

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



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

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



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2020 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
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 corrigendum or an amendment might have been published.

IEC publications search - webstore.iec.ch/advsearchform

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 It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.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 once a month by email.

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: sales@iec.ch.

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary on electrotechnology, containing more than 22 000 terminological entries in English and French, with equivalent terms in 16 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

IEC Glossary - std.iec.ch/glossary

67 000 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.

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.

Recherche de publications IEC -

webstore.iec.ch/advsearchform

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 une fois par mois par email.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

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

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire d'électrotechnologie en ligne au monde, avec plus de 22 000 articles terminologiques en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 16 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

Glossaire IEC - std.iec.ch/glossary

67 000 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.

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



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

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

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 29.160.01

ISBN 978-2-8322-7842-0

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

CONTENTS

FOREWORD.....	4
INTRODUCTION.....	6
1 Scope.....	8
2 Normative references	8
3 Terms and definitions	8
4 Symbols and abbreviated terms.....	9
5 Basic requirements.....	10
5.1 Instrumentation.....	10
5.1.1 General	10
5.1.2 Power analyser and transducers.....	10
5.1.3 Mechanical output of the motor.....	11
5.2 Converter set-up.....	11
5.2.1 General	11
5.2.2 Comparable converter set-up for rated voltages up to 1 kV.....	11
5.2.3 Testing with converters with rated voltages above 1 kV.....	12
5.2.4 Testing with other converters.....	12
6 Test method for the determination of the efficiency of converter-fed motors.....	12
6.1 Selection of determination method	12
6.2 Method 2-3-A – Direct measurement of input and output.....	13
6.2.1 Test set-up	13
6.2.2 Test procedure	13
6.2.3 Efficiency determination.....	13
6.2.4 Measurement at seven standardized operating points.....	14
6.3 Method 2-3-B – Summation of losses with determination of additional high frequency loss at converter supply at no-load operation.....	14
6.3.1 General	14
6.3.2 Test set-up	14
6.3.3 Test procedure	14
6.3.4 Efficiency determination.....	15
6.4 2-3-C – Alternate Efficiency Determination Method (AEDM).....	15
6.5 2-3-D – Determination of efficiency by calculation.....	15
7 Interpolation of losses at any operating point.....	16
7.1 General.....	16
7.2 Interpolation procedure	16
7.3 Analytical determination of relative losses at any operating point.....	16
7.4 Additional losses due to frequency converter voltage drop.....	18
7.5 Alternate operating points to determine interpolation coefficients	18
7.6 Optional determination of interpolation error	19
Annex A (informative) Losses of AC motors	21
A.1 General.....	21
A.2 Stator and rotor winding I^2R losses P_{LSR} ($P_{LS} + P_{LR}$).....	21
A.3 Iron losses (P_{Lfe}).....	21
A.4 Additional load losses (P_{LL})	22
A.5 Friction and windage losses (P_{Lfw}).....	22
A.6 Additional high frequency losses (P_{LHL})	23

Annex B (informative) Exemplary determination of losses and efficiency at various load points.....	24
B.1 General.....	24
B.2 Determination of the interpolation coefficients.....	24
B.3 Calculation of losses and efficiency for certain operating points.....	25
Bibliography.....	27
Figure 1 – Standardized operating points.....	17
Table 1 – Preferred test methods.....	12
Table 2 – Other test methods.....	13
Table 3 – Normative operating points.....	17
Table 4 – Non-normative alternate operating points.....	19
Table A.1 – Recommended split of windage and friction losses for IC 411 self-ventilated motors.....	22
Table B.1 – Name plate data.....	24
Table B.2 – Reference values.....	24
Table B.3 – Losses for the 7 operating points.....	25
Table B.4 – Interpolation coefficients.....	25
Table B.5 – User-defined operating points.....	26
Table B.6 – Calculated losses for the user-defined operating points.....	26

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60034-2-3:2020

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

ROTATING ELECTRICAL MACHINES –

Part 2-3: Specific test methods for determining losses and efficiency of converter-fed AC motors

FOREWORD

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

International Standard IEC 60034-2-3 has been prepared by IEC technical committee 2: Rotating machinery.

This first edition cancels and replaces IEC TS 60034-2-3, published in 2013.

The text of this International Standard is based on the following documents:

FDIS	Report on voting
2/1974/FDIS	2/1982/RVD

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

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

A list of all parts in the IEC 60034 series, published under the general title *Rotating electrical machines*, can be found on the IEC website.

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

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

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60034-2-3:2020

INTRODUCTION

The objective of this document is to define test methods for determining total losses including additional high frequency motor losses and efficiency of converter-fed motors. Additional high frequency losses appear in addition to the losses on nominally sinusoidal power supply as determined by the methods of IEC 60034-2-1:2014. Results determined according to this document are intended to allow comparison of losses and efficiency of different motors when fed by converters.

Furthermore, the document gives seven standardized operating points to characterize the development of losses and efficiency across the whole torque/speed range. An interpolation procedure is provided to calculate losses and efficiency at any operating point (torque, speed).

In power-drive systems (PDS), the motor and the frequency converter are often manufactured by different suppliers. Motors of the same design are produced in large quantities. They may be operated from the grid or from frequency converters of many different types, supplied by many different manufacturers. The individual converter properties (switching frequency, DC link voltage level, etc.) will also influence the system efficiency. As it is impractical to determine motor losses for every combination of motor, frequency converter, connection cable, output filter and parameter settings, this document describes a limited number of approaches, depending on the voltage level and the rating of the machine under test.

The losses determined according to this document are not intended to represent the losses in the final application. They provide, however, an objective basis for comparing different motor designs with respect to suitability for converter operation.

In general, when fed from a converter, motor losses are higher than during operation on a nominally sinusoidal system. The additional high frequency losses depend on the harmonic spectrum of the impressed converter output quantity (either current or voltage) which is influenced by its circuitry and control method. For further information, see IEC TS 60034-25:2014.

It is not the purpose of this document to define test procedures either for power drive systems or for frequency converters alone.

Comparable converter

Latest experience and theoretical analysis have shown that the additional high frequency motor losses generally do not increase much with load. The methods in this document are mainly based on supplies from converters with pulse width modulation (PWM).

With respect to these types of converters and the growing need for verification of compliance with national energy efficiency regulations, this document defines a so-called comparable converter for testing of low voltage motors.

In principle, the comparable converter is a voltage source with a typical high frequency harmonic content supplying the machine under test. It is not applicable to medium voltage motors.

Limitations for the application of the comparable converter

It has to be noted that the test method with the comparable converter described herein is a standardized method intended to give comparable efficiency figures for standardized test conditions. A motor ranking with respect to suitability for converter operation may be derived, but it is not equivalent to determining of the actual motor losses for operation with a specific converter which requires a test of the whole power drive system (PDS) with the specific converter used in the final application.

Deviations are also expected for motors driven by multi-level voltage source or current source converters where the additional high frequency motor losses differ much more depending on speed and load than for two-level voltage source converters. Hence the determination of losses and efficiency should preferably use procedures where the motor is operated together with the same converter with which it is driven in service.

Another option is the determination of the additional high frequency motor losses by calculation. If this is requested by the customer, the pulse pattern of the converter is required. Such procedures are not part of this document.

The provided interpolation procedure for the determination of losses and efficiency at any operating point (torque, speed) is limited to the base speed range (constant torque range, constant flux range).

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60034-2-3:2020

ROTATING ELECTRICAL MACHINES –

Part 2-3: Specific test methods for determining losses and efficiency of converter-fed AC motors

1 Scope

This part of IEC 60034 specifies test methods and an interpolation procedure for determining losses and efficiencies of converter-fed motors within the scope of IEC 60034-1:2017. The motor is then part of a variable frequency power drive system (PDS) as defined in IEC 61800-9-2:2017.

Applying the approach of the comparable converter, the motor efficiency determined by use of this document is applicable for comparison of different motor designs only.

The document also specifies procedures to determine motor losses at any load point (torque, speed) within the base speed range (constant torque range, constant flux range) based on determination of losses at seven standardized load points. This procedure is applicable to any variable speed AC motor (induction and synchronous) rated according to IEC 60034-1:2017 for operation on a variable frequency and variable voltage power supply.

2 Normative references

The following documents are referred to in the text in such a way that some or all of their content constitutes requirements of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60034-1:2017, *Rotating electrical machines – Part 1: Rating and performance*

IEC 60034-2-1:2014, *Rotating electrical machines – Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles)*

IEC 61000-2-4:2002, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-4: Environment – Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances*

IEC 61800-9-2:2017, *Adjustable speed electrical power drive systems – Part 9-2: Ecodesign for power drive systems, motor starters, power electronics and their driven applications – Energy efficiency indicators for power drive systems and motor starters*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC 60034-1:2017, IEC 60034-2-1:2014 as well as the following apply.

ISO and IEC maintain terminological databases for use in standardization at the following addresses:

- IEC Electropedia: available at <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: available at <http://www.iso.org/obp>

3.1**motor losses with converter supply**

when powered by a converter, motor losses are a combination of losses caused by fundamental frequency and losses caused by the converter high frequencies

3.2**fundamental losses**

fundamental losses in the motor can be segregated into five different components: iron losses (varying with motor frequency and applied fundamental voltage), friction and windage losses (varying with motor speed), rotor winding losses, stator winding losses and additional load losses (all three varying with motor current). Fundamental losses are the losses of a motor running with application of rated voltage at fundamental frequency that does not contain any further high frequencies.

3.3**additional high frequency losses**

additional high frequency losses are produced in the motor by the non-sinusoidal voltage and current waveforms generated by the converter and are in addition to the losses of iron, friction and windage, rotor winding, stator winding and additional load loss (fundamental losses)

3.4**base speed range**

speed range from standstill up to the highest speed where the motor can be supplied with a voltage that changes in proportion to the speed so that the magnetic flux remains constant (constant ratio U/f) for induction machines and according to the MTPA (maximum torque per ampere) for synchronous machines. Within the base speed range, the maximum motor torque is constant (constant torque range), if constant flux control is used.

3.5**switching frequency**

number of switching events of one semiconductor within one second. It determines, together with the selected pulse pattern and the converter topology, the lowest frequency of non-controllable high frequencies or inter-harmonics at the IPC (in-plant point of coupling) or the motor

Note 1 to entry: For a two level converter, the pulse frequency measured phase to phase is two times the switching frequency defined in 3.5 in case of continuous modulation and about 1,33 times the switching frequency defined in 3.5 in case of discontinuous modulation. A switching event is once on and once off of one semiconductor.

