) de chaque phase d'enroulement et peuvent être suivies par un claquage diélectrique rapide entre les spires. Ces phénomènes sont souvent dus à une résistance diélectrique inappropriée du revêtement d'émail et à un remplissage de résine inadéquat.

7.4 Limites et responsabilité

7.4.1 Conception de machines électriques pour basse tension ($\leq 1\,000\text{ V}$)

Le système d'isolation des machines électriques, dont la puissance assignée est inférieure à 1 000 V et qui sont conçues spécifiquement pour être alimentées par des convertisseurs de source de tension, peut être qualifié conformément à l'IEC 60034-18-41 (sans décharge partielle de type I) ou à l'IEC 60034-18-42 (avec décharge partielle de type II), cette qualification pouvant le cas échéant être indiquée dans la documentation et sur la plaque signalétique de la machine électrique. La spécification de la capacité de l'isolation des enroulements de la machine électrique relève de la responsabilité du fabricant de la machine.

Pour les applications PDS polyvalentes, il convient que la machine électrique respecte la classe d'isolation de la tension de choc C/B Tableau 4, extraite du Tableau C.1 de l'IEC 60034-18-41:2014. Il convient que le fabricant de la machine électrique s'assure que cette dernière est conforme à ces niveaux: c'est-à-dire les valeurs données dans le Tableau 4 (Annexe C de l'IEC 60034-18-41:2014).

Des valeurs supérieures et inférieures, ainsi que différentes combinaisons des classes P-P, P-G, T-T pour des applications spécifiques, sont données à l'Annexe C de l'IEC 60034-18-41:2014, afin d'adapter les capacités d'isolation de la machine électrique aux exigences du système tant en termes de rendement que de fiabilité.

En s'assurant qu'aucune réduction significative de la durée de vie en service de l'isolation de la machine électrique ne se produit, il convient que la contrainte réelle due au fonctionnement du convertisseur soit inférieure à la classe d'isolation de la tension de choc (IVIC) pour les isolations de type I conformément à l'IEC 60034-18-41 et aux tensions pour les isolations de type II conformément à l'IEC 60034-18-42 (il est prévu que la prochaine édition de l'IEC 60034-18-42 ait également une classe IVIC).

Il convient d'être informé du fait que des tensions bien plus élevées peuvent apparaître selon la topologie PDS. La contrainte de tension réelle à prévoir peut être déterminée conformément à l'IEC TS 61800-8, compte tenu de la réflexion de la tension potentielle selon la topologie et le mode de fonctionnement du convertisseur, du type et de la longueur de câble, de la mise à la terre, etc. Les paramètres applicables pour la contrainte d'isolation sont les suivants: valeurs transitoires de tension crête à crête, temps de montée, fréquence de répétition, etc.

L'intégrateur de système est chargé de déterminer et de spécifier le niveau de contrainte de tension aux bornes de la machine électrique (voir Annexe C pour un exemple de calcul de ces niveaux de contrainte de tension).

Dans le cas où les niveaux réels ou prévus aux bornes de la machine électrique sont supérieurs à ceux donnés dans la classe d'isolation de la tension de choc définie dans le Tableau 4, il faut adapter soit la topologie PDS, soit l'isolation de la machine. L'intégrateur de système est chargé d'effectuer les modifications de système ou de communiquer les exigences particulières au fabricant de la machine électrique ou du convertisseur. Les méthodes de réduction de la contrainte d'isolation sont données en 7.5.

Tableau 4 – Tension de fonctionnement aux bornes en unités de U_N , lorsque les machines électriques peuvent fonctionner de manière fiable sans accord particulier entre les fabricants et les intégrateurs de système

Classe d'isolation de la tension de choc	Tensions de fonctionnement crête à crête admissibles en unités de U_N	
	Entre phases C	Phase-terre B
IVIC C/B	5,9	3,1

(Voir l'IEC 60034-18-41:2014, Annexe C pour des détails)

NOTE 1 Il convient que le fabricant de la machine électrique s'assure que cette dernière est conforme à ces niveaux.

NOTE 2 Des accords particuliers entre les fabricants et les intégrateurs de système pourraient concerner une installation dédiée.

7.4.2 Machines électriques conçues pour une tension moyenne et élevée (> 1 000 V)

Le système d'isolation des machines électriques, dont la puissance assignée est supérieure à 1 000 V et qui sont conçues spécifiquement pour être alimentées par des convertisseurs de source de tension, peut être qualifié conformément à l'IEC 60034-18-42 (avec décharge partielle de type II), cette qualification pouvant le cas échéant être indiquée dans la documentation et sur la plaque signalétique de la machine électrique. La spécification de la capacité de l'isolation des enroulements de la machine électrique relève de la responsabilité du fabricant de la machine.

En attendant la publication de la prochaine édition de l'IEC 60034-18-42, afin de s'assurer qu'aucune réduction significative de la durée de vie en service de l'isolation de la machine électrique ne se produit, il convient que la contrainte réelle due au fonctionnement du convertisseur soit inférieure aux limites de contrainte maximale admissible déclarées par le fabricant de la machine.

7.5 Méthodes de réduction de la contrainte de tension

Il existe plusieurs méthodes possibles de réduction de la sévérité des surtensions dans une situation donnée. Ces méthodes peuvent être évaluées lors de l'observation du PDS entier. On peut calculer la plupart des facteurs d'influence en suivant l'IEC TS 61800-8. L'Annexe C donne un exemple d'utilisation très simple de l'IEC TS 61800-8.

7.6 Limitation de la contrainte d'isolation

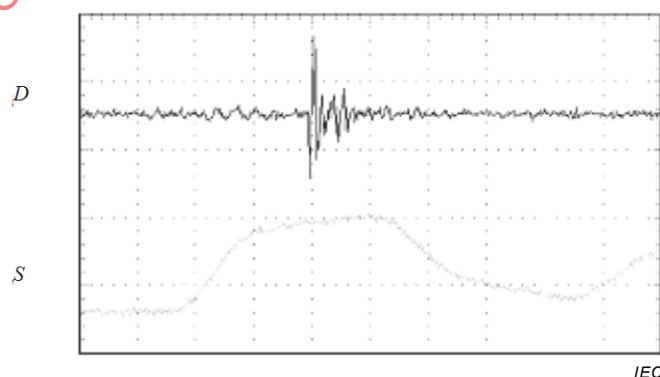
Le niveau limité supérieur auquel cette contrainte de surtension devient dangereuse correspond à la PDIV (tension à laquelle des décharges partielles commencent à se produire) ou, dans l'air, à la tension de couronne (CIV). Des décharges partielles peuvent provoquer la dégradation du système d'isolation par le biais d'une érosion chimique et d'une érosion mécanique. Le taux de dégradation de l'isolation dépend de l'énergie et de la fréquence d'occurrence des décharges partielles.

Les tensions PDIV et CIV dans une machine électrique sont influencées par:

- le type d'enroulement: à fils jetés ou préformé;
- la conception: séparation de phases et matériau de sol-parois;
- le type de vernis et la technique d'imprégnation;
- la taille des fils: un fil de diamètre plus grand a une PDIV plus élevée;
- le type d'isolation des fils;
- l'épaisseur de l'émail: un revêtement d'émail plus épais de fil augmente la PDIV;
- la température de fonctionnement: la diminution de la PDIV est proportionnelle à l'augmentation de la température des enroulements (généralement de 30 % entre 25 °C et 155 °C); ceci est vrai en partie seulement et généralement pas pour les enroulements de machine électrique préformés;
- l'atmosphère ambiante (composition et pression);
- l'état de l'isolation (contamination par la saleté ou l'humidité, etc.).

La Figure 14 présente une impulsion de décharge partielle issue d'une surtension observée sur une phase d'une machine électrique alimentée par convertisseur.

NOTE La décharge se produit au niveau du front montant d'une surtension générée par un convertisseur, étant donné que la contrainte de tension exercée sur un espace vide de l'isolation atteint sa résistance de rupture.



Légende

- | | | | |
|----------|--|----------|-----------------------|
| <i>S</i> | Surtension aux bornes de la machine électrique | <i>D</i> | Impulsion de décharge |
|----------|--|----------|-----------------------|

Figure 14 – Impulsion de décharge suite à une surtension générée par le convertisseur aux bornes de la machine électrique (100 ns/division)

8 Courants parasites de paliers

8.1 Sources des courants parasites de paliers dans les machines électriques alimentées par convertisseurs

8.1.1 Généralités

Plusieurs situations peuvent provoquer des courants parasites de paliers. Dans tous les cas, un courant parasite de palier s'écoule lorsqu'une tension apparaît sur le palier, suffisante pour altérer la capacité d'isolation du lubrifiant. Cette tension a plusieurs sources.

NOTE Des dispositifs auxiliaires, tels que des codeurs ou des compte-tours, selon 9.1.4.4, qui sont connectés à la machine électrique, peuvent également être affectés par les courants parasites de paliers.

8.1.2 Asymétrie magnétique

L'asymétrie du circuit magnétique d'une machine électrique crée une situation qui provoque des courants parasites de paliers à basse fréquence. Ceci est plus courant dans les machines électriques de puissance supérieure à 400 kW, mais peut également exister dans les machines électriques de petites dimensions également avec des asymétries magnétiques, telles que les machines à construction segmentée. Un circuit magnétique asymétrique produit un flux à courant alternatif circonférentiel (flux en anneau) dans la culasse. Ceci produit une tension alternative dans la boucle conductrice qui comprend l'arbre de la machine électrique, les paliers, les consoles d'extrémité et le châssis extérieur de la machine. Lorsque la tension produite est suffisante pour altérer l'isolation assurée par le lubrifiant, du courant s'écoule dans la boucle, y compris les deux paliers.

