

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**

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60034-2-3:2024



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2024 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 Secretariat
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 It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.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.

IEC Products & Services Portal - products.iec.ch

Discover our powerful search engine and read freely all the publications previews, graphical symbols and the glossary. With a subscription you will always have access to up to date content tailored to your needs.

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary on electrotechnology, containing more than 22 500 terminological entries in English and French, with equivalent terms in 25 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

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.

IEC Products & Services Portal - products.iec.ch

Découvrez notre puissant moteur de recherche et consultez gratuitement tous les aperçus des publications, symboles graphiques et le glossaire. Avec un abonnement, vous aurez toujours accès à un contenu à jour adapté à vos besoins.

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire d'électrotechnologie en ligne au monde, avec plus de 22 500 articles terminologiques en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 25 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

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 978-2-8322-8172-7

**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	9
4 Symbols and abbreviated terms.....	10
5 Basic requirements.....	11
5.1 Instrumentation.....	11
5.1.1 General	11
5.1.2 Power analyser and transducers.....	11
5.1.3 Mechanical output of the motor.....	12
5.2 Converter set-up.....	12
5.2.1 General	12
5.2.2 Comparable converter set-up for rated voltages up to 1 kV.....	12
5.2.3 Converters with rated voltages above 1 kV	13
5.2.4 Testing with other converters.....	13
5.3 Ambient temperature during testing	13
5.4 State of the motor under test.....	13
6 Test method for the determination of the efficiency of converter-fed motors.....	14
6.1 Selection of determination method	14
6.2 Method 2-3-A – Direct measurement of input and output.....	14
6.2.1 Test set-up	14
6.2.2 Test procedure	14
6.2.3 Efficiency determination	15
6.2.4 Measurement at seven standardized operating points.....	15
6.3 Method 2-3-B – Summation of losses with determination of additional high frequency loss at converter supply at no-load operation.....	16
6.3.1 General	16
6.3.2 Test set-up	16
6.3.3 Test procedure	16
6.3.4 Efficiency determination	16
6.4 Method 2-3-C – Alternate Efficiency Determination Method (AEDM)	17
6.5 Method 2-3-D – Determination of efficiency by calculation	17
7 Interpolation of motor losses at any operating point.....	17
7.1 General.....	17
7.2 Definitions	18
7.3 Interpolation and extrapolation of relative losses at any operating point.....	18
7.4 Determination of interpolation coefficients.....	19
7.4.1 General	19
7.4.2 Analytical determination	20
7.4.3 Numerical determination.....	21
7.5 Alternate operating points to determine interpolation coefficients	21
7.6 Optional determination of interpolation error	23
Annex A (informative) Losses of AC motors	24
A.1 General.....	24
A.2 Stator and rotor winding I^2R losses P_{LSR} ($P_{LS} + P_{LR}$).....	24

A.3	Iron losses (P_{Lfe}).....	25
A.4	Additional load losses (P_{LL}).....	25
A.5	Friction and windage losses (P_{Lfw}).....	25
A.6	Additional high frequency losses (P_{LHL}).....	26
Annex B (informative) Exemplary determination of losses and efficiency at various load points.....		27
B.1	General.....	27
B.2	Determination of the interpolation coefficients.....	27
B.3	Calculation of losses and efficiency for certain operating points.....	28
Annex C (informative) Loss interpolation for different winding connections		30
Annex D (informative) Examples for additional load points for the numerical interpolation procedure		32
Bibliography.....		34
Figure 1 – Standardized operating points.....		20
Figure C.1 – Connection Y or D, ranges a and b		30
Figure C.2 – Connection Y ► D, ranges a and b		31
Figure C.3 – Connection Y ► YY, range a		31
Figure D.1 – Example for additional load points mainly in the over speed area		32
Figure D.2 – Example for additional load points in the overload and over speed area		33
Table 1 – Preferred test methods.....		14
Table 2 – Other test methods.....		14
Table 3 – Normative operating points.....		20
Table 4 – Non-normative alternate operating points		22
Table A.1 – Recommended split of windage and friction losses for IC 411 self-ventilated motors		26
Table B.1 – Name plate data.....		27
Table B.2 – Reference values		27
Table B.3 – Losses for the 7 operating points		28
Table B.4 – Interpolation coefficients		28
Table B.5 – User-defined operating points		29
Table B.6 – Calculated losses for the user-defined operating points		29

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) IEC draws attention to the possibility that the implementation of this document may involve the use of (a) patent(s). IEC takes no position concerning the evidence, validity or applicability of any claimed patent rights in respect thereof. As of the date of publication of this document, IEC had not received notice of (a) patent(s), which may be required to implement this document. However, implementers are cautioned that this may not represent the latest information, which may be obtained from the patent database available at <https://patents.iec.ch>. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

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

This second edition cancels and replaces the first edition of IEC 60034-2-3 published in 2020. This edition constitutes a technical revision.