4 Symbols and abbreviated terms

f	Frequency, Hz
f_{Mot}	Fundamental motor frequency, Hz
f_{N}	Rated motor frequency, Hz
f_{sw}	Switching frequency, Hz
I_0	No-load current, A
I_{N}	Rated current, A
MTPA	Maximum torque per ampere control applied to synchronous motors
n	Speed, min^{-1}
n_{N}	Rated speed, min^{-1}
n_{ref}	Reference speed, min^{-1}
P	Power, W
P_{Ccon}	Constant losses at converter supply, W

P_{Csin}	Constant losses at sinusoidal supply according to IEC 60034-2-1:2014, W
PDS	Power drive system
P_{LHL}	Additional high frequency loss due to converter supply, W
P_{N}	Rated power, W
P_{ref}	Reference power, W
$P_{1\text{C}}$	Motor input power at converter supply, W
$P_{1_60034-2-1}$	Motor input power as tested according to IEC 60034-2-1:2014, W
$P_{2\text{C}}$	Motor output power at converter supply, W
$P_{2_60034-2-1}$	Motor output power as tested according to IEC 60034-2-1:2014, W
PWM	Pulse width modulation
T	Machine torque, Nm
T_{C}	Machine torque at converter supply, Nm
T_{N}	Rated torque, Nm
T_{ref}	Reference torque, Nm
U_{N}	Rated motor voltage, V
η	Efficiency

5 Basic requirements

5.1 Instrumentation

5.1.1 General

Unless otherwise stated in this document, the arithmetic average of the three line currents and voltages shall be used.

When testing electric machines under load, slow fluctuations in the output power and other measured quantities may be unavoidable. Therefore for each load point many readings shall be taken automatically by a suitable digital meter over a period of at least 15 s but not more than 60 s and this average shall be used for the determination of efficiency.

Considering the high frequencies involved in converters feeding AC motors and their contribution to the motor losses, the measuring equipment has to be selected according to the range of relevant frequencies with sufficient accuracy.

For temperature measurements, a thermosensor installed in the hot spot may be optionally used, as described in IEC 60034-2-1:2014.

5.1.2 Power analyser and transducers

The instrumentation for measuring power and current at the motor's input shall basically meet the requirements of IEC 60034-2-1:2014, but due to higher frequency components the following additional requirements shall also apply.

The specified uncertainty of the power meters shall be 0,2 % of the rated apparent power of the motor or better for the total active power at 50 Hz or 60 Hz. This is the total uncertainty of the power meter including possible sensors.

NOTE 1 For example, when a three-phase motor has a rated voltage of 400 V and a rated current of 10 A then the power meter's active power uncertainty is at least 0,2 % of $\sqrt{3}$ times 4 000 VA, which is 13,9 W or better.

The bandwidth of power meters and sensors shall be sufficiently wide that the error in the measurement of total active power for the entire frequency range (beyond 50 Hz and 60 Hz) is less than or equal to 0,3 % of the apparent power.

NOTE 2 In general, a bandwidth from 0 Hz up to 10 times of switching frequency is sufficient.

It is preferred to feed current and voltage directly into the power analyser. If an external current transducer is required, no conventional current transformers shall be used. Instead, wide bandwidth shunts or zero-flux transducers shall be used.

Fundamental voltage shall be measured at the motor terminals using a digital power analyser equipped with suitable software (FFT, Fast Fourier Transformation).

Internal line filters in digital power meters shall be turned off. Synchronization filters (also known as zero-cross filters) that are not in the signal path may be used.

For power measurement, the three-wattmeter method is preferred. All cables used to transmit measurement signals shall be shielded. It has to be noted, that the cable shield is not routed through the current transducers.

5.1.3 Mechanical output of the motor

The instrumentation used to measure supply frequency shall have an accuracy of $\pm 0,1$ % of full scale. The speed measurement should be accurate within 0,1 revolution per minute for speeds up to $3\,000\text{ min}^{-1}$ and 0,03 % above.

The instrumentation used to measure the torque shall have a minimum class of 0,2 when the rated efficiency is expected to be below 92 %, 0,1 below 95 % and 0,05 or better for higher efficiencies. The minimum torque measured shall be at least 10 % of the torque measurement device's rated torque. If a better class instrument is used, the allowed torque range can be extended accordingly.

5.2 Converter set-up

5.2.1 General

For all tests using the comparable converter, it should be parameterized according to the requirements of this document or, if a unique combination of converter and motor is to be tested, the converter should be parameterized according to the specific application requirements. The chosen parameter settings shall be recorded in the test report.

5.2.2 Comparable converter set-up for rated voltages up to 1 kV

The comparable converter has to be understood as a voltage source independent of load current.

It has to be noted, that the so-called comparable converter operating mode is not intended or requested for any commercial application, but it is a typical set-up. The purpose of the comparable converter set-up is to establish comparable test conditions for motors designed for operation with commercially available converters.

The reference conditions defined below shall only be used for verification of compliance with national energy efficiency regulations, in particular the 90 % speed and 100 % torque load point. For all other purposes including the interpolation procedure according to Annex A preferably the original system configuration should be used.

The following reference conditions are defined:

- Two level voltage source converter.

- No additional components influencing output voltage or output current shall be installed between the comparable converter and the motor, except those required for the measuring instruments.
- Operation at 90 % speed and rated torque with constant rated flux (approx. 90 % of rated voltage) for both induction machines and synchronous machines.

NOTE The rated flux is defined by the rated voltage given on the name plate of the motor. Therefore, a measurement at the 90 % speed and 100 % torque point with rated flux will be fully replicable for regulation authorities.

- For motors with a rated speed up to $3\,600\text{ min}^{-1}$, the switching frequency shall not be higher than 5 kHz.
- For motors with a rated speed above $3\,600\text{ min}^{-1}$, the switching frequency shall not be higher than 10 kHz.

The conductor cross-sectional area of the motor cable should be selected such that the voltage drop is not significant at rated load. An example for a typical test setup can be found in IEC 61800-9-2:2017.

5.2.3 Testing with converters with rated voltages above 1 kV

For converters with voltage ratings above 1 kV a generally accepted comparable converter and cable length cannot be specified. Such motors, cables and specific converters can only be tested as a complete power drive system because the pulse patterns of frequency converters for higher output powers vary between manufacturers and differ greatly between no-load and rated load.

5.2.4 Testing with other converters

Motors that are operated with converters that produce a voltage with less harmonic content than in case of supply by the comparable converter, for example multi-level converters or converters with higher switching frequencies, will typically have lower losses compared with measurements made with the comparable converter at 4 kHz or 8 kHz switching frequency. Reference measurements on such motors shall still be performed under the reference conditions as given above. Motor efficiency values measured under non-reference conditions can be provided in the motor documentation.

6 Test method for the determination of the efficiency of converter-fed motors

6.1 Selection of determination method

For the verification of the rated losses and energy efficiency according to energy efficiency classification schemes, the preferred method 6.2 according to Table 1 shall be applied.

The preferred method 2-3-A is mandatory for verification of rated efficiency declared by the manufacturer. This verification may be required by end-users and regulators. For the declaration process and the seven load points according to Annex A the manufacturer is free to use other determination methods also.

Table 1 – Preferred test methods

Ref	Method	Description	Subclause	Required facility
2-3-A	Direct-measurement Input-output	Torque measurement	6.2	Torque meter or dynamometer for full-load; Comparable or specific converter supply

Alternate efficiency determining methods according to 6.3, 6.4 and 6.5 may be used for other requirements, Table 2.

Table 2 – Other test methods

Ref	Method	Description	Subclause	Required facility
2-3-B	Summation of losses	Additional high frequency loss determination with converter for final application	6.3	Sinusoidal supply and specific converter supply at no-load operation
2-3-C	Alternate Efficiency Determination Method (AEDM)	Calculation by qualified analytical model	6.4	Qualified base models and adequate calculation tool
2-3-D	Determination of efficiency by calculation	Calculation method for motors with rated output powers higher than 2 MW	6.5	Pulse patterns of the specific converter system and adequate calculation tool

6.2 Method 2-3-A – Direct measurement of input and output

6.2.1 Test set-up

This is a test method in which the mechanical power P_{2C} of a machine is determined by measurement of the shaft torque and speed. The electrical power P_{1C} of the stator is measured in the same test.

6.2.2 Test procedure

Tests shall be conducted with converter and an assembled motor with the essential components in place, to obtain test conditions equal or very similar to normal operating conditions.

Check the offset of the torque measuring device and set it to zero as described in IEC 60034-2-1:2014.

In case of permanent magnet machines, physically uncouple the motor under test, in order to avoid residual torque in unexcited condition induced by permanent magnets.

Couple the motor under test to a load machine with a torque measuring device.

Operate the machine under test at rated torque and speed until thermal equilibrium (rate of change of 1 K or less per half hour) has been reached.

At the end of the heat run, record:

T_C Output torque

n Speed

P_{1C} Motor input power

Check the offset of the torque measuring device after stopping the machine. When measuring several load points, the torque measuring device offset has to be checked only after the last load point has been measured.

Correct the output torque T_C by the determined offset.

6.2.3 Efficiency determination

Calculate the output power:

$$P_{2C} = 2\pi \cdot T_C \cdot n$$

Calculate the efficiency:

$$\eta = \frac{P_{2C}}{P_{1C}}$$

In case differentiation between sinusoidal and converter supply losses is required, a measurement on sinusoidal supply immediately followed (machine to be stopped in between) by converter supply can be performed with equal fundamental voltages. This is only practical for induction machines.

6.2.4 Measurement at seven standardized operating points

Apply the load to the machine at the seven standardized operating points given in Table 3.

The first load point for this test series shall be conducted after thermal equilibrium (rate of change 1 K or less per half hour) has been reached.

The measurements of the subsequent standardized operating points (2, 3, 4, 5, 6 and 7) shall be performed in quick succession to minimize temperature changes in the machine during testing. Alternatively, the operating points can be measured in the order 4, 2, 5, 6, 3 and 7.

Each of the seven load points shall be set with an accuracy of $\pm 1\%$ of rated speed and $\pm 1\%$ of rated torque before recording the motor input power.

NOTE Good lab practice takes at least 15 s for each load point.

Immediately after the seven standardized operating point measurements, check the offset of the torque measuring device.

6.3 Method 2-3-B – Summation of losses with determination of additional high frequency loss at converter supply at no-load operation

6.3.1 General

Experience has shown that the additional high frequency motor loss caused by voltage source converter supply is in general basically independent of load. Therefore, the additional high frequency loss caused by converter supply can be determined from a no-load-test at fundamental frequency supply and a no-load-test at converter supply. The additional high frequency loss is the difference of the measured losses of both tests.

NOTE This procedure is not applicable to all types of electrical machines.

6.3.2 Test set-up

A sinusoidal voltage source according to IEC 61000-2-4:2002, class 1, shall be available in addition to the converter to perform these tests (nominally sinusoidal power supply).

The converter used for these tests is the specific converter intended for the final application.

6.3.3 Test procedure

The sequence of tests is as follows:

- Perform a no-load test with sinusoidal power supply (frequency and voltage) of the designated operation point according to IEC 60034-2-1:2014 for the determination of the constant losses P_{Csin} .
- Perform a no-load test with test-converter supply (frequency and voltage) of the designated operation point for the determination of the constant losses P_{Ccon} .

These measurements shall be performed immediately one after another.

The difference between the no-load losses for operation with the test-converter P_{Ccon} and with a sinusoidal power supply P_{Csin} is the additional high frequency motor loss:

$$P_{LHL} = P_{Ccon} - P_{Csin}$$

6.3.4 Efficiency determination

The additional high frequency motor loss P_{LHL} shall be added to the fundamental motor losses as determined with a sinusoidal power supply according to IEC 60034-2-1:2014 in order to obtain the motor efficiency under frequency converter operation.