8.1.3 Cumul électrostatique

La tension peut également être générée par un cumul électrostatique sur l'arbre dû à la charge entraînée, telle qu'un ventilateur à filtre ionisé.

8.1.4 Tensions à haute fréquence

La tension en mode commun à haute fréquence aux bornes de la machine électrique génère des courants en mode commun dont une partie peut s'écouler dans les paliers de la machine électrique ou du matériel entraîné. Les courants en mode commun peuvent également générer une tension dans les paliers par une action du transformateur. Ces effets sont dus à l'utilisation de dispositifs semi-conducteurs de commutation rapide, et peuvent provoquer des problèmes propres aux paliers, dus à différents effets, des machines électriques, et ce, quelles que soient leurs caractéristiques assignées. Ces effets sont décrits en détail en 8.2.

8.2 Génération de courants parasites de paliers à haute fréquence

8.2.1 Généralités

Les facteurs les plus importants qui définissent quel mécanisme est prédominant, sont la taille de la machine électrique et la méthode de mise à la masse du châssis et de l'arbre de la machine. L'installation électrique, à savoir un type de câble adapté et une liaison correcte des conducteurs de terre et du blindage électrique, a également son importance, ainsi que la tension d'entrée assignée du convertisseur et la vitesse de montée de la tension de sortie de ce même convertisseur. La source des courants parasites de paliers est la tension appliquée sur le palier. Il existe trois types de courants parasites de paliers à haute fréquence: courant circulant, courant de mise à la terre de l'arbre et courant de décharge capacitive.

Deux types de courants parasites de paliers, à savoir le courant circulant à haute fréquence (I_C) et le courant de mise à la terre de l'arbre (I_S), sont présentés de manière schématique à la Figure 15. Ces courants sont fortement influencés par les dispositions et les impédances de mise à la terre.

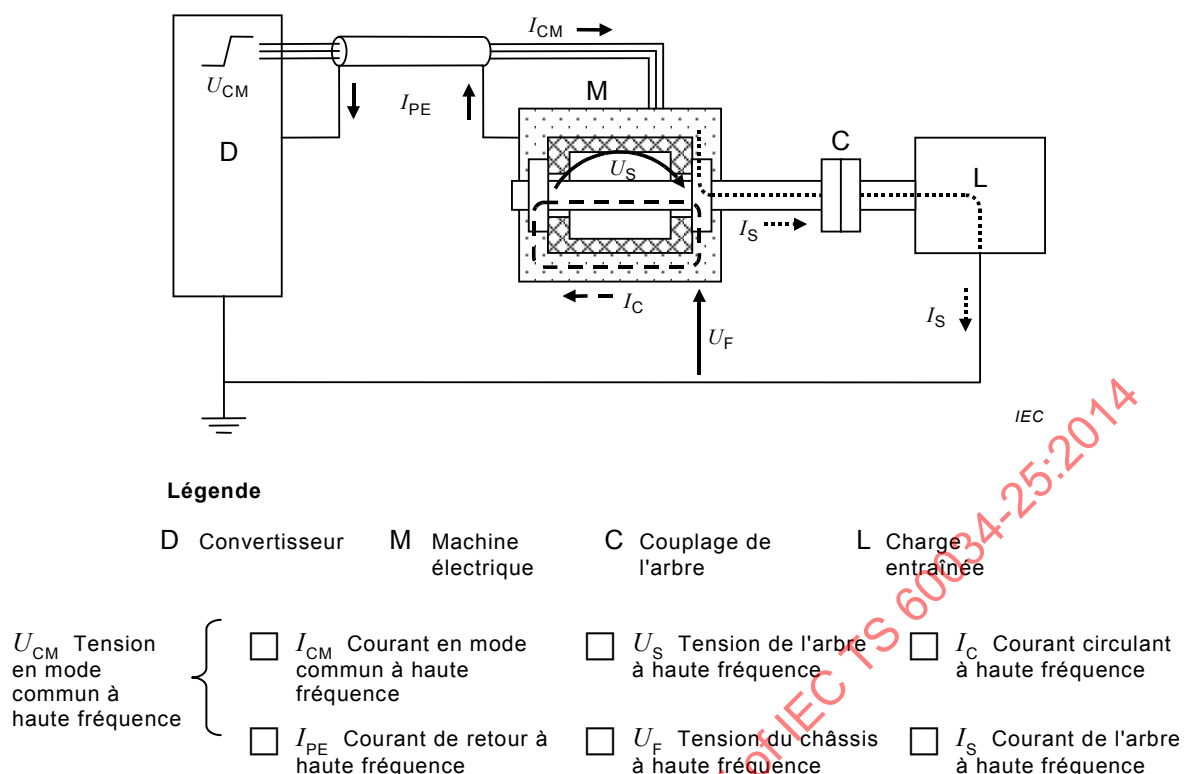


Figure 15 – Courants parasites de paliers potentiels

8.2.2 Courant circulant

Dans les machines électriques de grande taille, une tension à haute fréquence est produite dans la boucle fermée, comme décrit en 8.1.2, par le flux à haute fréquence qui circule autour de la culasse du stator. Ce flux est provoqué par les courants capacitifs de fuite entre l'enroulement et les tôles du stator. La tension de l'arbre produite peut affecter les paliers. Lorsqu'il est suffisamment important pour se substituer à l'isolation du film lubrifiant des paliers, un courant compensateur visant à équilibrer le flux dans le stator s'écoule, formant une boucle autour de l'arbre, du palier et de la carcasse du stator.

Ces courants à haute fréquence peuvent se superposer aux courants à basse fréquence générés comme décrit en 8.1.2.

8.2.3 Courant de mise à la terre de l'arbre

Il est nécessaire que le courant de fuite dans la carcasse du stator revienne vers le convertisseur, qui constitue la source du courant. Tout parcours de retour comporte une impédance et, par conséquent, la tension appliquée sur le châssis de la machine électrique augmente par rapport au niveau du sol source. Lorsque l'arbre de la machine électrique est mis à la terre via les machines entraînées, on observe une augmentation de la tension du châssis de la machine électrique appliquée sur les paliers. Lorsque l'augmentation de la tension est suffisante pour se substituer à la capacité d'isolation du film lubrifiant du palier, une partie du courant peut s'écouler par l'intermédiaire de ce palier, de l'arbre et de la machine électrique entraînée pour retourner vers le convertisseur.

8.2.4 Courant de décharge capacitive

La répartition de la tension interne de la tension en mode commun sur les capacités internes de la machine électrique peut générer des tensions parasites de paliers suffisamment élevées pour altérer le film de lubrification des paliers, produisant des impulsions de courant parasite de palier à haute fréquence (désignées comme courants d'ajustage de décharge électrostatique). Ceci peut se produire lorsque l'arbre n'est pas mis à la masse via les

machines entraînées alors que le châssis de la machine électrique est relié à la masse à des fins de protection.

8.3 Circuit en mode commun

8.3.1 Généralités

Un circuit en mode commun est un trajet à boucle fermée dédié à l'écoulement du courant circulant dans l'ensemble du système, y compris la machine électrique et ses paliers, la charge et le convertisseur.

Une alimentation sinusoïdale triphasée typique est équilibrée et symétrique dans des conditions normales. Ainsi, la tension neutre est nulle. Ceci n'est toutefois pas le cas avec une alimentation triphasée commutée MLI, où la tension continue est convertie en tension triphasée. Bien que les composantes de fréquences de repères d'angles des tensions de sortie soient symétriques et équilibrées, il n'est pas possible que la somme des trois tensions de sortie soit égale à zéro de manière instantanée avec uniquement deux niveaux de sortie possibles disponibles. La tension de point neutre résultante n'est pas nulle. Cette tension est la source de tension en mode commun. Elle est mesurable au point en étoile de l'enroulement de la machine électrique (ou à un point en étoile artificiel pour la connexion des enroulements autres que des enroulements avec point en étoile) quelle que soit la charge appliquée. La tension est proportionnelle à la tension de barre omnibus continue, et sa fréquence significative est égale à la fréquence de commutation du convertisseur.

Chaque modification de l'une des trois tensions de sortie du convertisseur de l'un des potentiels possibles en un autre potentiel, force un courant proportionnel à cette variation de tension à s'écouler vers la terre via les capacités correspondantes de toutes les composantes du circuit de sortie. Le courant retourne vers la source via le conducteur de terre et les capacités du convertisseur.

8.3.2 Écoulement du courant en mode commun du système

Le trajet de retour du courant de fuite entre le châssis de la machine électrique et le châssis du convertisseur comporte effectivement le châssis de la machine électrique, le blindage du câble ou les conducteurs de mise à la masse, et éventuellement les parties conductrices de la structure de construction en usine. Tous ces éléments comportent une inductance. L'écoulement du courant en mode commun à travers cette inductance entraîne une chute de tension qui élève le potentiel du châssis de la machine électrique par rapport au châssis du convertisseur. La tension du châssis de la machine électrique représente une partie de la tension en mode commun du convertisseur. Le courant en mode commun recherche le trajet de moindre impédance. Lorsque les trajets prévus comportent une impédance élevée, comme la connexion de masse du châssis de la machine électrique, la tension appliquée sur ce même châssis entraîne le détournement d'une partie du courant en mode commun vers un trajet non prévu, tel que celui traversant la structure de construction. Les installations rencontrées dans la pratique comportent de nombreux trajets parallèles. La plupart de ces trajets ont un impact mineur sur la valeur du courant en mode commun ou des courants parasites de paliers, mais cet impact peut toutefois être important lorsqu'il s'agit de maîtriser les exigences de CEM.