This edition includes the following significant technical changes with respect to the previous edition:

- a) Harmonization of requirements and procedures with IEC 60034-2-1.
- b) Extension of the interpolation procedure to the field weakening range.

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

Draft	Report on voting
2/2164/FDIS	2/2179/RVD

Full information on the voting for its approval can be found in the report on voting indicated in the above table.

The language used for the development of this International Standard is English.

This document was drafted in accordance with ISO/IEC Directives, Part 2, and developed in accordance with ISO/IEC Directives, Part 1 and ISO/IEC Directives, IEC Supplement, available at www.iec.ch/members_experts/refdocs. The main document types developed by IEC are described in greater detail at www.iec.ch/publications.

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 webstore.iec.ch in the data related to the specific document. At this date, the document will be

- reconfirmed,
- withdrawn, or
- revised.

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

INTRODUCTION

The 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. Results determined according to this document are intended to allow comparison of losses and efficiency of different motors if 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 motor under test.

The losses determined with the comparable converter as defined in 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, if fed from a converter, motor losses are higher than during operation on a nominally sinusoidal system, even though the converter normally enables vast energy savings overall on system level, when the motor and the load application can be operated with variable speed. 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.

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 torque for a specific speed. 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 motor under test. It is not applicable to medium voltage motors.

Limitations for the application of the comparable converter

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 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, then the pulse pattern of the converter is required. Such procedures are not part of this document.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60034-2-3:2024

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. The motor is then part of a variable frequency power drive system (PDS) as defined in IEC 61800-9-2.

Applying the approach of the comparable converter, the motor efficiency determined by use of this document is applicable for comparison of different low voltage motor designs only. The comparable converter approach is not applicable to medium voltage motors.

This document also specifies procedures to determine motor losses at any load point (torque, speed) within the constant flux range (constant torque range, base speed range), the field weakening range and the overload 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 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, *Rotating electrical machines – Part 1: Rating and performance*

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

IEC 60034-30-1, *Rotating electrical machines – Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors (IE code)*

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

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

IEC 61800-9-2, *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, IEC 60034-2-1 as well as the following apply.

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

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

3.1

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)

3.2

constant flux 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). Within the constant flux range, the maximum motor torque is constant (constant torque range), if constant flux control is used. Constant flux range can also be called base speed range.

3.3

field weakening range

speed range above the speed where the motor can be supplied with a voltage that changes in proportion to the speed. Therefore, the magnetic flux in this speed range is reduced in relation to constant flux range.

3.4

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 higher frequencies.

3.5

motor losses with converter supply

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

3.6

multi-level voltage source converter

frequency converter topology, where the output voltage (phase-to-ground) is switched in three or more steps or levels up to the maximum possible output value of both positive and negative voltage

3.7

switching event

operation sequence of one semiconductor with switching once on and switching once off

3.8

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) of the motor

3.9

thermal equilibrium

steady state temperature level of a motor which is reached, if the rate of change of temperature is 1 K or less per half hour

3.10

two-level voltage source converter

frequency converter topology, where the output voltage (phase-to-ground) is switched between two levels

Note 1 to entry: For a two-level converter, the pulse frequency measured phase to phase is two times the switching frequency defined in 3.8 in case of continuous modulation and about 1,33 times the switching frequency defined in 3.8 in case of discontinuous modulation.

4 Symbols and abbreviated terms

c_{BH}	Loss separation coefficient for friction and windage losses and hysteresis losses
c_{Con}	Winding connection coefficient
c_{fe}	Loss separation coefficient for hysteresis losses and eddy current losses
c_{LL}	Loss separation coefficient for additional load losses
c_{Volt}	Voltage coefficient
c_{WHf}	Loss separation coefficient for winding losses and high frequency losses
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
n	Speed, s^{-1}
n_N	Rated speed, s^{-1}
n_{ref}	Reference speed, s^{-1}
n_{FW}	Relative speed at which field weakening range starts,
P	Power, W
P_{Ccon}	Constant losses if supplied by a converter, W
P_{Csin}	Constant losses at sinusoidal supply according to IEC 60034-2-1, 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 if supplied by a converter, W
$P_{1_60034-2-1}$	Motor input power at sinusoidal supply according to IEC 60034-2-1, W
$P_{2\text{C}}$	Motor output power if supplied by a converter, W
$P_{2_60034-2-1}$	Motor output power at sinusoidal supply according to IEC 60034-2-1, W
PWM	Pulse width modulation
T	Motor torque, Nm
T_{C}	Motor torque if supplied by a converter, 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.