The efficiency at converter supply is determined from:

$$\eta = \frac{P_{2_60034-2-1}}{P_{1_60034-2-1} + P_{LHL}}$$

6.4 2-3-C – Alternate Efficiency Determination Method (AEDM)

This represents the calculation of the efficiency by the use of a tool sometimes referred to as an analytical model. Multiple steps are required to qualify this model. Since the calculations are influenced by manufacturing techniques each manufacturer will have to qualify their own analytical model. Qualification requires the following conditions to be fulfilled:

- Use of the recognized test procedure according to 6.2.
- The test lab shall be qualified to reliably perform the tests with the required accuracy.
- Enough different types or base models chosen to be tested and evaluated to prove the tool is accurate across all products.
- An adequate sample of each base model of an identical design shall be tested to verify that the tool accurately predicts the nominal efficiency.
- All inputs are based on a statistical analysis that ensures their accuracy.

NOTE 1 Adequate in this context means at least 3 pieces per selected model.

The base models chosen should typically range in rated power, enclosure, speed, electrical characteristics and other differing physical or functional characteristics which affect energy consumption or efficiency.

NOTE 2 It is envisaged to develop the AEDM in future editions of this document to become an alternate preferred method.

6.5 2-3-D – Determination of efficiency by calculation

In case of large motors with rated output powers higher than 2 MW, if the motor rating exceeds the available testing capabilities, the determination of the additional high frequency losses caused by converter operation based on calculations may be an alternative procedure to give an order of magnitude of the additional losses. This calculation has to be based on the real pulse patterns of the converter, the frequency-dependent equivalent circuit parameters of the electric motor and by using motor models capable of covering the effects of the higher frequencies.

7 Interpolation of losses at any operating point

7.1 General

For the loss determination in any operating point, losses either measured or calculated according to the procedures given in the previous subclauses might be used as interpolation points. An interpolation function is given to calculate the losses at any other operating point.

For induction motors, at all test points the relative motor voltage should not be lower than the relative motor frequency. For synchronous motors designed for operation with lower flux/voltage (e.g. for efficiency reasons) the determination of the 7 load point is allowed with reduced flux also. In this case the flux reduction shall be noted in the motor documentation.

The first load point (90 % speed and 100 % torque) for this test series shall be conducted after thermal equilibrium (rate of change 1 K or less per half hour) has been reached. The temperature at the other 6 load points should be as close as possible to the temperature of the first load point.

For a practical example on how to apply the interpolation procedure, see Annex B.

7.2 Interpolation procedure

In this clause, speed n , torque T and the power P are used as relative values (within the range 0 ... 1) relative to the reference speed n_{ref} , reference torque T_{ref} and reference power P_{ref} .

The reference speed n_{ref} is the rated speed n_N .

The reference power P_{ref} is the rated power P_N at rated speed n_N .

The reference torque T_{ref} is calculated from reference speed and power by:

$$T_{\text{ref}} = \frac{P_{\text{ref}}}{2\pi \cdot n_{\text{ref}}}$$

In case of synchronous machines, the relative supply frequency f is equal to the relative speed n .

In case of induction machines, the relative supply frequency f for any given speed can be determined from a measurement of the fundamental frequency at the motor terminals when the shaft is rotating at the desired speed n .

7.3 Analytical determination of relative losses at any operating point

The losses at any operating point (relative speed n and relative torque T from 0 ...1) shall be obtained by applying the following interpolation formula:

$$P_L(n, T) = c_{L1} + c_{L2} \cdot n + c_{L3} \cdot n^2 + c_{L4} \cdot n \cdot T^2 + c_{L5} \cdot n^2 \cdot T^2 + c_{L6} \cdot T + c_{L7} \cdot T^2$$

NOTE Windage losses in Clause A.5 depend on speed by the third power. However, numerous tests have shown that such a term is of little practical use. On the contrary, slight measurement errors can lead to significant fluctuations. Therefore windage losses are disregarded in the interpolation formula.

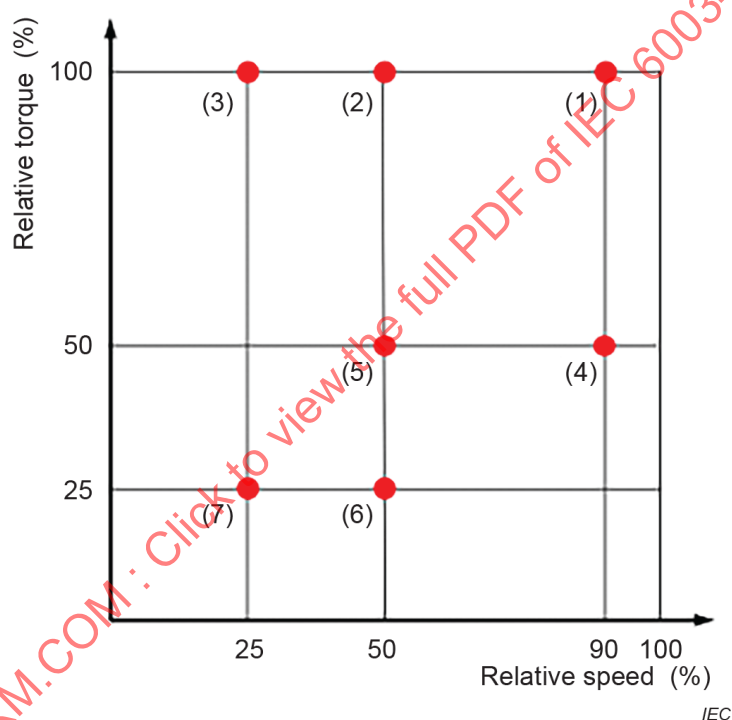
The interpolation formula focuses on U/f controlled induction motors. Therefore the loss extrapolation could be inaccurate for $n_{\text{ref}} < 0,25$ and/or $T_{\text{ref}} < 0,25$. In these cases the values for 25 % speed or torque may be used for values below.

The operating points given in Table 3 are normative for the analytical determination of the interpolation constants $c_{L1} \dots c_{L7}$. Graphical representation is shown in Figure 1.

Table 3 – Normative operating points

	<i>n</i>	<i>T</i>	<i>P</i>	Comment
<i>P</i> ₁	0,9	1	0,9	Also included in IEC 61800-9-2:2017
<i>P</i> ₂	0,5	1	0,5	Also included in IEC 61800-9-2:2017
<i>P</i> ₃	0,25	1	0,25	
<i>P</i> ₄	0,9	0,5	0,45	Also included in IEC 61800-9-2:2017
<i>P</i> ₅	0,5	0,5	0,25	Also included in IEC 61800-9-2:2017
<i>P</i> ₆	0,5	0,25	0,125	Also included in IEC 61800-9-2:2017
<i>P</i> ₇	0,25	0,25	0,0625	

NOTE The numbering of the points is slightly different from the numbering used in IEC 61800-9-2:2017.

**Figure 1 – Standardized operating points**

The following formulas shall be used for the determination of the interpolation coefficients:

$$c_{L1} = -\frac{25}{156} \cdot R_{L1} + \frac{529}{780} \cdot R_{L2} - \frac{12}{65} \cdot R_{L3} + \frac{25}{39} \cdot R_{L4} - \frac{103}{39} \cdot R_{L5} - \frac{56}{195} \cdot R_{L6} + \frac{192}{65} \cdot R_{L7}$$

$$c_{L2} = \frac{25}{26} \cdot R_{L1} - \frac{599}{390} \cdot R_{L2} + \frac{112}{195} \cdot R_{L3} - \frac{50}{13} \cdot R_{L4} + \frac{50}{13} \cdot R_{L5} + \frac{1\,792}{195} \cdot R_{L6} - \frac{1\,792}{195} \cdot R_{L7}$$

$$c_{L3} = -\frac{50}{39} \cdot R_{L1} + \frac{22}{13} \cdot R_{L2} - \frac{16}{39} \cdot R_{L3} + \frac{200}{39} \cdot R_{L4} - \frac{200}{39} \cdot R_{L5} - \frac{256}{39} \cdot R_{L6} + \frac{256}{39} \cdot R_{L7}$$

$$c_{L4} = -\frac{50}{13} \cdot R_{L1} + \frac{2\,542}{195} \cdot R_{L2} - \frac{1\,792}{195} \cdot R_{L3} + \frac{50}{13} \cdot R_{L4} - \frac{50}{13} \cdot R_{L5} - \frac{1\,792}{195} \cdot R_{L6} + \frac{1\,792}{195} \cdot R_{L7}$$

$$c_{L5} = \frac{200}{39} \cdot R_{L1} - \frac{152}{13} \cdot R_{L2} + \frac{256}{39} \cdot R_{L3} - \frac{200}{39} \cdot R_{L4} + \frac{200}{39} \cdot R_{L5} + \frac{256}{39} \cdot R_{L6} - \frac{256}{39} \cdot R_{L7}$$

$$c_{L6} = -2 \cdot R_{L2} + 10 \cdot R_{L5} - 8 \cdot R_{L6}$$

$$c_{L7} = \frac{25}{39} \cdot R_{L1} - \frac{181}{195} \cdot R_{L2} + \frac{192}{65} \cdot R_{L3} - \frac{25}{39} \cdot R_{L4} - \frac{287}{39} \cdot R_{L5} + \frac{1\,616}{195} \cdot R_{L6} - \frac{192}{65} \cdot R_{L7}$$

P_{L1} to P_{L7} are the measured losses in the points P_1 to P_7 relative to the rated output power (rated speed and rated torque).

7.4 Additional losses due to frequency converter voltage drop

A frequency converter normally has a voltage drop, so that its maximum fundamental output voltage to the motor is lower than its input voltage from the network. If a motor with a rated fundamental voltage equal to the network voltage is connected to such a frequency converter, the losses in the motor will be higher due to an increased motor current.

The normative operating points (Table 3) avoid this problem by requiring tests at a maximum of 90 % of rated speed.

NOTE The increase in losses at 100 % of rated speed in relation to the interpolated losses is between a linear and quadratic function of the drop of voltage level and can be estimated by:

$$k_{VD} = U_N / U_{Con}$$

Where

k_{VD} is the fundamental voltage drop ratio;

U_N is the rated voltage (fundamental);

U_{Con} is the actual fundamental terminal voltage at converter operation.

For example, when the frequency converter is able to supply a maximum fundamental voltage of 360 V and the rated motor voltage is 400 V, then the total losses at rated speed will increase by at least 11 % ($400/360 = 1,11$) compared to the extrapolated losses or operation at 400 V fundamental voltage.

7.5 Alternate operating points to determine interpolation coefficients

The operating points of Table 4 can be used as a non-normative alternative for the analytical determination of the interpolation constants c_{L1} ... c_{L7} of 7.2.

Table 4 – Non-normative alternate operating points

	n	T	P
P_1^*	1	1	1
P_2	0,5	1	0,5
P_3	0,25	1	0,25
P_4^*	1	0,5	0,5
P_5	0,5	0,5	0,25
P_6	0,5	0,25	0,125
P_7	0,25	0,25	0,0625

NOTE Compared to Table 3 only the operating points P_1^* and P_4^* have been changed, which is indicated by the asterisk.

Measurement at rated speed with full magnetic flux will require a frequency converter supply voltage higher than rated motor voltage to compensate for internal IGBT voltage drop. When the measurement is performed with a frequency converter input voltage equal to rated motor voltage, motor losses at these operating points will increase due to reduction of fundamental voltage.