Toutefois, si la valeur de cette inductance est suffisamment élevée, des chutes de tension de plus de 100 V peuvent se produire entre le châssis de la machine électrique et le châssis du convertisseur. Lorsque, dans ce type de cas, l'arbre de la machine électrique est relié via un couplage métallique à un boîtier d'engrenages ou à d'autres machines entraînées mis à la terre de manière rigide et dont le potentiel est proche de celui du châssis du convertisseur, il est alors possible qu'une partie du courant en mode commun du convertisseur s'écoule via les paliers de la machine électrique, l'arbre et les machines entraînées pour retourner vers le convertisseur.

Lorsque l'arbre des machines n'est pas directement en contact avec le sol, le courant peut s'écouler via le boîtier d'engrenages ou les paliers de la machine électrique de charge. Ces paliers peuvent être endommagés avant les paliers de la machine électrique.

8.4 Capacités parasites

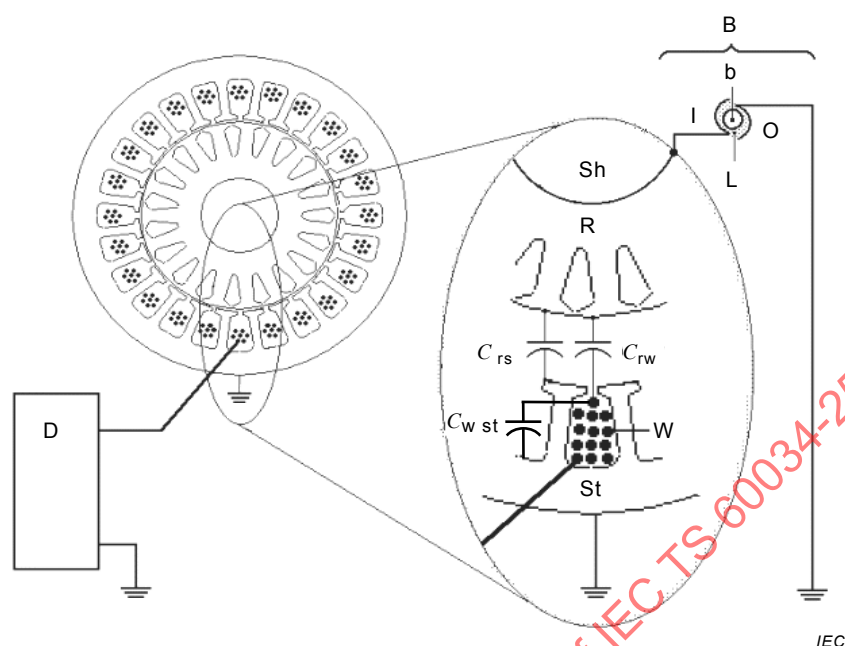
8.4.1 Généralités

Les capacités parasites internes à la machine électrique (voir Figure 16) sont très faibles et présentent une impédance élevée pour les basses fréquences, bloquant ainsi les courants à basse fréquence. Toutefois, les impulsions à augmentation rapide produites par des convertisseurs modernes comportent des fréquences si élevées que même les faibles capacités internes à la machine électrique génèrent un trajet de faible impédance pour l'écoulement du courant.

8.4.2 Composante principale de la capacité

La plus grande part de la capacité de la machine électrique est constituée entre les enroulements du stator et le châssis de la machine électrique. Cette capacité est répartie autour du périmètre et de la longueur du stator. Lorsque le courant s'écoule dans le stator le long de la bobine, le contenu à haute fréquence du courant qui pénètre dans la bobine du stator est supérieur à celui du courant qui sort de cette même bobine.

Ce courant axial net génère un flux en anneau magnétique à haute fréquence qui circule dans les tôles du stator, en produisant une tension axiale dans la boucle décrite au 8.1.2. Si la tension de l'arbre devient suffisamment importante, un courant circulant à haute fréquence peut s'écouler à travers l'arbre et les deux paliers, et, dans certains cas, à travers l'arbre et les paliers de la machine électrique de charge. Ce courant circulant endommage généralement les paliers, avec les valeurs de crête types comprises entre 3 A et 20 A, selon la taille de la machine électrique, la vitesse de montée de la tension aux bornes de la machine électrique et le niveau de tension de liaison continue.



Légende

D	Convertisseur	Sh	Arbre	R	Rotor	St	Stator
W	Enroulement	C_{rs}	Capacité rotor-stator	C_{rw}	Capacité rotor-enroulement	B	Palier
b	Bille ou rouleau	$C_{w\ st}$	Capacité enroulement-stator	I	Chemin de roulement intérieur	O	Chemin de roulement extérieur
L	Film lubrifiant						

Figure 16 – Capacités de la machine électrique

8.4.3 Autres capacités

La capacité entre l'enroulement et les tôles du stator est un élément important du circuit en mode commun. Il existe d'autres capacités telles que la capacité entre les enroulements du stator en surplomb et le rotor, ou celle qui existe dans l'entrefer de la machine électrique entre le fer du stator et la surface du rotor. Les paliers eux-mêmes ont également une capacité.

Les variations rapides de la tension en mode commun du convertisseur ne peuvent pas uniquement générer des courants dans la capacité au voisinage du périmètre et le long de la machine électrique, mais également entre les enroulements du stator et le rotor en direction des paliers.

L'écoulement de courant dans les paliers peut changer rapidement selon l'état de ces derniers. Par exemple, la capacité des paliers est maintenue tant que les billes des roulements sont recouvertes de lubrifiant et sont non conductrices. Cette capacité peut faire l'objet d'un court-circuit lorsque la tension des paliers dépasse le seuil de la valeur de coupure ou lorsque le film lubrifiant des paliers est appauvri et entre en contact avec les deux chemins de roulement. À très faible vitesse, les paliers peuvent également présenter un contact métallique dû à l'absence de film lubrifiant isolant.

8.5 Conséquences de courants parasites de paliers excessifs

La Figure 17 et la Figure 18 montrent un endommagement type des paliers dû à une décharge électrique et aux courants en mode commun.

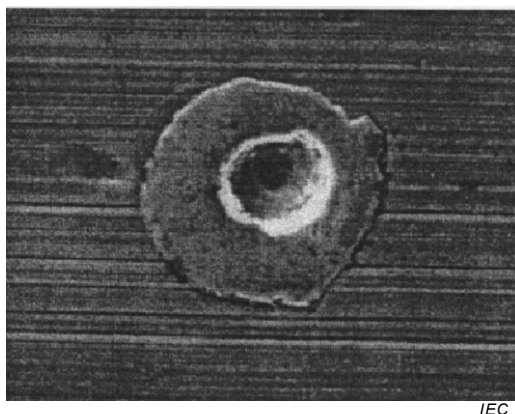


Figure 17 – Formation de piqûres sur les paliers due à une décharge électrique (diamètre de piqûre compris entre 30 μm et 50 μm)

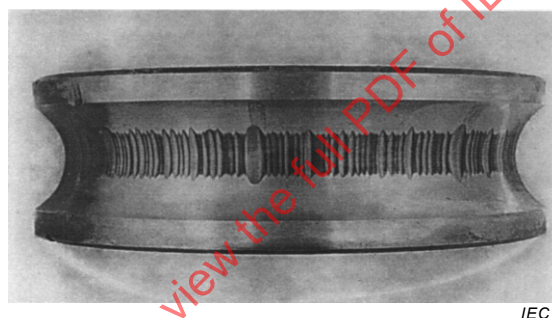


Figure 18 – Formation de cannelures due à un courant parasite de palier excessif

8.6 Prévention d'un endommagement par un courant parasite de palier à haute fréquence

8.6.1 Principes

Trois principes permettent de prévenir les courants parasites de paliers à haute fréquence. Ces principes peuvent être utilisés séparément ou de manière combinée:

- câblage et système de mise à la terre appropriés;
- modification des boucles de courants parasites de paliers;
- amortissement de la tension en mode commun à haute fréquence.

Tous ces éléments ont tendance à réduire la tension appliquée sur le lubrifiant des paliers à des valeurs qui ne génèrent aucune impulsion de courant parasite de palier à haute fréquence, ou amortissent la valeur des impulsions à un niveau qui n'a aucun impact sur la durée de vie des paliers. Il est nécessaire de prendre différentes mesures pour différents types de courants parasites de paliers à haute fréquence.

Le système de mise à la terre approprié constitue l'élément fondamental de toutes les solutions adaptées à un courant à haute fréquence. Les méthodes normales de mise à la terre d'équipements sont conçues principalement pour assurer une connexion à impédance suffisamment faible afin de protéger les personnes et les équipements contre les anomalies de fréquences de système. Un entraînement à vitesse variable peut être mis à la terre de

manière efficace pour les fréquences élevées de courant en mode commun, lorsque l'installation suit les principes définis à l'Article 9.

8.6.2 Autres mesures de prévention

- Utiliser un (des) palier(s) isolé(s).

NOTE Plusieurs types d'isolation de paliers à épaisseur différente, et dans des emplacements différents (par exemple, entre l'arbre et le chemin de roulement intérieur, entre le chemin de roulement extérieur et la console d'extrémité, entre ladite console et le châssis) sont utilisés dans la pratique. Les paliers à roulements avec revêtement céramique sur la surface extérieure (appelés paliers à revêtement) sont courants. Des paliers à éléments roulants en céramique sont également disponibles.