If testing electric motors 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 5 s but not more than 60 s and this average shall be used for the determination of efficiency.

For winding temperature measurements, the methods described in IEC 60034-2-1 shall be used. The resistance method is preferred.

5.1.2 Power analyser and transducers

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

The instrumentation for measuring power and current at the motor input shall meet the requirements of IEC 60034-2-1. 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 apparent power at rated operation of the motor or better for the rated power at 50 Hz or 60 Hz. This is the total uncertainty of the power meter including possible sensors.

NOTE 1 For example, if 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 must be 0,2 % or less 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 so that the error in the measurement of total calculated 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.

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 may be used for frequencies 10-times higher than the switching frequency. Synchronization filters (also known as zero-cross filters) that are not in the signal path may be used additionally.

For power measurement, the three-wattmeter method is preferred. All cables used to transmit measurement signals shall be shielded. It must 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 $0,1 \text{ min}^{-1}$ for speeds up to $3\,600 \text{ min}^{-1}$, and 0,03 % above.

The instrumentation used to measure the torque shall have a minimum class of 0,2 if the rated efficiency is below 92 %, 0,1 below 95 % and 0,05 or better for higher efficiencies, when applying the preferred method as in Table 1. In case of applying method 2-3-B according to Table 2, the instrumentation shall follow the requirements of IEC 60034-2-1 as minimum. 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 shall be understood as a voltage source independent of load current.

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 motor efficiency regulations, in particular the 90 % speed and 100 % torque load point. For all other purposes including the interpolation procedure, preferably the original system configuration should be used.

The following reference conditions are defined:

- The converter shall be a two-level voltage source converter type.
- 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.
- Operation with constant flux (approx. 90 % of rated voltage) for both induction motors and synchronous motors unless otherwise explicitly defined in the motor documentation.

NOTE The rated flux is defined by the rated voltage given on the name plate of the motor. Rated flux at 90 % speed results in 90 % rated voltage. Different flux levels may be defined by the motor manufacturer by defining the preferable motor terminal voltage at 90 % speed explicitly in the motor documentation. Therefore, a measurement at the 90 % speed and 100 % torque point with preferred 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.

5.2.3 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 5 kHz or 10 kHz switching frequency. Reference measurements on such motors shall still be performed under the reference conditions as given in 5.2.2. Motor efficiency values measured under non-reference conditions can be provided in the motor documentation.

5.3 Ambient temperature during testing

The ambient temperature should be in the range of 15 °C to 40 °C.

5.4 State of the motor under test

Tests shall be conducted on an assembled motor with the essential components in place, to obtain test conditions equal or very similar to normal operating conditions. For handling of sealing systems for efficiency classification related measurements see IEC 60034-30-1 or IEC TS 60034-30-2.

It is preferable that the motor be selected randomly from series production without special considerations.

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 2-3-A according to Table 1 shall be applied.

For the efficiency verification by regulators or end-users, the preferred method 2-3-A is mandatory for verification of rated efficiency declared by the manufacturer. For the declaration process and the seven load points according to Table 3 or Table 4 the manufacturer is free to use other applicable determination methods also.

Table 1 – Preferred test methods

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

Alternate efficiency determining methods according to 2-3-B, 2-3-C and 2-3-D may be used for any other purpose apart from efficiency verification by regulators, see Table 2.

Table 2 – Other test methods

Reference	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 motor is determined by measurement of the shaft torque and speed. The electrical input power P_{1C} of the motor 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.

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

Operate the motor under test at rated torque and speed until thermal equilibrium has been reached.

At the end of the test, record:

U	Terminal voltage
I	Line current
T_C	Output torque
n	Speed
P_{1C}	Motor input power
ϑ_C	Coolant temperature

Immediately after the test, the drift of the torque measuring device shall be checked. In case of permanent magnet motors, physically uncouple the motor under test, to avoid residual torque in unexcited condition induced by permanent magnets. In case of a deviation above the allowed tolerance of the torque measuring device, adjust it and repeat the measurements. If measuring several load points, the torque measuring device offset shall 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:

$$P_{2C} = 2\pi \times T_C \times n \quad (1)$$

Calculate the efficiency:

$$\eta = \frac{P_{2C}}{P_{1C}} \quad (2)$$

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

6.2.4 Measurement at seven standardized operating points

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

The measurements for the first load point for this test series shall be conducted after thermal equilibrium 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 motor 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 1 Good lab practice takes at least 15 s for each load point.

NOTE 2 The allowed accuracy for setting the load points typically does not result in significant deviations for the measured losses in the respective load points.