The following formulas may be used for the determination of the interpolation coefficients:

$$c_{L1} = -\frac{1}{9} \cdot R_{L1}^* + \frac{28}{45} \cdot R_{L2} - \frac{8}{45} \cdot R_{L3} + \frac{4}{9} \cdot R_{L4}^* - \frac{22}{9} \cdot R_{L5} - \frac{8}{45} \cdot R_{L6} + \frac{128}{45} \cdot R_{L7}$$

$$c_{L2} = \frac{2}{3} \cdot R_{L1}^* - \frac{6}{5} \cdot R_{L2} + \frac{8}{15} \cdot R_{L3} - \frac{8}{3} \cdot R_{L4}^* + \frac{8}{3} \cdot R_{L5} + \frac{128}{15} \cdot R_{L6} - \frac{128}{15} \cdot R_{L7}$$

$$c_{L3} = -\frac{8}{9} \cdot R_{L1}^* + \frac{56}{45} \cdot R_{L2} - \frac{16}{45} \cdot R_{L3} + \frac{32}{9} \cdot R_{L4}^* - \frac{32}{9} \cdot R_{L5} - \frac{256}{45} \cdot R_{L6} + \frac{256}{45} \cdot R_{L7}$$

$$c_{L4} = -\frac{8}{3} \cdot R_{L1}^* + \frac{56}{5} \cdot R_{L2} - \frac{128}{15} \cdot R_{L3} + \frac{8}{3} \cdot R_{L4}^* - \frac{8}{3} \cdot R_{L5} - \frac{128}{15} \cdot R_{L6} + \frac{128}{15} \cdot R_{L7}$$

$$c_{L5} = \frac{32}{9} \cdot R_{L1}^* - \frac{416}{45} \cdot R_{L2} + \frac{256}{45} \cdot R_{L3} - \frac{32}{9} \cdot R_{L4}^* + \frac{32}{9} \cdot R_{L5} + \frac{256}{45} \cdot R_{L6} - \frac{256}{45} \cdot R_{L7}$$

$$c_{L6} = -2 \cdot R_{L2} + 10 \cdot R_{L5} - 8 \cdot R_{L6}$$

$$c_{L7} = \frac{4}{9} \cdot R_{L1}^* - \frac{28}{45} \cdot R_{L2} + \frac{128}{45} \cdot R_{L3} - \frac{4}{9} \cdot R_{L4}^* - \frac{68}{9} \cdot R_{L5} + \frac{368}{45} \cdot R_{L6} - \frac{128}{45} \cdot R_{L7}$$

7.6 Optional determination of interpolation error

The interpolation error can be determined by the average standard deviation of the original (measured) losses $P_{L \text{ measured}}$ and the interpolated losses $P_{L \text{ interpolated}}$ for a number of operating points.

It is recommended to use sixteen measurement points at relative speeds $n = 0,25, 0,5, 0,75$ and $0,9$ of rated motor speed and relative torques $T = 0,25, 0,5, 0,75$ and $1,0$ of rated motor torque.

The interpolation error Q_{SI} (interpolation stability index) is then given by:

$$Q_{\text{SI}} = \sqrt{\frac{1}{16} \sum_n \sum_T \left(\frac{P_{L(n,T)}^{\text{measured}} - P_{L(n,T)}^{\text{interpolated}}}{P_{L(n,T)}^{\text{measured}}} \right)^2}$$

It is also possible to determine the interpolation coefficients based on the sixteen measurement points by performing a numerical optimization for the minimal interpolation error. A suitable algorithm is the Newton-Raphson method, which is already included in many commercially available numerical software packages. Interpolation coefficients based on such a numerical optimization often lead to better interpolation results than coefficients based on the analytical formulas given in the previous clauses.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60034-2-3:2020

Annex A (informative)

Losses of AC motors

A.1 General

This annex gives basic information on the physical effects that create losses in electrical machines. It can be used as a basis for the calculation of losses at various speeds and loads (torque) when the individual loss components are known from calculation or measurements. Not all loss components mentioned below are applicable to all kinds of AC motors.

The method assumes the use of a constant flux control, which means that induction motors that are controlled with this method will likely experience a higher relative calculation accuracy than other motors, for example synchronous motors.

A.2 Stator and rotor winding I^2R losses $P_{\text{LSR}} (P_{\text{LS}} + P_{\text{LR}})$

These losses are independent of frequency and vary with the square of the torque (since current basically varies with torque). However, there is an offset for magnetizing current (no-load current) that has to be taken into account.

Hence winding losses at any load-point $P_{\text{LSR}}(n, T)$ can be interpolated from the winding losses P_{LSR} at rated speed n_{N} and rated torque T_{N} :

a) Stator winding losses

$$P_{\text{LS}}(n, T) = P_{\text{LS}}(n_{\text{N}}, T_{\text{N}}) \cdot \left[\left(\frac{I_0}{I_{\text{N}}} \right)^2 + \left(1 - \left(\frac{I_0}{I_{\text{N}}} \right)^2 \right) \cdot T^2 \right]$$

b) Rotor winding losses

$$P_{\text{LR}}(n, T) = P_{\text{LR}}(n_{\text{N}}, T_{\text{N}}) \cdot T^2$$

c) Total winding losses

$$P_{\text{LSR}}(n, T) = P_{\text{LS}}(n_{\text{N}}, T_{\text{N}}) \cdot \left[\left(\frac{I_0}{I_{\text{N}}} \right)^2 + \left(1 - \left(\frac{I_0}{I_{\text{N}}} \right)^2 \right) \cdot T^2 \right] + P_{\text{LR}}(n_{\text{N}}, T_{\text{N}}) \cdot T^2$$

A.3 Iron losses (P_{Lfe})

Iron losses can be separated in two parts:

- Hysteresis losses $P_{\text{Lfe}} \cdot c_{\text{fe}}$, which are proportional to frequency (speed), and
- Eddy-current losses $P_{\text{Lfe}} \cdot (1 - c_{\text{fe}})$, which are proportional to the square of the frequency (speed).

When the exact distribution of these two parts is not known, an equal distribution ($c_{\text{fe}} = 0,5$) should give satisfactory results in practice.

There is no dependency of iron losses on magnetic flux (B -field) in the constant flux (base-frequency or constant torque) range.

$$P_{\text{Lfe}}(n, T) = c_{\text{fe}} \cdot P_E(n_{\text{N}}, T_{\text{N}}) \cdot n + (1 - c_{\text{fe}}) \cdot P_{\text{Lfe}}(n_{\text{N}}, T_{\text{N}}) \cdot n^2$$

A.4 Additional load losses (P_{LL})

Additional load losses are losses in supporting structures (housing, flanges) and losses due to side effects (cross-currents between rotor bars, eddy currents in permanent magnets, etc.).

Additional load losses can be separated in two parts:

- Additional load losses $P_{\text{LL}} \cdot c_{\text{LL}}$, which consist of losses in proportion to frequency (speed) and to the square of torque, and
- Additional load losses $P_{\text{LL}} \cdot (1 - c_{\text{LL}})$, which are caused by eddy current effects and are therefore proportional to the square of frequency (speed) and torque.

When the exact distribution of additional load losses is unknown, an equal distribution ($c_{\text{LL}} = 0,5$) shall be assumed.

NOTE A small part of additional losses also occurs in no-load condition. These losses are usually included in the friction and windage losses although they are mostly eddy-current losses and so in proportion to the square of the frequency.

$$P_{\text{LL}}(f, T) = c_{\text{LL}} \cdot P_{\text{LL}}(n_{\text{N}}, T_{\text{N}}) \cdot T^2 \cdot n + (1 - c_{\text{LL}}) \cdot P_{\text{LL}}(n_{\text{N}}, T_{\text{N}}) \cdot T^2 \cdot n^2$$

A.5 Friction and windage losses (P_{Lfw})

Friction and windage losses can be split in two parts:

- Friction losses $P_{\text{Lfw}} \cdot c_{\text{fw}}$, which are proportional to frequency (speed), and
- Windage losses $P_{\text{Lfw}} \cdot (1 - c_{\text{fw}})$, which are proportional to the third power of frequency (speed).

Table A.1 gives recommended values for c_{fw} of self-ventilated motors in case the exact distribution is not known from tests.

Table A.1 – Recommended split of windage and friction losses for IC 411 self-ventilated motors

Rated speed / min^{-1}	c_{fw}	$(1 - c_{\text{fw}})$
3 000 to 3 600	0,7	0,3
1 500 to 1 800	0,5	0,5
1 000 to 1 200	0,3	0,7
< 1 000	0,2	0,8

In case of motors equipped with an auxiliary fan (IC 416), the windage losses are constant and not depending on speed. They can be calculated from the output power and efficiency of the fan motor.

$$R_{\text{Lfw}}(n, T) = c_{\text{fw}} \cdot R_{\text{Lfw}}(n_{\text{N}}, T_{\text{N}}) \cdot n + (1 - c_{\text{fw}}) \cdot R_{\text{Lfw}}(n_{\text{N}}, T_{\text{N}}) \cdot n^3$$

A.6 Additional high frequency losses (P_{LHL})

Additional high frequency losses are caused by the non-sinusoidal power supply of a PWM (pulse-width-modulation) frequency converter. High frequency voltages, which are basically depending on the switching frequency and the control scheme of the converter, create additional high frequency currents in the motor windings, which lead to additional eddy current and I^2R losses.

Experience has shown that additional high frequency losses are mostly constant over the whole torque and speed range as long as the converter switching frequency remains unchanged:

$$P_{\text{LHL}}(n, T) = P_{\text{LHL}}(n_{\text{N}}, T_{\text{N}})$$

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60034-2-3:2020

Annex B (informative)

Exemplary determination of losses and efficiency at various load points

B.1 General

This annex provides an example how to determine losses and efficiency at different load points.

The following data is provided by the manufacturer of an induction machine (name plate data), see Table B.1.

Table B.1 – Name plate data

Quantity	Symbol	Value	Unit
rated speed	n_N	3 000	1/min
rated power	P_N	5,5	kW

This data can be used to determine the reference speed, reference power and reference torque, see Table B.2.

Table B.2 – Reference values

Quantity	Symbol	Value	Unit
reference speed	n_{ref}	3 000	1/min
reference power	P_{ref}	5 500	W
reference torque	T_{ref}	$= (5\,500\text{ W}) / (2\pi \cdot 3\,000 / 60\text{ 1/s})$ $= 17,5$	Nm

NOTE In case rated torque is given instead of rated power, reference power can be calculated from rated torque and speed.

B.2 Determination of the interpolation coefficients

In case the interpolation coefficients are not already available from the manufacturer, information of the motor losses at the seven normative operating points can be used to determine the coefficients, see Table 3. This information shall be provided by the manufacturer of the machine.

For example, see Table B.3.