- Utiliser un filtre qui réduit les tensions en mode commun et/ou le rapport du/dt.
- Utiliser des couplages non conducteurs pour les charges ou autres dispositifs qui peuvent être endommagés par les courants parasites de paliers.
- Utiliser un (des) contact(s) par balais entre l'arbre et le châssis de la machine électrique.
- Utiliser une machine électrique et un convertisseur à basse tension dans toute la mesure du possible.
- Faire fonctionner le convertisseur à la fréquence de commutation la plus basse qui satisfait aux exigences de bruit sonore et de température.
- Éviter d'utiliser des doubles transitions (commutation parallèle).

Le Tableau 5 compare l'efficacité de certaines de ces mesures.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TS 60034-25:2014

Tableau 5 – Efficacité des mesures de prévention applicables aux courants parasites de paliers

Mesure de prévention	Type de courant			Commentaires supplémentaires
	Courants circulants (8.1.2, 8.2.2)	Courants de mise à la terre de l'arbre (8.2.3)	Courants de décharge capacitive (8.2.4)	
1) Côté libre isolé ou éléments roulants en céramique	Efficace	Non efficace: Protège uniquement un seul palier	Non efficace: Protège uniquement un seul palier	Côté libre isolé pour éviter toute nécessité d'un couplage isolé
2) Côté libre et côté entraînement isolés, ou éléments roulants en céramique	Efficace: Un palier isolé est adapté à ce type de courant	Efficace	Efficace: Peut exiger un contact par balai supplémentaire	Efficacité maximale pour les petits châssis Moins pratique pour les grands châssis
3) Côté libre et côté entraînement, ou éléments roulants en céramique + couplage et balai de mise à la terre de l'arbre isolés supplémentaires	Efficace	Efficace	Efficace	Efficacité maximale (notamment pour les machines électriques de plus grande taille). Permet d'empêcher tout dommage possible causé à la charge entraînée. Entretien nécessaire
4) Un contact par balais Aucune isolation des paliers	Non efficace: Protège uniquement un seul palier	Efficace: Ne protège pas les paliers dans la charge entraînée	Efficace: Soin nécessaire pour assurer une impédance des contacts par balais faible	Entretien nécessaire
5) Deux contacts par balais, côté entraînement et côté libre Aucune isolation des paliers	Efficace: Soin nécessaire pour assurer une impédance des contacts par balais faible	Efficace: Ne protège pas les paliers dans la charge entraînée	Efficace: Soin nécessaire pour assurer une impédance des contacts par balais faible	Entretien nécessaire
6) Lubrification et/ou joints des paliers au carbone à faible résistance	Faible	Faible	Efficace: Dépend de l'état des matériaux	Aucune expérience de longue durée. Efficacité de lubrification réduite
7) Rotor placé dans une cage de Faraday	Non efficace	Non efficace	Très efficace	Problèmes dus aux courants circulants générés par convertisseur qui se produisent normalement uniquement avec des machines électriques de plus grande taille
8) Filtre de tension en mode commun	Efficace: Une tension à haute fréquence réduite diminue également les courants à basse fréquence	Efficace	Efficace	Réduction maximale de la tension en mode commun si le filtre est installé à la sortie du convertisseur
9) Couplage isolé	Non efficace	Très efficace	Non efficace	Empêche également tout dommage possible causé à la charge entraînée
10) Connexion entre le châssis et la charge entraînée	Non efficace	Efficace	Non efficace	Empêche également tout dommage possible causé à la charge entraînée

DE: côté entraînement; NDE: côté libre.

8.6.3 Autres facteurs et caractéristiques qui influent sur les courants parasites de paliers

- De grandes dimensions ou une puissance de sortie élevée de la machine électrique ont tendance à augmenter la tension induite de l'arbre.
- La forme de la machine électrique influe également sur la tension induite de l'arbre: une machine de petite taille et volumineuse est généralement mieux adaptée qu'une machine de grande taille et non volumineuse.
- Un nombre de pôles élevé tend à réduire la tension induite de l'arbre.
- Un nombre d'encoches de stator élevé tend à augmenter la tension de l'arbre.
- Un couple de rupture élevé indique une réactance parasite faible et une tension de l'arbre plus élevée.
- Un câble court de machine électrique augmente la tension induite de l'arbre.
- Une vitesse de fonctionnement faible, une température des paliers élevée et une charge des paliers également élevée augmentent le risque de courants parasites de paliers dû à la présence d'un film lubrifiant plus mince.
- Les roulements à rouleaux sont plus exposés à un risque que les paliers à coussinets-douilles, mais ont une plus grande endurance que les roulements à billes du fait d'espaces libres et de capacités plus importants.
- Une entrée active du convertisseur peut augmenter les tensions de paliers de manière considérable selon la configuration de mise à la terre.
- Les machines électriques à bagues alimentées par des convertisseurs de source de tension dans le circuit du rotor exigent une attention toute particulière étant donné que le rapport de la tension de palier (BVR) est bien plus élevé ($BVR \approx 1$) que celui observé dans les machines électriques alimentées par stator.

8.7 Considérations supplémentaires pour les machines électriques alimentées par des convertisseurs de source de tension élevée

8.7.1 Généralités

Toutes les indications portant sur les courants parasites de paliers spécifiées plus haut concernant les machines électriques à basse tension alimentées par des convertisseurs de source de tension sont valables généralement pour les machines électriques et les convertisseurs à haute tension, mais il existe cependant également quelques différences comme l'indiquent les exemples suivants.

- Les machines électriques à haute tension ont habituellement une puissance de sortie élevée (à partir de centaines de kW dans le sens ascendant), et leur châssis est plutôt grand; par conséquent, la règle veut qu'elles comportent généralement un palier isolé.
- Une isolation plus grande des encoches réduit la capacité enroulement-noyau, ce qui réduit également le courant en mode commun de la machine électrique et le risque de courant parasite de palier de type circulant.
- D'autre part, les paliers de la tension en mode commun sont bien plus importants dans le cas des convertisseurs à haute tension, malgré le plus grand nombre de paliers qui accroît le risque de courant circulant.
- L'amplitude de la tension en mode commun est élevée en raison de la haute tension de la barre omnibus à courant continu et, par conséquent, le risque de courants parasites de paliers à décharge capacitive est considérable (le BVR des machines électriques à haute tension est équivalent à celui des machines électriques à basse tension).

8.7.2 Protection des paliers des machines électriques synchrones à aimants permanents, sans balai et à induction à cage

La haute tension du circuit intermédiaire du convertisseur et la dimension de la machine électrique préconisent de protéger les paliers. Utiliser une structure de palier isolée pour les deux paliers ou un palier isolé (côté libre) et un balai de mise à la terre de l'arbre efficace au

niveau du palier côté entraînement, voire un filtre en mode commun efficace à la sortie du convertisseur (voir Tableau 5).

8.7.3 Protection des paliers pour les machines électriques à bagues et pour les machines électriques synchrones avec excitation par balai

Dans la mesure où la machine électrique comporte déjà des bagues et des balais, des balais de mise à la terre de l'arbre efficaces supplémentaires aux deux extrémités protègent les paliers. En variante, une autre méthode applicable issue du Tableau 5 peut être choisie.

Si le convertisseur de source de tension est connecté au circuit du rotor, une tension en mode commun et un BVR élevé sont à prévoir. Par conséquent, il convient d'accorder une attention toute particulière à la protection des paliers dans ces circonstances.

8.8 Protection contre les courants parasites de paliers pour les machines électriques alimentées par des convertisseurs de source de courant à haute tension

L'expérience et des essais pratiques montrent qu'une alimentation par convertisseur à source de courant n'a que peu d'influence sur la tension de l'arbre et, par conséquent, aucune mesure particulière propre à la protection des paliers n'est nécessaire.

Des balais de mise à la terre sont recommandés uniquement pour les machines électriques à bagues alimentées par des convertisseurs de source de courant dans l'arbre du circuit du rotor.

9 Installation

9.1 Mise à la terre, liaison équipotentielle et câblage

9.1.1 Généralités

Les recommandations en 9.1 donnent des lignes directrices générales qui portent uniquement sur le caractère approprié des conducteurs destinés à être utilisés comme connecteurs PE et câbles de machine électrique, ainsi que sur la fiabilité et les questions relatives à l'installation CEM. Pour des installations spécifiques, il convient de suivre les règlements locaux concernant la mise à la terre. Il convient par ailleurs que ces règlements fassent l'objet d'un accord avec l'intégrateur de système. Il convient enfin de respecter les instructions du fournisseur du convertisseur concernant la CEM. Voir l'IEC 61800-3 et l'IEC 61800-5-1 pour plus d'informations sur la CEM et les questions de sécurité propres au PDS. Voir également l'IEC 61000-5-1 et l'IEC 61000-5-2 pour des lignes directrices exhaustives concernant les techniques d'installation CEM générales.

9.1.2 Mise à la terre

9.1.2.1 Objectifs de la mise à la terre

La sécurité et un fonctionnement fiable sans perturbation constituent ces objectifs. La mise à la terre classique repose sur la sécurité électrique. Elle permet d'assurer la sécurité individuelle et limite les dommages aux matériels dus aux défauts électriques. Des méthodes plus strictes sont nécessaires pour un fonctionnement sans perturbation du PDS afin de s'assurer que la mise à la terre est efficace à des fréquences élevées. Ceci peut exiger l'utilisation de plans de masse équipotentiels aux niveaux suivants: sol du bâtiment, enveloppe des équipements et cartes de circuits imprimés.