Table B.3 – Losses for the 7 operating points

Quantity	Symbol	Losses in W	Relative losses for interpolation formula
Operating point 1 (2 700 /min, 17,5 Nm)	P_1	466	$= 466 / 5\,500 = 0,084\,73$
Operating point 2 (1 500 /min, 17,5 Nm)	P_2	302	$= 302 / 5\,500 = 0,054\,91$
Operating point 3 (750 /min, 17,5 Nm)	P_3	237	$= 237 / 5\,500 = 0,043\,09$
Operating point 4 (2 700 /min, 8,75 Nm)	P_4	248	$= 248 / 5\,500 = 0,045\,09$
Operating point 5 (1 500 /min, 8,75 Nm)	P_5	160	$= 160 / 5\,500 = 0,029\,09$
Operating point 6 (1 500 /min, 4,38Nm)	P_6	96	$= 96 / 5\,500 = 0,017\,45$
Operating point 7 (750 /min, 4,38 Nm)	P_7	69	$= 69 / 5\,500 = 0,012\,55$

The interpolation coefficients can now be determined directly by applying the relative loss values to the formulas given in 7.3.

The computed interpolation coefficients are, see Table B.4.

Table B.4 – Interpolation coefficients

Quantity	Symbol	Value
Interpolation coefficient 1	c_{L1}	-0,000 157
Interpolation coefficient 2	c_{L2}	0,005 375
Interpolation coefficient 3	c_{L3}	0,016 506
Interpolation coefficient 4	c_{L4}	0,010 439
Interpolation coefficient 5	c_{L5}	0,025 448
Interpolation coefficient 6	c_{L6}	0,041 480
Interpolation coefficient 7	c_{L7}	-0,004 808

Manufacturers may also provide the seven interpolation coefficients instead of the losses at the normative operating points. As there are several ways to determine the coefficients, some of which include the usage of additional measurement data, it is always preferred to use the coefficients provided by the manufacturer, when available.

B.3 Calculation of losses and efficiency for certain operating points

For example, the following operating points have been specified by the user of the motor, see Table B.5.

Table B.5 – User-defined operating points

Speed in 1/min	Torque in Nm	Relative operating time	Computed output power in W
400	1	10 %	$= 2\pi \cdot 400 / 60 \cdot 1 = 42$
1 400	5	60 %	$= 2\pi \cdot 1\,400 / 60 \cdot 5 = 733$
2 800	15	30 %	$= 2\pi \cdot 2\,800 / 60 \cdot 15 = 4\,398$

By applying the interpolation formula given in 7.3, the relative losses in each of the three user defined operating points can be calculated, see Table B.6.

Table B.6 – Calculated losses for the user-defined operating points

Relative speed	Relative torque	Relative losses	Losses in W	Efficiency
$= 400 / 3\,000$ $= 0,133\,3$	$= 1 / 17,5$ $= 0,057\,1$	0,003 2	$= 0,003\,2 \cdot 5\,500$ $= 18$	$= 42 / (42 + 18)$ $= 70,3 \%$
$= 1\,400 / 3\,000$ $= 0,466\,7$	$= 5 / 17,5$ $= 0,285\,6$	0,018 2	$= 0,018\,2 \cdot 5\,500 = 100$	$= 733 / (733 + 100)$ $= 88,0 \%$
$= 2\,800 / 3\,000$ $= 0,933\,3$	$= 15 / 17,5$ $= 0,856\,8$	0,074 7	$= 0,074\,7 \cdot 5\,500 = 411$	$= 4\,398 / (4\,398 + 411)$ $= 91,5 \%$

The cycle efficiency of the motor with respect to the operating times in each load point can be computed as follows:

Relative energy loss per cycle: $0,1 \cdot 18\,W + 0,6 \cdot 100\,W + 0,3 \cdot 411\,W = 185\,W$

Relative energy output per cycle: $0,1 \cdot 42\,W + 0,6 \cdot 733\,W + 0,3 \cdot 4\,398\,W = 1\,763\,W$

Total efficiency per cycle: $1\,763 / (1\,763 + 185) = 90,5 \%$

The total efficiency can now be used to compare different motors with respect to their energy consumption.

Bibliography

IEC TS 60034-25:2014, *Rotating electrical machines – Part 25: AC electrical machines used in power drive systems – Application guide*

IEC TS 60034-30-2:2016, *Rotating electrical machines – Part 30-2: Efficiency classes of variable speed AC motors (IE-code)*

IEC 61800-2:2015, *Adjustable speed electrical power drive systems – Part 2: General requirements – Rating specifications for low voltage adjustable frequency a.c. power drive systems*

IEC 61800-4:2002, *Adjustable speed electrical power drive systems – Part 4: General requirements – Rating specifications for a.c. power drive systems above 1 000 V a.c. and not exceeding 35 kV*

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60034-2-3:2020

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	30
INTRODUCTION.....	32
1 Domaine d'application	34
2 Références normatives	34
3 Termes et définitions	34
4 Symboles et termes abrégés	35
5 Exigences fondamentales	36
5.1 Instrumentation	36
5.1.1 Généralités	36
5.1.2 Analyseur de puissance et transducteurs	37
5.1.3 Sortie mécanique du moteur	37
5.2 Configuration du convertisseur.....	38
5.2.1 Généralités	38
5.2.2 Configuration du convertisseur comparable pour des tensions assignées jusqu'à 1 kV	38
5.2.3 Essais avec des convertisseurs pour des tensions assignées supérieures à 1 kV	38
5.2.4 Essais avec d'autres convertisseurs	39
6 Méthode d'essai pour la détermination du rendement des moteurs alimentés par convertisseur	39
6.1 Choix de la méthode de détermination	39
6.2 Méthode 2-3-A – Mesure directe de l'entrée et de la sortie	40
6.2.1 Installation d'essai	40
6.2.2 Procédure d'essai	40
6.2.3 Détermination du rendement.....	40
6.2.4 Mesure aux sept points de fonctionnement normalisés	41
6.3 Méthode 2-3-B – Somme des pertes avec détermination des pertes supplémentaires hautes fréquences sous alimentation par convertisseur en fonctionnement à vide	41
6.3.1 Généralités	41
6.3.2 Installation d'essai	41
6.3.3 Procédure d'essai	41
6.3.4 Détermination du rendement.....	42
6.4 2-3-C – Autre méthode de détermination du rendement (AEDM)	42
6.5 2-3-D – Détermination du rendement par calcul	42
7 Interpolation des pertes en tout point de fonctionnement	43
7.1 Généralités	43
7.2 Procédure d'interpolation	43
7.3 Détermination analytique des pertes relatives en tout point de fonctionnement	43
7.4 Pertes supplémentaires dues à la chute de tension du convertisseur de fréquence	45
7.5 Autres points de fonctionnement permettant de déterminer les coefficients d'interpolation	45
7.6 Détermination facultative de l'erreur d'interpolation	46
Annexe A (informative) Pertes des moteurs à courant alternatif	48
A.1 Généralités	48

A.2	Pertes I^2R dans l'enroulement statorique et rotorique P_{LSR} ($P_{LS} + P_{LR}$).....	48
A.3	Pertes dans le fer (P_{Lfe})	48
A.4	Pertes de charge supplémentaires (P_{LL})	49
A.5	Pertes par frottement et par ventilation (P_{Lfw})	49
A.6	Pertes supplémentaires hautes fréquences (P_{LHL})	50
Annexe B (informative) Exemple de détermination des pertes et du rendement en différents points de charge.....		51
B.1	Généralités	51
B.2	Détermination des coefficients d'interpolation	51
B.3	Calcul des pertes et du rendement pour certains points de fonctionnement.....	52
Bibliographie.....		54
Figure 1 – Points de fonctionnement normalisés		44
Tableau 1 – Méthodes d'essai préférentielles		39
Tableau 2 – Autres méthodes d'essai		39
Tableau 3 – Points de fonctionnement normatifs		44
Tableau 4 – Autres points de fonctionnement non normatifs		46
Tableau A.1 – Répartition recommandée des pertes par frottement et par ventilation pour les moteurs autoventilés IC 411		49
Tableau B.1 – Données de plaque signalétique.....		51
Tableau B.2 – Valeurs de référence		51
Tableau B.3 – Pertes pour les sept points de fonctionnement		52
Tableau B.4 – Coefficients d'interpolation		52
Tableau B.5 – Points de fonctionnement définis par l'utilisateur		53
Tableau B.6 – Pertes calculées pour les points de fonctionnement définis par l'utilisateur		53

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES –

**Partie 2-3: Méthodes d'essai spécifiques pour la détermination
des pertes et du rendement des moteurs à courant alternatif
alimentés par convertisseur**

AVANT-PROPOS

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

La Norme internationale IEC 60034-2-3 a été établie par le comité d'études 2 de l'IEC: Machines tournantes.

Cette première édition annule et remplace l'IEC TS 60034-2-3, publiée en 2013.

Le texte de cette Norme internationale est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
2/1974/FDIS	2/1982/RVD

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

Ce document a été rédigé selon les Directives ISO/IEC, Partie 2.

Une liste de toutes les parties de la série IEC 60034, publiées sous le titre général *Machines électriques tournantes*, peut être consultée sur le site web de l'IEC.

Le comité a décidé que le contenu de ce document 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 au document recherché. À cette date, le document sera

- reconduit,
- supprimé,
- remplacé par une édition révisée, ou
- amendé.

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

Le but du présent document est de définir des méthodes d'essai pour la détermination des pertes totales, y compris les pertes supplémentaires hautes fréquences du moteur et le rendement des moteurs alimentés par convertisseur. Les pertes supplémentaires hautes fréquences se produisent en plus des pertes en alimentation sinusoïdale telles que déterminées par les méthodes de l'IEC 60034-2-1:2014. Les résultats déterminés en fonction du présent document permettent de comparer les pertes et le rendement de différents moteurs alimentés par convertisseur.

De plus, le présent document présente sept points de fonctionnements normalisés permettant de définir les pertes et le rendement sur l'ensemble de la plage des couples/vitesses. Une procédure d'interpolation permettant de calculer les pertes et le rendement en tout point de fonctionnement (couple, vitesse) est fournie.

Dans les systèmes d'entraînement électriques de puissance (PDS – *power drive systems*), le moteur et le convertisseur de fréquence sont souvent fabriqués par différents fournisseurs. Des moteurs de même conception sont produits en grande quantité. Certains d'entre eux peuvent être exploités à partir du réseau, d'autres à partir de convertisseurs de fréquence dont les différents types sont nombreux, de même que les fabricants. Les réglages individuels des convertisseurs (fréquence de commutation, niveau de tension du bus continu, etc.) ont aussi une influence sur le rendement du système. Comme il n'est pas réaliste de déterminer les pertes du moteur pour chaque combinaison de moteur, de convertisseur de fréquence, de câble de raccordement, de filtre de sortie et de réglage des paramètres, le présent document décrit un nombre limité d'approches en fonction du niveau de tension et des caractéristiques assignées de la machine en essai.

Les pertes déterminées conformément au présent document ne sont pas destinées à représenter les pertes dans l'application finale. Elles fournissent cependant une base objective de comparaison des différentes conceptions des moteurs quant à leur adaptation à un fonctionnement avec des convertisseurs.

Généralement, lorsque le moteur est alimenté par un convertisseur, ses pertes sont plus élevées que lorsqu'il fonctionne en principe sur réseau sinusoïdal. Les pertes supplémentaires hautes fréquences dépendent du spectre d'harmoniques de la grandeur d'alimentation électrique imposée (courant ou tension) issue du convertisseur qui est influencé par ses circuits et sa méthode de contrôle. Pour de plus amples informations, voir l'IEC TS 60034-25:2014.

Le but du présent document n'est pas de définir des procédures d'essai, ni pour les systèmes d'entraînement électriques de puissance, ni pour des convertisseurs de fréquence seuls.

Convertisseur comparable

Les expériences et analyses théoriques les plus récentes ont montré que les pertes supplémentaires hautes fréquences du moteur n'augmentent généralement pas avec la charge. Les méthodes données dans le présent document sont principalement fondées sur des alimentations fournies par des convertisseurs à modulation de largeur d'impulsion (MLI).

Pour ce qui concerne ces types de convertisseurs et compte tenu du besoin grandissant de vérifier leur conformité avec les réglementations nationales en matière de rendement énergétique, le présent document décrit un appareil dit convertisseur comparable utilisé pour les essais des moteurs à basse tension.

En principe, le convertisseur comparable représente une source de tension à contenu typique d'harmoniques à haute fréquence alimentant la machine en essai. Il ne s'applique pas aux moteurs moyenne tension.

Limitations relatives à l'application du convertisseur comparable

Il doit être noté que la méthode d'essai avec le convertisseur comparable décrite ici constitue une méthode normalisée destinée à fournir des valeurs de rendement comparables dans des conditions d'essai normalisées. Un classement des moteurs en fonction de l'adaptation pour un fonctionnement avec convertisseur peut être obtenu, mais cela n'équivaut pas à déterminer les pertes réelles du moteur pour un fonctionnement avec un convertisseur spécifique qui exige de réaliser un essai de l'ensemble du système d'entraînement électrique de puissance (PDS) avec le convertisseur spécifique utilisé dans l'application finale.

Ceci est particulièrement vrai pour les moteurs entraînés par des convertisseurs multiniveaux de source de tension ou de source de courant pour lesquels les pertes supplémentaires hautes fréquences du moteur diffèrent beaucoup plus avec la vitesse et la charge que pour les convertisseurs de source de tension à deux niveaux. Par conséquent, pour déterminer les pertes et le rendement, il convient d'utiliser de préférence des procédures dans lesquelles le moteur fonctionne avec le même convertisseur que celui qui est utilisé en exploitation.

Une autre option consiste à déterminer les pertes supplémentaires hautes fréquences du moteur par calcul. Lorsque cette détermination est demandée par le client, le type de MLI du convertisseur est exigé. Ces procédures ne relèvent pas du présent document.

La procédure d'interpolation fournie pour la détermination des pertes et du rendement en tout point de fonctionnement (couple, vitesse) est limitée à la plage de vitesses de base (plage de couples constants, plage de flux constants).

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60034-2-3:2020

MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES –

Partie 2-3: Méthodes d'essai spécifiques pour la détermination des pertes et du rendement des moteurs à courant alternatif alimentés par convertisseur

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 60034 spécifie les méthodes d'essai et la procédure d'interpolation relatives à la détermination des pertes et des rendements des moteurs alimentés par convertisseur relevant du domaine d'application de l'IEC 60034-1:2017. Le moteur est alors considéré comme faisant partie intégrante d'un système d'entraînement électrique de puissance (PDS – *power drive system*) à fréquence variable, comme cela est défini dans l'IEC 61800-9-2:2017.

Avec l'approche du convertisseur comparable, le rendement du moteur déterminé par l'utilisation du présent document s'applique uniquement à la comparaison des différentes conceptions de moteurs.

Le document spécifie également des procédures de détermination des pertes du moteur en tout point de charge (couple, vitesse) dans la plage de vitesses de base (plage de couples constants, plage de flux constants) à partir de la détermination des pertes au niveau de sept points de charge normalisés. Cette procédure s'applique à tout moteur à courant alternatif à vitesse variable (à induction et synchrone) assigné selon l'IEC 60034-1:2017 pour un fonctionnement à fréquence variable et alimenté en tension variable.

2 Références normatives

Les documents suivants cités dans le texte constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

IEC 60034-1:2017, *Machines électriques tournantes – Partie 1: Caractéristiques assignées et caractéristiques de fonctionnement*

IEC 60034-2-1:2014, *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 pour véhicules de traction)*

IEC 61000-2-4:2002, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 2-4: Environnement – Niveaux de compatibilité dans les installations industrielles pour les perturbations conduites à basse fréquence*

IEC 61800-9-2:2017, *Entraînements électriques de puissance à vitesse variable – Partie 9-2: Écoconception des entraînements électriques de puissance, des démarreurs de moteurs, de l'électronique de puissance et de leurs applications entraînées – Indicateurs d'efficacité énergétique pour les entraînements électriques de puissance et les démarreurs de moteurs*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions donnés dans l'IEC 60034-1:2017 et l'IEC 60034-2-1:2014, ainsi que les suivants s'appliquent.

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <http://www.iso.org/obp>

3.1

pertes du moteur avec alimentation par le convertisseur

lorsqu'un moteur est alimenté par un convertisseur, les pertes du moteur sont constituées de la combinaison des pertes induites par la fréquence fondamentale et des pertes induites par les hautes fréquences du convertisseur

3.2

pertes dues à la fréquence fondamentale

pertes dues à la fréquence fondamentale dans le moteur qui peuvent être séparées en cinq différentes composantes: les pertes dans le fer (variant avec la fréquence du moteur et la tension fondamentale appliquée), les pertes par frottement et par ventilation (variant avec la vitesse du moteur), les pertes dans l'enroulement rotorique, les pertes dans l'enroulement statorique et les pertes supplémentaires en charge (variant toutes trois avec le courant du moteur). Les pertes dues à la fréquence fondamentale sont les pertes d'un moteur fonctionnant en appliquant une tension assignée à la fréquence fondamentale ne contenant pas de hautes fréquences supplémentaires

3.3

pertes supplémentaires hautes fréquences

pertes supplémentaires hautes fréquences générées dans le moteur par les formes d'onde de tension et courant non sinusoïdales produites par le convertisseur, et qui s'ajoutent aux pertes dans le fer, aux pertes par frottement et par ventilation, aux pertes dans l'enroulement rotorique, dans l'enroulement statorique et aux pertes supplémentaires en charge (pertes fondamentales)

3.4

plage de vitesses de base

plage de vitesses allant de l'arrêt à la vitesse la plus élevée à laquelle le moteur peut être alimenté par une tension qui varie proportionnellement à la vitesse, de façon à ce que le flux magnétique reste constant (rapport U/f constant) pour les machines à induction, et selon le couple maximum par ampère (MTPA – *maximum torque per ampere*) pour les machines synchrones. Dans la plage de vitesses de base, le couple maximum du moteur est constant (plage de couples constants), si un contrôle du flux constant est utilisé

3.5

fréquence de commutation

nombre de commutations d'un semiconducteur en une seconde. Elle détermine avec le type de MLI sélectionné et la topologie du convertisseur, la fréquence minimale des hautes fréquences non contrôlables ou interharmoniques au point de couplage interne (PCI) ou sur le moteur

Note 1 à l'article: Pour un convertisseur à deux niveaux, la fréquence d'impulsion mesurée entre phases est égale à deux fois la fréquence de commutation définie en 3.5 dans le cas de modulation continue, et d'environ 1,33 fois la fréquence de commutation définie en 3.5 en cas de modulation discontinue. Un événement de commutation représente un état passant plus un état ouvert d'un semiconducteur.

4 Symboles et termes abrégés

f	Fréquence, en Hz
f_{Mot}	Fréquence fondamentale du moteur, Hz
f_{N}	Fréquence assignée du moteur, Hz
f_{sw}	Fréquence de commutation, Hz
I_0	Courant à vide, A

I_N	Courant assigné, A
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
MTPA	Maximum torque per ampere control applied to synchronous motors (couple maximum contrôlable par Ampère appliqué aux moteurs synchrones)
n	Vitesse, min^{-1}
n_N	Vitesse assignée, min^{-1}
n_{ref}	Vitesse de référence, min^{-1}
P	Puissance, W
P_{Ccon}	Pertes constantes avec alimentation par le convertisseur, W
P_{Csin}	Pertes constantes avec alimentation sinusoïdale conformément à l'IEC 60034-2-1:2014, W
PDS	Power drive system (Entraînement électrique de puissance)
P_{LHL}	Perte supplémentaire hautes fréquences de l'alimentation par le convertisseur, W
P_N	Puissance assignée, W
P_{ref}	Puissance de référence, W
$P_{1\text{C}}$	Puissance d'entrée du moteur avec alimentation par le convertisseur, W
$P_{1_60034-2-1}$	Puissance d'entrée du moteur tel que soumis à l'essai conformément à l'IEC 60034-2-1:2014, W
$P_{2\text{C}}$	Puissance de sortie du moteur avec alimentation par le convertisseur, W
$P_{2_60034-2-1}$	Puissance de sortie du moteur tel que soumis à l'essai conformément à l'IEC 60034-2-1:2014, W
T	Couple de la machine, Nm
T_{C}	Couple de la machine avec alimentation par le convertisseur, Nm
T_N	Couple assigné, Nm
T_{ref}	Couple de référence, Nm
U_N	Tension assignée du moteur, V
η	Rendement

5 Exigences fondamentales

5.1 Instrumentation

5.1.1 Généralités

Sauf indication contraire dans le présent document, la moyenne arithmétique des trois courants et tensions de ligne doit être utilisée.

Dans le cadre des essais de machines électriques en charge, des fluctuations lentes de la puissance de sortie et des autres grandeurs mesurées peuvent être inévitables. Par conséquent, pour chaque point de charge, de nombreux relevés doivent être effectués automatiquement à l'aide d'un appareil digital adapté sur une durée moyenne d'au moins 15 s, mais sans dépasser 60 s, et cette moyenne doit être utilisée pour déterminer le rendement.

Compte tenu des hautes fréquences impliquées dans les convertisseurs alimentant les moteurs à courant alternatif et leur contribution aux pertes du moteur, le matériel de mesure doit être choisi conformément à la plage des fréquences correspondante, avec une précision suffisante.

Pour les mesures de température, une sonde thermique installée au point chaud peut être utilisée en option, comme indiqué dans l'IEC 60034-2-1:2014.

5.1.2 Analyseur de puissance et transducteurs

L'instrumentation pour mesurer la puissance et le courant à l'entrée du moteur doit en fait satisfaire aux exigences de l'IEC 60034-2-1:2014, mais compte tenu des composantes de fréquence plus élevées, les exigences supplémentaires suivantes doivent également s'appliquer.

L'incertitude spécifiée du wattmètre doit être de 0,2 % de la puissance apparente assignée du moteur ou mieux pour la puissance active totale à 50 Hz ou 60 Hz. Il s'agit de l'incertitude totale du wattmètre comprenant les capteurs éventuels.

NOTE 1 Par exemple, lorsqu'un moteur triphasé a une tension assignée de 400 V et un courant assigné de 10 A, l'incertitude de la puissance active du wattmètre est au moins égale à 0,2 % de $\sqrt{3}$ fois 4 000 VA, ce qui représente 13,9 W ou mieux.