De plus, une mise à la terre correcte atténue fortement les tensions de l'arbre et du châssis de la machine électrique, réduisant ainsi les courants parasites de paliers à haute fréquence et évitant une défaillance prématurée des paliers et un endommagement possible du matériel auxiliaire (voir Article 8). La configuration de mise à la terre peut également avoir un impact sur les niveaux de contrainte de tension d'isolation phase-terre (voir 7.4).

9.1.2.2 Câbles de mise à la terre

Pour des raisons de sécurité, les câbles de mise à la terre sont dimensionnés au cas par cas conformément aux règlements locaux. Le choix approprié des caractéristiques de câble et des règles de câblage permet également de réduire les niveaux de contraintes électriques appliquées aux différents composants du PDS, et augmente par conséquent sa fiabilité. De plus, il convient que les types de câbles observent les exigences de CEM.

9.1.3 Liaison équipotentielle des machines électriques

Il convient que cette liaison soit réalisée de manière à satisfaire non seulement aux exigences de sécurité, mais également à renforcer les performances de CEM de l'installation. Pour les brides de mise au potentiel, les conducteurs appropriés incluent les lames métalliques, les brides en treillis métallique ou les câbles arrondis. Pour ces systèmes à haute fréquence, des lames métalliques ou de préférence des brides tressées en cuivre sont plus appropriées. L'expérience montre qu'il convient qu'un rapport longueur/largeur dimensionnel type pour ces brides soit inférieur à cinq.

Avec les machines électriques d'une puissance de 100 kW et plus, les conditions de mise à la terre externe des machines entraînées peuvent exiger une connexion de liaison équipotentielle entre le châssis de la machine électrique et les machines entraînées. Les applications typiques prennent la forme de pompes (mises à la terre par des circuits hydrauliques) et de trains d'engrenages avec lubrification centrale (mis à la terre par des conduites d'huile). Cette connexion a pour objet d'égaliser les potentiels et d'améliorer la mise à la terre. Il convient que son inductance soit faible, et de ce fait il convient d'utiliser une lame métallique ou de préférence une bride tressée en cuivre. Il convient par ailleurs que la connexion soit la plus courte possible. Dans certains cas, une liaison équipotentielle supplémentaire des composants de la machine électrique, par exemple entre le châssis et la boîte à bornes, peut être exigée (voir Figure 19).

Lorsqu'un système de lubrification commun est utilisé pour la machine électrique et la charge entraînée, il faut veiller à éviter tout couplage des corps de paliers isolés, par exemple, en utilisant des manchons et des rondelles isolants pour les fixations, de même que des boulons d'ancrage et des sections de tuyau de type isolant à revêtement céramique ou en PVC de forte densité résistant à l'huile.

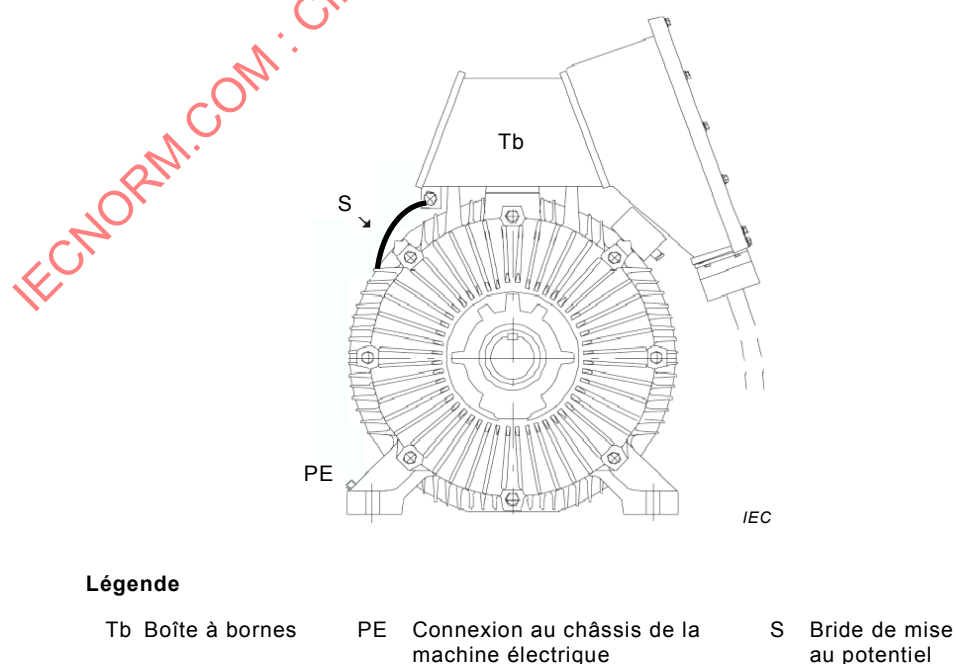


Figure 19 – Bride de mise au potentiel entre la boîte à bornes et le châssis de la machine électrique

9.1.4 Câbles d'alimentation de la machine électrique pour des convertisseurs à fréquence de commutation élevée

9.1.4.1 Configurations recommandées

Pour des niveaux de puissance supérieurs à 30 kW, il peut être avantageux d'utiliser des câbles où les conducteurs d'alimentation et de terre unipolaires sont symétriques, afin de réduire les courants parasites de paliers à haute fréquence et les effets de CEM.

Des câbles multipolaires blindés sont préférentiels pour des alimentations inférieures et une installation facile. Des câbles non symétriques peuvent également être satisfaisants pour des machines électriques d'une puissance jusqu'à 30 kW et pour une section de câble de 10 mm². Leur installation exige toutefois un plus grand soin. Il est courant d'utiliser un blindage métallique dans cette gamme de puissance.

Pour pouvoir fonctionner en tant que conducteur de protection, il convient que la conductance du blindage soit au moins égale à 50 % de la conductance du conducteur de phase. À haute fréquence, il convient que la conductance du blindage soit au moins égale à 10 % de la conductance du conducteur de phase. Un blindage/une armure en cuivre ou en aluminium permet de satisfaire aisément à ces exigences. Un blindage en acier, en raison de sa conductivité inférieure, exige une section plus grande, et il convient que son hélice soit à faible gradient. La galvanisation augmente la conductance à haute fréquence. Lorsque l'impédance du blindage est élevée, la chute de tension le long de ce dernier due à des courants de retour à haute fréquence peut accroître de manière suffisante le potentiel du châssis de la machine électrique par rapport au rotor (mis à la terre) de manière à provoquer l'écoulement de courants parasites de paliers indésirables (voir Article 8). L'efficacité CEM du blindage peut être évaluée par une appréciation de son impédance linéique de transfert dont il convient qu'elle soit faible même à des fréquences élevées.

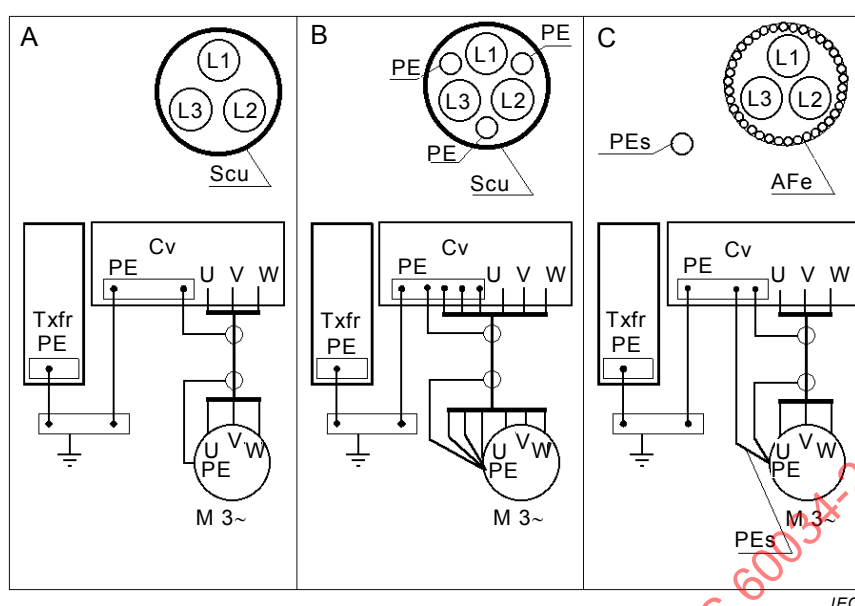
Il convient que les blindages de câble soient mis à la terre à leurs deux extrémités. La liaison équipotentielle de 360° du blindage utilise la capacité à haute fréquence maximale, correspondant à une bonne pratique CEM (voir 9.1.4.3).

Quelques exemples de câbles blindés appropriés:

- câble tripolaire avec blindage de protection concentrique en cuivre ou en aluminium (voir Figure 20 A). Dans ce cas, les conducteurs de phase se situent à égale distance les uns par rapport aux autres et par rapport au blindage, qui est utilisé également comme conducteur de protection;
- câble tripolaire avec trois conducteurs symétriques dédiés à une mise à la terre de protection et un blindage/une armure concentrique (voir Figure 20 B). Le blindage de ce type de câble est destiné à la CEM et à une protection physique uniquement;

NOTE Pour les systèmes à faible puissance, un conducteur simple dédié à une mise à la terre de protection pourrait être satisfaisant.

- câble tripolaire avec armure/blindage toronné petit pas à revêtement en acier ou en fer galvanisé (voir Figure 20 C). Lorsque la section du blindage est insuffisante pour que celui-ci soit utilisé comme conducteur de protection, un conducteur de mise à la terre séparé est nécessaire.