La bande passante des wattmètres et des capteurs doit être suffisamment large pour assurer qu'une erreur de mesure de la puissance active totale pour toute la plage de fréquences (au-delà de 50 Hz et 60 Hz) soit inférieure ou égale à 0,3 % de la puissance apparente.

NOTE 2 En général, une bande passante comprise entre 0 Hz et 10 fois la fréquence de commutation est suffisante.

Il est préférable de fournir le courant et la tension directement dans l'analyseur de puissance. Si un transducteur de courant externe est exigé, aucun transformateur de courant conventionnel ne doit être utilisé. Des résistances shunt ou des transducteurs sans flux à large bande passante doivent être utilisés à la place.

La tension fondamentale doit être mesurée aux bornes du moteur à l'aide d'un analyseur de puissance numérique équipé d'un logiciel adapté (FFT, transformée de Fourier rapide – *Fast Fourier Transformation*).

Les filtres internes à la fréquence du réseau des wattmètres numériques doivent être désactivés. Des filtres de synchronisation (également appelés filtres de passage à zéro) n'interférant pas avec le signal peuvent être utilisés.

Pour la mesure de puissance, il est préférable d'appliquer la méthode des trois wattmètres. Tous les câbles utilisés pour la transmission des signaux de mesure doivent être blindés. Il doit être noté que les câbles blindés ne passent pas à travers les transducteurs de courant.

5.1.3 Sortie mécanique du moteur

L'instrumentation utilisée pour mesurer la fréquence d'alimentation doit avoir une précision de $\pm 0,1$ % de la pleine échelle. Il convient que la mesure de la vitesse soit exacte à 0,1 r/min près pour les vitesses allant jusqu'à 3 000 min⁻¹, et à 0,03 % au-delà.

L'instrumentation utilisée pour mesurer le couple doit avoir une classe minimale de 0,2 lorsque le rendement assigné est prévu pour être inférieur à 92 %, de 0,1 sous 95 % et de 0,05 ou mieux pour des rendements plus élevés. Le couple minimal mesuré doit être d'au moins 10 % du couple assigné du dispositif de mesure du couple. Si un instrument de classe supérieure est utilisé, la plage de couples autorisée peut être étendue en conséquence.

5.2 Configuration du convertisseur

5.2.1 Généralités

Pour tous les essais utilisant le convertisseur comparable, il convient de le paramétrer conformément aux exigences du présent document ou, si une combinaison particulière de convertisseur et de moteur doit être soumise aux essais, il convient de paramétrer le convertisseur conformément aux exigences de cette application spécifique. Les réglages de paramètre choisis doivent être indiqués dans le rapport d'essai.

5.2.2 Configuration du convertisseur comparable pour des tensions assignées jusqu'à 1 kV

Le convertisseur comparable doit être considéré comme une source de tension indépendante du courant de la charge.

Il doit être noté que le mode de fonctionnement avec le convertisseur comparable n'est prévu ou exigé pour aucune application commerciale, mais constitue une configuration typique. La configuration du convertisseur comparable a pour objet d'établir des conditions d'essai comparables pour les moteurs conçus pour fonctionner avec des convertisseurs disponibles dans le commerce.

Les conditions de référence définies ci-dessous ne doivent être utilisées que pour la vérification de la conformité aux réglementations nationales relatives au rendement énergétique, en particulier en ce qui concerne la vitesse à 90 % et le point de charge du couple à 100 %. Pour tous les autres objectifs, y compris la procédure d'interpolation conformément à l'Annexe A, il convient d'utiliser de préférence la configuration d'origine du système.

Les conditions de référence suivantes sont définies:

- Convertisseur de source de tension à deux niveaux.
- Aucun composant supplémentaire ayant une incidence sur la tension de sortie ou le courant de sortie ne doit être installé entre le convertisseur comparable et le moteur, à l'exception de ceux exigés pour les instruments de mesure.
- Fonctionnement à la vitesse et au couple assigné à 90 % avec un flux assigné constant (environ 90 % de la tension assignée) pour les machines à induction et synchrones.

NOTE Le flux assigné est défini par la tension assignée donnée sur la plaque signalétique du moteur. Par conséquent, une mesure à la vitesse à 90 % et au point de couple à 100 % avec un flux assigné est entièrement reproductible par les autorités de réglementation.

- Pour les moteurs de vitesse assignée allant jusqu'à $3\,600\text{ min}^{-1}$, la fréquence de commutation ne doit pas dépasser 5 kHz.
- Pour les moteurs de vitesse assignée dépassant $3\,600\text{ min}^{-1}$, la fréquence de commutation ne doit pas dépasser 10 kHz.

Il convient de choisir la section du conducteur du câble du moteur de façon à ce que la chute de tension ne soit pas significative à la charge assignée. Un exemple de configuration d'essai typique peut être consulté dans l'IEC 61800-9-2:2017.

5.2.3 Essais avec des convertisseurs pour des tensions assignées supérieures à 1 kV

Pour les convertisseurs ayant une tension assignée supérieure à 1 kV, il n'est pas possible de spécifier un convertisseur comparable et une longueur de câble acceptables. Ces moteurs, câbles et convertisseurs spécifiques ne peuvent être soumis aux essais qu'en tant que système complet d'entraînement électrique de puissance, car le type de MLI des convertisseurs de fréquence pour des puissances de sortie plus élevées est différent entre les fabricants et est très différent entre l'absence de charge et la charge assignée.

5.2.4 Essais avec d'autres convertisseurs

Les moteurs fonctionnant avec des convertisseurs qui produisent une tension avec un contenu harmonique inférieur par rapport à une alimentation par le convertisseur comparable, par exemple des convertisseurs multiniveaux ou des convertisseurs ayant des fréquences de commutation supérieures, ont typiquement des pertes inférieures par rapport aux mesures effectuées avec le convertisseur comparable à une fréquence de commutation de 4 kHz ou de 8 kHz. Les mesures de référence sur ces moteurs doivent toujours être effectuées sous les conditions de référence données ci-dessus. Les valeurs du rendement du moteur qui ne sont pas mesurées sous les conditions de référence peuvent être fournies dans la documentation du moteur.

6 Méthode d'essai pour la détermination du rendement des moteurs alimentés par convertisseur

6.1 Choix de la méthode de détermination

Pour la vérification des pertes assignées et du rendement énergétique conformément aux systèmes de classification du rendement énergétique, la méthode préférentielle du 6.2 selon le Tableau 1 doit être appliquée.

La méthode préférentielle 2-3-A est obligatoire pour la vérification du rendement assigné déclaré par le fabricant. Cette vérification peut être exigée par les utilisateurs finaux et les organismes de réglementation. Pour le processus de déclaration et les sept points de charge selon l'Annexe A, le fabricant est également libre d'utiliser d'autres méthodes de détermination.

Tableau 1 – Méthodes d'essai préférentielles

Réf	Méthode	Description	Paragraphe	Dispositifs exigés
2-3-A	Mesure directe Entrée-sortie	Mesure du couple	6.2	Couple-mètre ou dynamomètre pour la pleine charge; Alimentation par convertisseur comparable ou spécifique

D'autres méthodes de détermination du rendement conformes aux 6.3, 6.4 et 6.5 peuvent être utilisées pour d'autres exigences, Tableau 2.

Tableau 2 – Autres méthodes d'essai

Réf	Méthode	Description	Paragraphe	Dispositifs exigés
2-3-B	Récapitulatif des pertes	Détermination des pertes supplémentaires hautes fréquences avec convertisseur destiné à l'application finale	6.3	Alimentation sinusoïdale et alimentation par le convertisseur spécifique pour fonctionnement à vide
2-3-C	Autre méthode de détermination du rendement (AEDM – Alternate Efficiency Determination Method)	Calcul par modèle analytique qualifié	6.4	Modèles de base qualifiés et outil de calcul adéquat
2-3-D	Détermination du rendement par calcul	Méthode de calcul pour les moteurs ayant des puissances de sortie assignées supérieures à 2 MW	6.5	Type de MLI du système de conversion spécifique et outil de calcul adéquat

6.2 Méthode 2-3-A – Mesure directe de l'entrée et de la sortie

6.2.1 Installation d'essai

Il s'agit d'une méthode d'essai dans laquelle la puissance mécanique P_{2C} d'une machine est déterminée par la mesure du couple sur l'arbre et de la vitesse. La puissance électrique P_{1C} du stator est mesurée pendant le même essai.

6.2.2 Procédure d'essai

Les essais doivent être réalisés avec le convertisseur et un moteur assemblé, avec les composants essentiels en place, afin d'obtenir des conditions d'essai identiques ou très similaires aux conditions normales de fonctionnement.

Vérifier le décalage (offset) du dispositif de mesure du couple et le régler sur zéro, comme cela est décrit dans l'IEC 60034-2-1:2014.

En cas de machines à aimant permanent, désaccoupler physiquement le moteur en essai, afin d'éviter un couple résiduel induit par les aimants permanents de la machine non alimentée.

Accoupler le moteur en essai à une machine en charge avec un dispositif de mesure du couple.

Appliquer à la machine en essai le couple et la vitesse assignés jusqu'à ce que l'équilibre thermique (variation de 1 K ou moins par demi-heure) ait été atteint.

À la fin du fonctionnement à chaud, enregistrer:

T_C couple de sortie

n vitesse

P_{1C} puissance d'entrée du moteur

Vérifier le décalage (offset) du dispositif de mesure du couple après l'arrêt des machines. Lors de la mesure de plusieurs points de charge, le décalage du dispositif de mesure du couple doit être vérifié seulement après que le dernier point de charge a été mesuré.

Corriger le couple de sortie T_C avec le décalage (offset) déterminé.

6.2.3 Détermination du rendement

Calculer la puissance de sortie:

$$P_{2C} = 2\pi \cdot T_C \cdot n$$

Calculer le rendement:

$$\eta = \frac{P_{2C}}{P_{1C}}$$

Lorsque la différenciation entre les pertes d'alimentation sinusoïdale et les pertes dues au convertisseur est exigée, une mesure sur l'alimentation sinusoïdale immédiatement suivie par une mesure sur l'alimentation par le convertisseur (la machine devant être arrêtée entre les deux) peuvent être effectuées à des tensions fondamentales égales. Cela se fait uniquement pour des machines à induction.

6.2.4 Mesure aux sept points de fonctionnement normalisés

Appliquer la charge à la machine aux sept points de fonctionnement normalisés donnés au Tableau 3.

Le premier point de charge pour cette série d'essais doit être établi après avoir atteint l'équilibre thermique (variation de 1 K ou moins par demi-heure).

Les points de fonctionnement normalisés suivants (2, 3, 4, 5, 6 et 7) doivent être ensuite mesurés rapidement afin de réduire le plus possible les variations de température dans la machine lors de l'essai. En variante, les points de fonctionnement peuvent être mesurés dans l'ordre: 4, 2, 5, 6, 3 et 7.

Chacun des sept points de charge doit être réglé avec une précision de $\pm 1\%$ de la vitesse assignée et $\pm 1\%$ du couple assigné avant l'enregistrement de la puissance d'entrée du moteur.

NOTE Les bonnes pratiques de laboratoire prennent au moins 15 s pour chaque point de charge.

Immédiatement après les mesures des sept points de fonctionnement normalisés, vérifier le décalage (offset) du dispositif de mesure du couple.

6.3 Méthode 2-3-B – Somme des pertes avec détermination des pertes supplémentaires hautes fréquences sous alimentation par convertisseur en fonctionnement à vide

6.3.1 Généralités

L'expérience a démontré que les pertes supplémentaires hautes fréquences du moteur induites par l'alimentation par convertisseur en source de tension sont généralement indépendantes de la charge. Par conséquent, les pertes supplémentaires hautes fréquences induites par l'alimentation par convertisseur peuvent être déterminées à partir d'un essai à vide avec alimentation à la fréquence fondamentale, et à partir d'un essai à vide avec alimentation par le convertisseur. Les pertes supplémentaires hautes fréquences sont la différence entre les pertes mesurées des deux essais.

NOTE Cette procédure ne s'applique pas à tous les types de machines électriques.

6.3.2 Installation d'essai

En plus du convertisseur, une source de tension sinusoïdale conforme à la classe 1 de l'IEC 61000-2-4:2002 doit être disponible pour réaliser ces essais (alimentation sinusoïdale).

Le convertisseur utilisé pour ces essais est le convertisseur spécifique destiné à l'application finale.

6.3.3 Procédure d'essai

La séquence d'essais est la suivante:

- Effectuer un essai à vide avec une alimentation sinusoïdale (fréquence et tension) au point de fonctionnement désigné conformément à l'IEC 60034-2-1:2014 pour la détermination des pertes constantes P_{Csin} .
- Effectuer un essai à vide avec l'alimentation du convertisseur de référence (fréquence et tension) au point de fonctionnement désigné pour la détermination des pertes constantes P_{Ccon} .

Ces mesures doivent être effectuées immédiatement l'une après l'autre.

La différence entre les pertes à vide pour un fonctionnement avec le convertisseur de référence P_{Ccon} et avec une alimentation sinusoïdale P_{Csin} représente les pertes supplémentaires hautes fréquences du moteur:

$$P_{LHL} = P_{Ccon} - P_{Csin}$$

6.3.4 Détermination du rendement

Les pertes supplémentaires hautes fréquences du moteur P_{LHL} doivent être ajoutées aux pertes du moteur à la fréquence fondamentale, telles que déterminées avec une alimentation sinusoïdale conformément à l'IEC 60034-2-1:2014 afin d'obtenir le rendement du moteur fonctionnant avec le convertisseur de fréquence.

Le rendement avec alimentation par le convertisseur est déterminé à partir de la formule suivante:

$$\eta = \frac{P_{2_60034-2-1}}{P_{1_60034-2-1} + P_{LHL}}$$

6.4 2-3-C – Autre méthode de détermination du rendement (AEDM)

Il s'agit du calcul du rendement à l'aide d'un outil parfois appelé modèle analytique. De multiples étapes sont exigées pour qualifier le modèle. Étant donné que les calculs sont influencés par les techniques de fabrication, chaque fabricant doit qualifier son propre modèle analytique. Les conditions suivantes sont exigées pour la qualification du modèle:

- Utilisation d'une procédure d'essai reconnue conformément à 6.2.
- Le laboratoire d'essai doit être qualifié pour effectuer les essais de façon sûre avec la précision exigée.
- Suffisamment de types différents ou de modèles de base choisis pour être soumis aux essais et évalués pour prouver que l'outil est précis pour toute la gamme de produits.
- Un échantillon approprié de chaque modèle de base d'une conception identique doit être soumis à l'essai afin de vérifier que l'outil prédit avec précision le rendement nominal.
- Toutes les entrées reposent sur une analyse statistique qui assure leur exactitude.

NOTE 1 "Approprié" dans ce contexte signifie au moins trois pièces par modèle choisi.

Il convient que les modèles de base choisis varient en puissance assignée, en enveloppe, en vitesse, en caractéristiques électriques et autres caractéristiques physiques ou fonctionnelles qui affectent la consommation ou le rendement énergétique.

NOTE 2 Le développement de l'AEDM en méthode préférentielle alternative est envisagé pour des éditions futures du présent document.

6.5 2-3-D – Détermination du rendement par calcul

Dans le cas de gros moteurs à puissance de sortie assignée supérieure à 2 MW, si les caractéristiques assignées du moteur dépassent les capacités d'essai disponibles, la détermination des pertes supplémentaires hautes fréquences induites par le fonctionnement du convertisseur par calcul peut être une procédure alternative permettant d'obtenir un ordre de grandeur des pertes supplémentaires. Ce calcul doit reposer sur les types de MLI réels du convertisseur et sur les paramètres liés à la fréquence du circuit équivalent du moteur électrique, et en utilisant des modèles de moteur capables de couvrir les effets des hautes fréquences.

7 Interpolation des pertes en tout point de fonctionnement

7.1 Généralités

Pour la détermination des pertes en tout point de fonctionnement, les pertes mesurées ou calculées selon les procédures indiquées dans les paragraphes précédents peuvent être utilisées comme des points d'interpolation. Une fonction d'interpolation est indiquée pour calculer les pertes en tout point de fonctionnement.

Pour les moteurs à induction, il convient qu'à tous les points d'essai, la tension relative du moteur ne soit pas inférieure à sa fréquence relative. Pour les moteurs synchrones conçus pour le fonctionnement à flux/tension bas (par exemple pour des raisons de rendement), la détermination des sept points de charge est permise également pour un flux réduit. Dans ce cas, la réduction du flux doit être indiquée dans la documentation du moteur.

Le premier point de charge (vitesse à 90 % et couple à 100 %) pour cette série d'essais doit être établi après avoir atteint l'équilibre thermique (variation de 1 K ou moins par demi-heure). Il convient que la température aux six autres points de charge soit la plus proche possible de la température du premier point de charge.

Voir l'Annexe B pour un exemple pratique relatif à l'application de la procédure d'interpolation.

7.2 Procédure d'interpolation

Dans le présent article, la vitesse n , le couple T et la puissance P sont utilisés en tant que valeurs relatives (dans la plage 0 ... 1) par rapport à la vitesse de référence n_{ref} , au couple de référence T_{ref} et à la puissance de référence P_{ref} .

La vitesse de référence n_{ref} est la vitesse assignée n_N .

La puissance de référence P_{ref} est la puissance assignée P_N à la vitesse assignée n_N .

Le couple de référence T_{ref} est calculé à partir de la vitesse et de la puissance de référence par:

$$T_{\text{ref}} = \frac{P_{\text{ref}}}{2\pi \cdot n_{\text{ref}}}$$

Dans le cas des machines synchrones, la fréquence d'alimentation relative f est égale à la vitesse relative n .

Dans le cas des machines à induction, la fréquence d'alimentation relative f pour toute vitesse donnée peut être déterminée à partir d'une mesure de la fréquence fondamentale aux bornes du moteur à la vitesse de rotation souhaitée de l'arbre n .

7.3 Détermination analytique des pertes relatives en tout point de fonctionnement

Les pertes en tout point de fonctionnement (vitesse relative n et couple relatif T de 0 ... 1) doivent être obtenues en appliquant la formule d'interpolation suivante:

$$P_L(n, T) = q_{L1} + q_{L2} \cdot n + q_{L3} \cdot n^2 + q_{L4} \cdot n \cdot T^2 + q_{L5} \cdot n^2 \cdot T^2 + q_{L6} \cdot T + q_{L7} \cdot T^2$$

NOTE Les pertes par ventilation à l'Article A.5 dépendent de la vitesse à la puissance au cube. De nombreux essais ont toutefois indiqué que ce terme est peu utilisé dans la pratique. À l'inverse, des erreurs de mesure peu importantes peuvent entraîner des fluctuations significatives. La formule d'interpolation n'a par conséquent pas tenu compte des pertes par ventilation.

La formule d'interpolation se concentre sur les moteurs à induction contrôlés en U/f. Par conséquent, l'extrapolation des pertes peut se révéler inexacte pour $n_{\text{ref}} < 0,25$ et/ou $T_{\text{rel}} < 0,25$. Dans ces cas, les valeurs pour 25 % de la vitesse ou du couple peuvent être utilisées pour les valeurs ci-dessous.

Les points de fonctionnement indiqués dans le Tableau 3 sont de nature normative pour la détermination analytique des constantes d'interpolation $c_{L1} \dots c_{L7}$. Une représentation graphique est donnée à la Figure 1.

Tableau 3 – Points de fonctionnement normatifs

	n	T	P	Commentaire
P_1	0,9	1	0,9	Également inclus dans l'IEC 61800-9-2:2017
P_2	0,5	1	0,5	Également inclus dans l'IEC 61800-9-2:2017
P_3	0,25	1	0,25	
P_4	0,9	0,5	0,45	Également inclus dans l'IEC 61800-9-2:2017
P_5	0,5	0,5	0,25	Également inclus dans l'IEC 61800-9-2:2017
P_6	0,5	0,25	0 125	Également inclus dans l'IEC 61800-9-2:2017
P_7	0,25	0,25	0,0625	

NOTE La numérotation des points est légèrement différente de celle utilisée dans l'IEC 61800-9-2:2017.

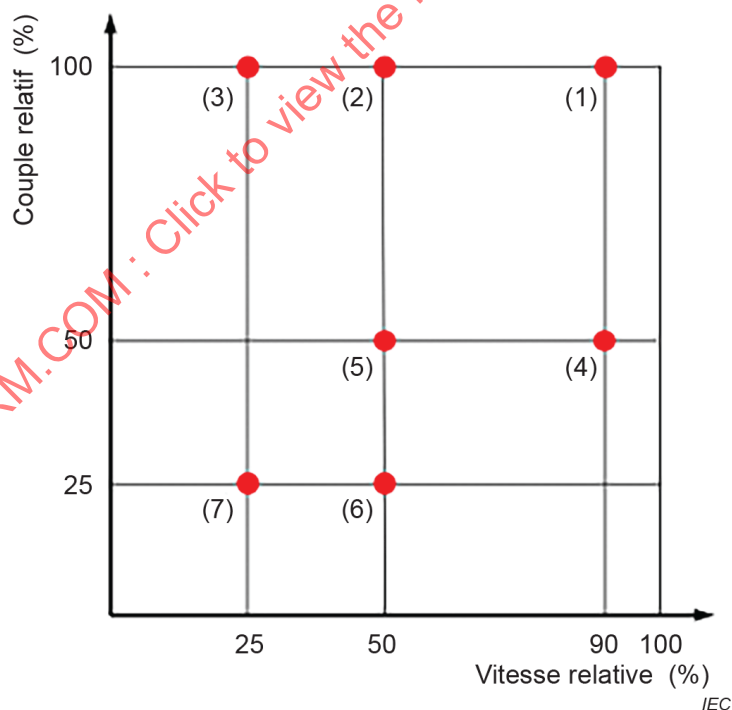


Figure 1 – Points de fonctionnement normalisés

Les formules suivantes doivent servir à déterminer les coefficients d'interpolation:

$$c_{L1} = -\frac{25}{156} \cdot R_{L1} + \frac{529}{780} \cdot R_{L2} - \frac{12}{65} \cdot R_{L3} + \frac{25}{39} \cdot R_{L4} - \frac{103}{39} \cdot R_{L5} - \frac{56}{195} \cdot R_{L6} + \frac{192}{65} \cdot R_{L7}$$