Scu Écran concentrique en
cuivre (ou aluminium)

AFe Armure en
acier

Txfr Transformateur

Cv
Convertisseur

PEs
Conducteur de
terre séparé

Figure 20 – Exemples de câbles et de connexions de machines électriques blindées

Dans tous les cas, il convient que la longueur des parties du câble à connecter à la jonction du convertisseur de fréquences et à la boîte à bornes de la machine électrique, et pour lesquelles le blindage est à retirer, soit la plus courte possible.

Généralement, des longueurs de câbles blindés jusqu'à 100 m environ peuvent être utilisées sans recourir à des mesures supplémentaires. Pour des câbles plus longs, des mesures particulières, telles que l'utilisation de filtres de sortie, peuvent être exigées. Lorsqu'un filtre est utilisé, les recommandations ci-dessus s'appliquent au câble de la sortie du convertisseur au filtre. Lorsque le filtre est efficace en termes de CEM, il n'est pas nécessaire que le câble qui relie le filtre à la machine électrique soit blindé ou symétrique, mais la machine électrique peut toutefois exiger une mise à la terre supplémentaire.

Les câbles non blindés unipolaires peuvent être adaptés aux machines électriques pour des puissances plus élevées, s'ils sont installés à proximité les uns des autres sur un pont suspendu à câbles qui est relié au système de mise à la terre au moins aux deux extrémités du parcours de câble. Noter que les champs magnétiques de ces câbles peuvent induire des courants dans les pièces de ferronnerie voisines, entraînant des pertes thermiques et autres pertes accrues.

9.1.4.2 Câblage symétrique parallèle

Lors du câblage d'un convertisseur et d'une machine électrique à grande puissance, les exigences relatives à un courant élevé peuvent rendre nécessaire l'utilisation de plusieurs éléments conducteurs en parallèle. Dans ce cas, il convient d'effectuer le câblage approprié pour une installation (symétrique) aisée selon la Figure 21.

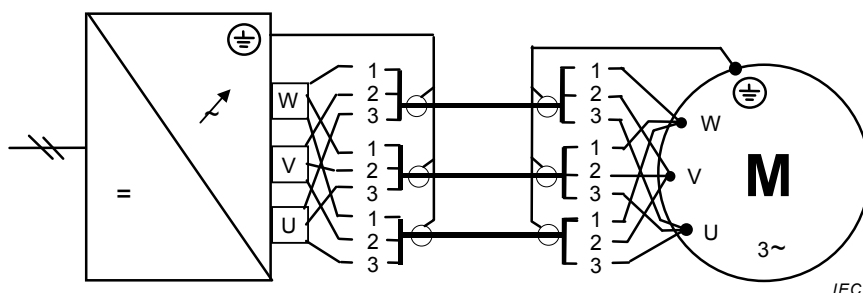
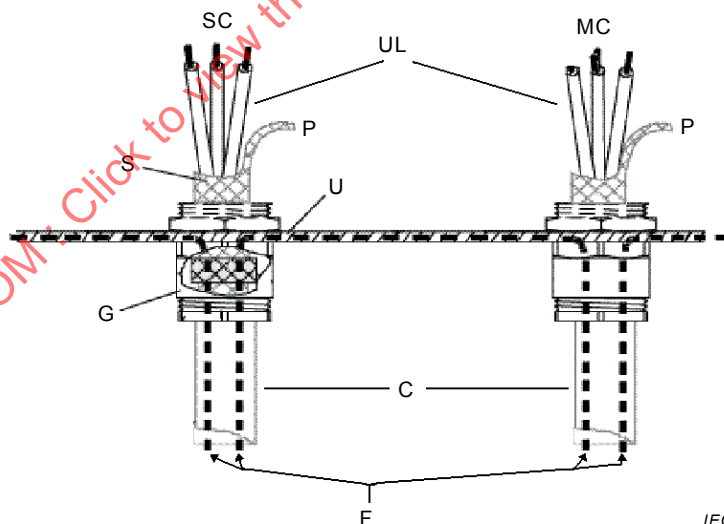


Figure 21 – Câblage symétrique parallèle de convertisseur et machine électrique à grande puissance

9.1.4.3 Extrémités de câbles

Lors de l'installation du câble de la machine électrique, il convient de s'assurer que le blindage est connecté en haute fréquence tant au convertisseur qu'à l'enveloppe de la machine électrique. Cela exige que la boîte à bornes de la machine électrique soit composée d'un matériau électriquement conducteur tel que l'aluminium, le fer, etc. qui fait l'objet d'une connexion électrique à haute fréquence avec l'enveloppe. Il convient que les connexions de blindage soient réalisées avec des extrémités sous un angle de 360°, ce qui génère une impédance faible sur une large gamme de fréquences comprise entre une fréquence continue et une fréquence de 70 MHz. Ceci réduit de manière efficace les tensions de l'arbre et du châssis, et améliore les performances de CEM de manière tout aussi efficace.

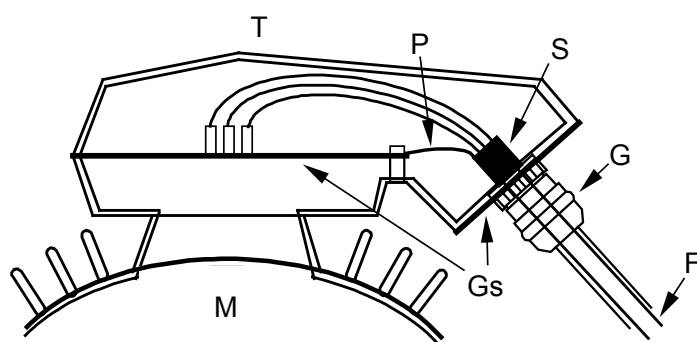
Des exemples de bonne pratique pour les extrémités du convertisseur et de la machine électrique avec une puissance inférieure sont présentés à la Figure 22 et à la Figure 23 respectivement.



Légende

SC	Câble d'alimentation	MC	Câble de machine électrique	UL	Longueur non blindée (la plus courte possible)
S	Blindage de câble	P	"Fibre amorce" (la plus courte possible)	U	Plaque passe-câble non peinte
G	Presse-étoupe CEM	C	Câbles (enveloppe extérieure)	F	Cage de Faraday continue

Figure 22 – Connexions du convertisseur avec presse-étoupe à haute fréquence sous un angle de 360° présentant la cage de Faraday



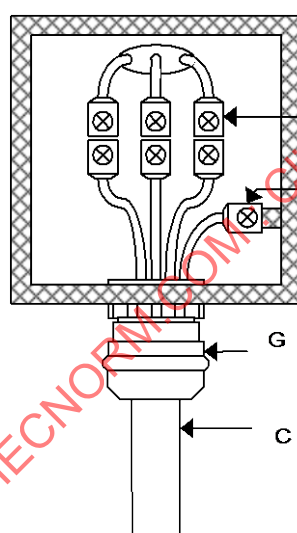
IEC

Légende

T	Boîte à bornes (conductrice)	S	Blindage de câble	P	Fibre amorce (la plus courte possible)	M	Châssis de la machine électrique
Gs	Joints d'étanchéité conducteurs	G	Presse-étoupe CEM	F	Cage de Faraday continue		

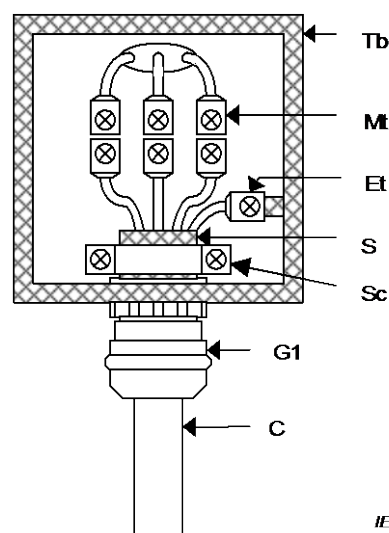
Figure 23 – Connecteur d'extrémité de la machine électrique avec une connexion sous un angle de 360°

Il convient de réaliser les connexions de blindage au niveau de la boîte à bornes de la machine électrique au moyen d'un presse-étoupe CEM comme présenté à la Figure 24a ou d'une pince de blindage comme présentée à la Figure 24b. Des connexions similaires sont exigées au niveau de l'enveloppe du convertisseur.



IEC

a) Connexion par presse-étoupe



IEC

b) Connexion par pince

Légende

Tb	Boîte à bornes de la machine	Mt	Bornes de la machine	Et	Borne de mise à la terre	S	Écran de câble
Sc	Pince écran	G	Presse-étoupe CEM	G1	Presse-étoupe non CEM	C	Câble

Figure 24 – Connexion du blindage de câble

9.1.4.4 Câblage et mise à la terre des dispositifs auxiliaires

Il convient que les dispositifs auxiliaires, tels que les compte-tours, soient isolés électriquement de la machine afin d'éviter la formation de trajets de courant internes, produisant des relevés erronés ou entraînant un dommage potentiel. Un couplage à isolation électrique constitue une solution possible pour un codeur de couplage. L'isolation peut être réalisée pour un compte-tours de type à arbre creux, en procédant à l'isolation des joints sphériques ou de la barre du bras d'enclenchement. Il convient que le blindage du câble du compte-tours soit isolé du châssis du compte-tours. L'autre extrémité du blindage est mise à la terre au niveau du convertisseur.

Les compte-tours à arbre creux avec une isolation électrique entre l'arbre creux et le châssis du compte-tours permettent de connecter le blindage du câble audit châssis.

Il est préférable d'utiliser un câble à double blindage pour un codeur d'impulsions. Pour réduire au minimum les problèmes de perturbations à haute fréquence, il convient que le blindage soit mis à la terre au niveau de l'extrémité du codeur via un condensateur. Un câble blindé simple peut être utilisé avec un compte-tours analogique.

Afin d'éviter tout couplage indésirable, il convient que le cheminement du câblage des dispositifs auxiliaires soit séparé de celui des câbles d'alimentation.

9.1.4.5 Câblage des capteurs intégrés

Généralement, les recommandations propres aux compte-tours analogiques données en 9.1.4.4 s'appliquent aux capteurs intégrés (par exemple, thermocouples). Cependant, dans la mesure où le cheminement du câblage des capteurs intégrés est habituellement très proche du câblage d'alimentation interne à la machine électrique, il est nécessaire que l'isolation de ce câblage soit adaptée aux tensions plus élevées observées. Dans ces cas, l'utilisation d'un câble blindé peut ne pas être toujours possible.

9.2 Bobines de réactance et filtres

9.2.1 Généralités

Dans certaines installations, par exemple afin de réduire la contrainte de tension ou d'améliorer les performances de CEM, il peut être avantageux d'utiliser des bobines de réactance ou des filtres de sortie. Toutefois, les caractéristiques de fonctionnement de la machine électrique peuvent être altérées du fait de la chute de tension dans ces composants.

9.2.2 Bobines de réactance de sortie

Il s'agit de bobines de réactance de conception particulière qui peuvent s'adapter à la forme d'onde MLI et qui sont utilisées afin de réduire le rapport du/dt et la tension de crête. Un soin particulier est cependant nécessaire étant donné que les bobines de réactance, en théorie, peuvent prolonger la durée de dépassement lorsqu'elles ne sont pas choisies de façon appropriée – un soin particulier est nécessaire avec les bobines d'inductance à tore magnétique. Dans le cas présenté à la Figure 25a, l'ajout de la bobine de réactance a porté le temps de montée à environ 5 μs et réduit la tension de crête à 792 V. La bobine de réactance de sortie est normalement montée dans le boîtier du convertisseur. Les bobines de réactance de sortie peuvent également être utilisées pour compenser les courants de charge des câbles et peuvent être employées pour des longueurs de câble de machine électrique de plusieurs centaines de mètres avec des entraînements de plus grande taille.

9.2.3 Filtre de limitation de la tension (filtre du/dt)

Dans ce cas, un filtre composé de condensateurs, de bobines d'inductance et de diodes ou de résistances peut être utilisé pour limiter le rapport du/dt , réduisant la tension de crête et augmentant le temps de montée de manière considérable. Dans l'exemple présenté à la Figure 25b, la tension de crête est réduite à 684 V avec un rapport du/dt de 40 V/ μs . Il

convient que le filtre soit adapté à certaines pertes accrues de l'ordre de 0,5 % – 1,0 %, et le couple de détachement et de rupture peut être réduit.

9.2.4 Filtre sinusoïdal

Des filtres passe-bas de conception particulière permettent de détourner les courants à haute fréquence et la forme d'onde de tension résultante observée sur la sortie vers la machine électrique devient sinusoïdale. La tension de sortie entre phases (différentielle) pendant environ 1,5 période de la fréquence de repère d'angle est présentée à la Figure 25c. Généralement, il existe les deux types suivants de filtres sinusoïdaux.

- a) Modèle de filtre avec filtrage phase-terre et filtrage entre phases.
- b) Modèle avec filtrage entre phases uniquement.

Ces filtres sont coûteux et comportent également d'autres limites. Ils empêchent la tension de la machine électrique de dépasser 90 % de la tension d'alimentation (déclassant ainsi le convertisseur). Ils ne conviennent pas également aux applications qui exigent des performances dynamiques élevées.

9.2.5 Bloc terminal de la machine électrique

Un bloc terminal peut être relié aux bornes de la machine électrique. Il a pour objet d'adapter l'impédance de la machine électrique à celle du câble, empêchant ainsi les réflexions en tension au niveau de la machine électrique. Pour l'exemple illustré à la Figure 25d, la tension de crête est à présent de 800 V uniquement avec un temps de montée de 2 μ s. Ces filtres apportent généralement environ 0,5 % à 1,0 % de pertes supplémentaires.

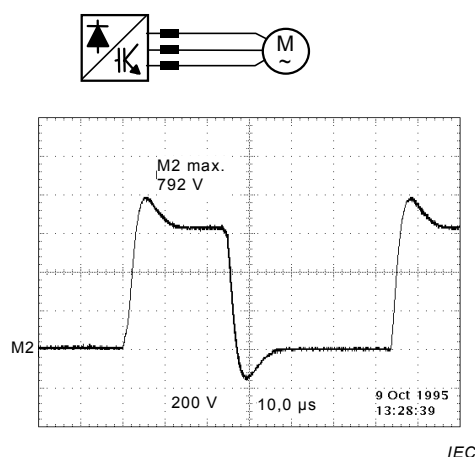


Figure 25a – Bobine de réactance de sortie
(chute de tension de 3 %)

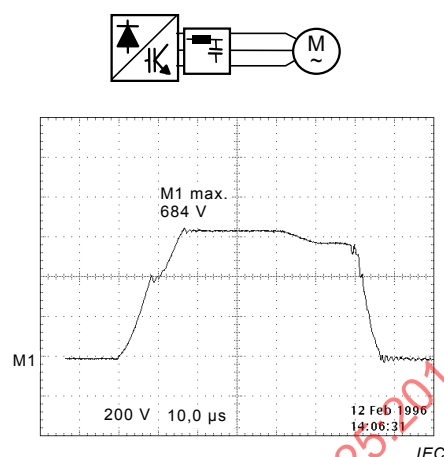


Figure 25b – Filtre du d/dt de sortie

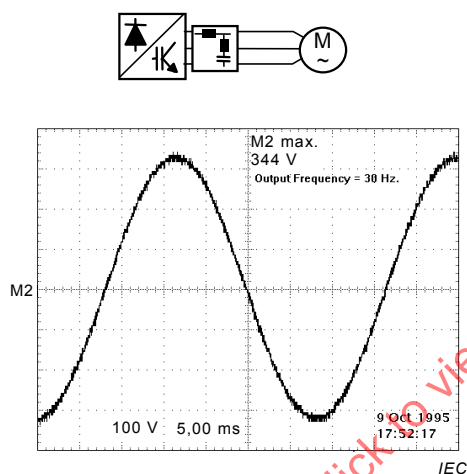


Figure 25c – Filtre sinusoïdal

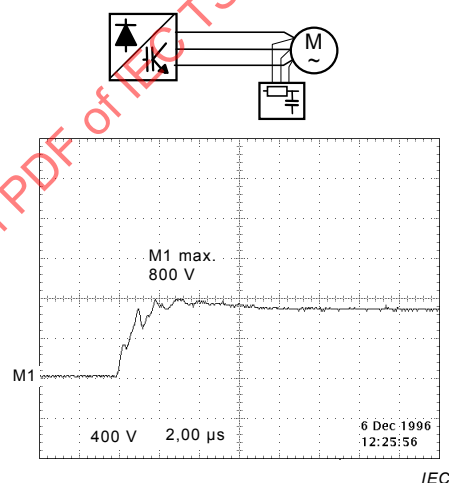


Figure 25d – Bloc terminal de la machine électrique

Figure 25 – Caractéristiques des mesures préventives

9.3 Correction du facteur de puissance

Il convient que la correction du facteur de puissance à l'entrée du convertisseur ne soit jamais entreprise sans analyse harmonique.

Il n'est pas recommandé d'utiliser des condensateurs de puissance en vue de la correction du facteur de puissance du côté de la charge d'une commande électronique connectée à une machine électrique à induction; la commande peut être endommagée et les condensateurs de compensation ne sont généralement pas calibrés pour les hautes fréquences auxquelles ils sont soumis.

Une correction du facteur de puissance à l'entrée d'un convertisseur de source de tension peut être obtenue à l'aide d'un convertisseur avec une entrée active.

Voir IEC TS 62578.

9.4 Machines électriques intégrées (machine électrique et modules d'entraînement intégrés)

Lorsqu'un convertisseur est monté à l'intérieur de l'enveloppe d'une machine électrique, c'est-à-dire dans sa boîte à bornes ou dans un compartiment séparé formant partie intégrante de l'enveloppe globale de la machine électrique, où le convertisseur et la machine utilisent tous deux un système de refroidissement commun, on appelle cet ensemble machine électrique intégrée.

Les avantages pour l'utilisateur sont indéniables:

- facilité d'installation et de mise en service (habituellement pas de câbles particuliers, ni de liaison équipotentielle ou de mise à la terre supplémentaire);
- l'enveloppe intégrée commune permet de satisfaire aux exigences de CEM (cage de Faraday). La machine intégrée réduit le risque de courant de mise à la terre de l'arbre;
- des câbles ou des conducteurs de faible longueur entre le convertisseur et la machine électrique maintiennent des réflexions en tension et une tension de crête peu élevées et prévisibles, tout en ne réduisant cependant pas le rapport dv/dt ;
- une solution compacte, ce qui signifie la réalisation d'économies en termes d'espace total requis et d'installation;
- un fournisseur unique pour la machine électrique et le convertisseur, c'est-à-dire une responsabilité clairement établie concernant le PDS.

La machine intégrée présente cependant également quelques inconvénients:

- selon l'application, l'environnement peut être très hostile à l'électronique du convertisseur (protection extrême de l'enveloppe exigée et cartes de circuits imprimés et composants résistant aux chocs et à la chaleur/au froid);
- la durée de vie technique des principaux composants peut être très différente (de 15 ans à 20 ans environ pour les machines électriques, mais de 5 ans à 10 ans seulement pour les convertisseurs).

10 Considérations supplémentaires pour les machines électriques synchrones à aimants permanents (PM) alimentées par des convertisseurs de source de tension

10.1 Caractéristiques de système

Avantages d'un PDS composé d'un convertisseur de source de tension et d'une machine électrique synchrone à aimants permanents en lieu et place d'une machine électrique à induction:

- puissance assignée VA inférieure du convertisseur, dans la mesure où la puissance d'une machine électrique synchrone peut être assignée pour le facteur de puissance unité;
- les pertes observées dans la machine électrique peuvent être moins élevées. Pour un examen du rendement du système, il faut tenir compte des pertes dans le convertisseur;
- taille de la machine réduite, par comparaison avec une machine électrique à induction ayant les mêmes caractéristiques assignées;
- dans une machine électrique de conception appropriée, les pertes dans le rotor sont minimales et n'ont par conséquent aucun impact sur le comportement thermique de ce dernier;
- dispositifs de refroidissement plus simples de la machine électrique en raison de pertes dans le rotor minimales.

D'autre part, un fonctionnement dans la plage d'affaiblissement du champ exige des mesures particulières, dans la mesure où il est nécessaire que le courant du stator réduise le champ

des aimants permanents, ce qui pourrait exiger par ailleurs une réduction de la puissance de sortie disponible.

10.2 Pertes et leurs effets

Les indications de l'Article 5 restent valables.

Étant donné que les machines électriques synchrones à aimants permanents ne comportent habituellement pas d'enroulement de l'amortisseur, les courants harmoniques peuvent, selon la conception du rotor, produire des courants de Foucault dans les aimants permanents ou dans les parties pleines du rotor (ou les deux à la fois). L'échauffement des aimants dû à des pertes dans le stator accrues et les courants de Foucault présents dans ces mêmes aimants peuvent entraîner une démagnétisation permanente.

10.3 Bruit, vibrations et vibrations de torsion

Les indications de l'Article 6 restent valables.

10.4 Contraintes électriques d'isolation des machines électriques

Les indications de l'Article 7 restent valables.

Lorsque la machine électrique fonctionne en mode de régénération, il convient de veiller à ce que la force électromotrice (f.é.m.) ne dépasse pas les capacités de l'installation. Il convient que ceci fasse partie intégrante de l'analyse des risques de l'installation dans des conditions de défaut particulières, par exemple, perte de contrôle lors d'un affaiblissement du champ profond, ou court-circuit du câblage, etc.

10.5 Courants parasites de paliers

Les indications de l'Article 8 restent valables.

NOTE Le dispositif de rétroaction peut également comporter un palier supplémentaire.

10.6 Aspects particuliers des aimants permanents

La démagnétisation des aimants permanents au cours du fonctionnement de la machine électrique se produit habituellement à cause de courants de crête de démagnétisation anormalement élevés générés par exemple par des conditions de défaut ou la perte de contrôle du moteur. L'échauffement des aimants permanents peut accroître ce risque, rendant possible la démagnétisation à des valeurs de courant inférieures.

11 Considérations supplémentaires pour les machines électriques à induction à cage alimentées par des convertisseurs de source de tension élevée

11.1 Généralités

Généralement, les indications données eu égard aux machines électriques à basse tension alimentées par des convertisseurs de source de tension sont valables pour les machines électriques et les convertisseurs de moyenne ou haute tension. Certaines différences existent toutefois.

11.2 Caractéristiques de système

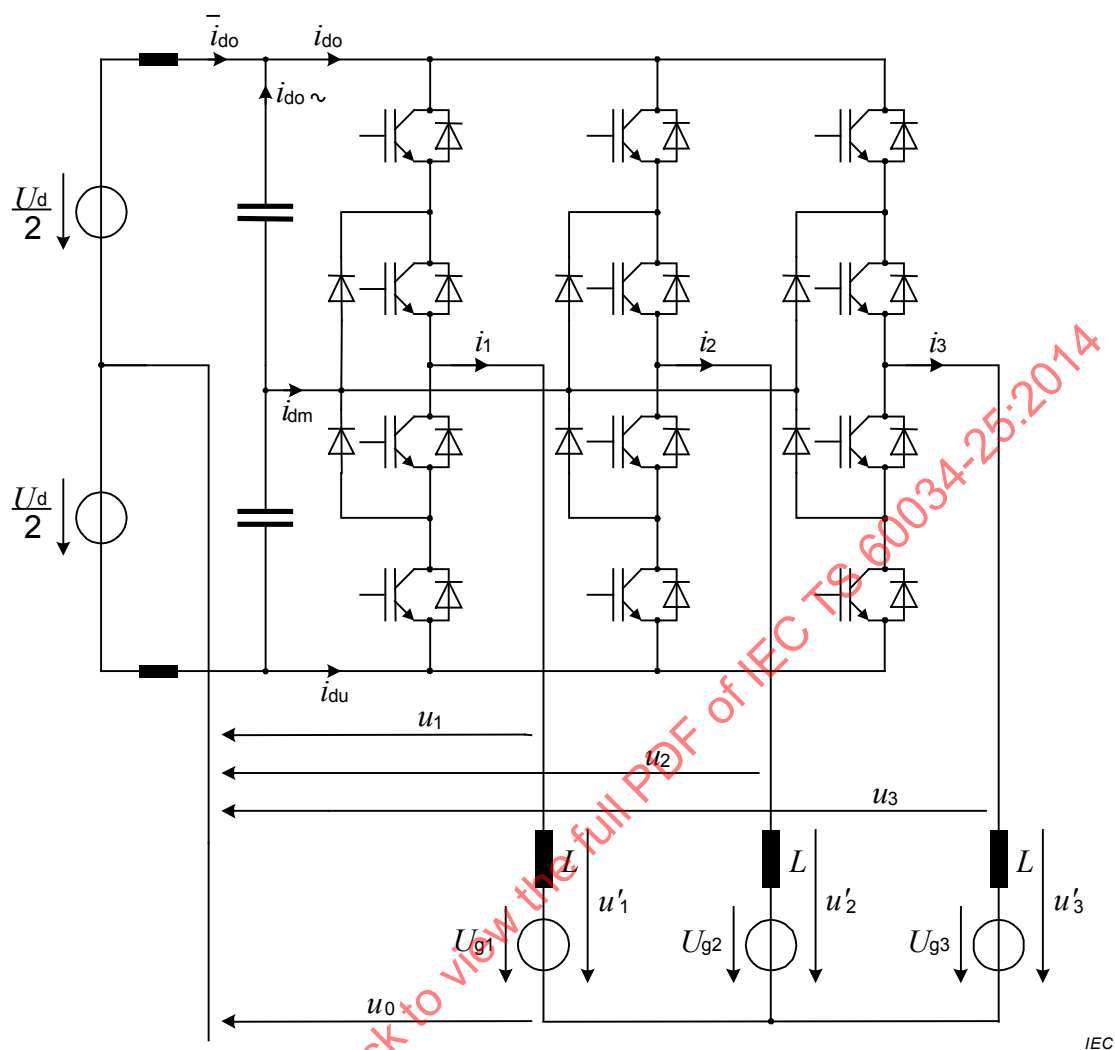


Figure 26 – Représentation schématique d'un convertisseur à trois niveaux type

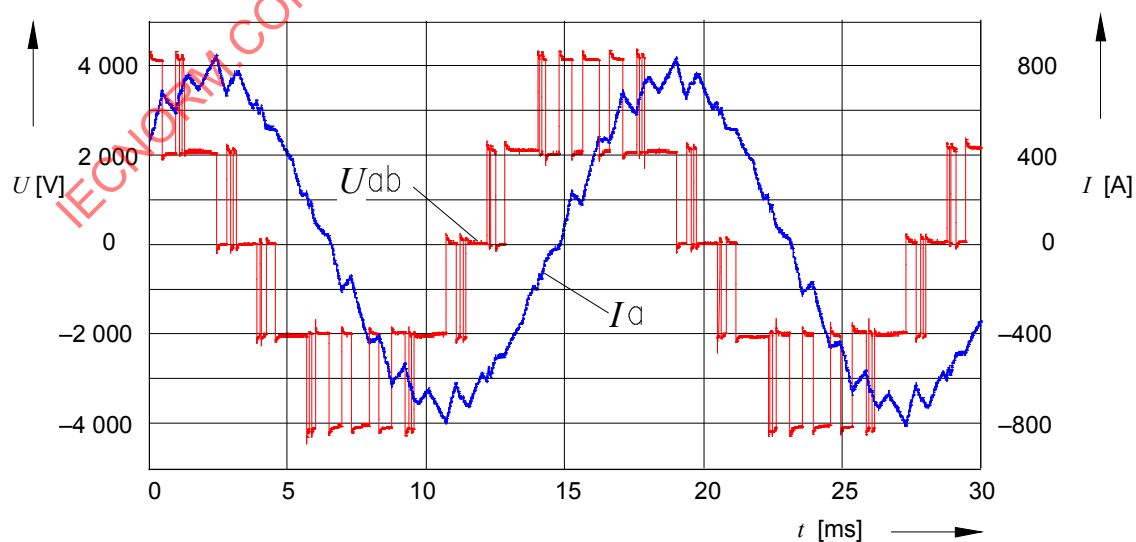


Figure 27 – Tension et courant de sortie d'un convertisseur à trois niveaux type