Immediately after the seven standardized operating point measurements, check the drift 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 1 This procedure is not applicable to all types of electrical machines.

NOTE 2 Method 2-3-B is an additional test procedure to verify efficiency for a specific load point with the specific converter and its specific setting for the load point to be tested. For these conditions, the additional high frequency motor loss can be considered independent of load. Method 2-3-B is not intended to be used for the determination of the seven load points (Clause 7).

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.

In principle, this procedure may also be used to determine the additional high frequency loss at converter supply for the seven standardized operating points given in Table 3. In this case each measurement shall be based on the thermal conditions of the first load point. This means that the motor shall reach thermal equilibrium at 90 % rated speed and 100 % rated torque before the designated load point is adjusted and the measurement made.

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 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:

$$P_{LHL} = P_{Ccon} - P_{Csin} \quad (3)$$

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 to obtain the motor efficiency under frequency converter operation.

The efficiency at converter supply is determined from:

$$\eta = \frac{P_{2_60034-2-1}}{P_{1_60034-2-1} + P_{LHL}} \quad (4)$$

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

This represents the calculation of the efficiency with an analytical or numerical 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 were tested and evaluated to prove the tool is accurate across all products.
- An adequate number of samples of each base model of an identical design shall be tested to verify that the tool accurately predicts losses and nominal efficiency respectively.
- All input data are based on a statistical analysis that ensures their accuracy.

The calculations shall be based on a reference ambient temperature of 25 °C.

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

The base models 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. For the time being, see reference in the Bibliography (Electronic Code of Federal Regulations (e-CFR), Title 10) for more detailed information on the AED method.

6.5 Method 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 motor 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 for determining interpolation points. In this chapter, interpolation procedures are given to calculate the losses in any operating point between standstill ($n = 0$) and twice the rated speed ($n = 2$) and between no-load ($T = 0$) and twice the rated torque ($T = 2$).

The procedures apply both to synchronous and asynchronous (induction) motors.

For both induction and synchronous motors the motor voltage should preferably match the conditions in the original system configuration. If this requires the voltage varying from a U/f characteristic for induction motors or MTPA for synchronous motors, this shall be noted in the motor documentation.

NOTE If the original system configuration is unknown, U/f may be applied for induction motors or MTPA for synchronous motors.

The first load point (90 % of rated speed and 100 % of rated torque) for this test series shall be conducted after thermal equilibrium 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 Definitions

In Clause 7, speed n , torque T and the power P are used as relative values (within the range 0 ... 2) 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:

$$T_{\text{ref}} = \frac{P_{\text{ref}}}{2\pi \times n_{\text{ref}}} \quad (5)$$

The rated current I_N is the current in the normal motor connection according to the rating plate, that is either Y or D-connection.

A voltage coefficient is defined to take voltage drops in the frequency converter and deviations between the rated motor voltage and the input voltage to the frequency converter into account.

$$c_{\text{Volt}} = \frac{U_{\text{inv}}}{U_N} \times 0,95 \quad (6)$$

where

U_{inv} is the actual input voltage at the inverter;

U_N is the rated motor voltage.

7.3 Interpolation and extrapolation of relative losses at any operating point

The losses at any operating point shall be obtained by applying the following interpolation formulas. If interpolation in the field-weakening range is intended, two additional coefficients c_{WHf} and c_{BH} are required.

The relative speed, at which the field weakening range is starting, is given by:

$$n_{\text{FW}} = c_{\text{Volt}} \times c_{\text{con}} \quad (7)$$

For rated conditions the coefficient c_{con} is 1. Other scenarios are covered by Annex C.

Range a – constant flux range ($n = 0 \dots n_{\text{FW}}$, $T = 0 \dots 2$):

$$P_L(n, T) = c_{L1} + c_{L2} \times n + c_{L3} \times n^2 + c_{L4} \times n \times T^2 + c_{L5} \times n^2 \times T^2 + c_{L6} \times T + c_{L7} \times T^2 \quad (8)$$

Range b – field weakening range ($n = n_{\text{FW}} \dots 2$, $T = 0 \dots 2 \cdot n_{\text{FW}} / n$):

$$\begin{aligned} P_L(n, T) = & c_{L1} \cdot \left(c_{\text{WHf}} \cdot \frac{1}{(n - (n_{\text{FW}} - 1))^2} - c_{\text{WHf}} \cdot T^2 + T^2 \cdot (n - (n_{\text{FW}} - 1))^2 + (1 - c_{\text{WHf}}) \right) \\ & + c_{L2} \cdot \left(c_{\text{BH}} \cdot n + (1 - c_{\text{BH}}) \cdot \frac{n_{\text{FW}}}{(n - (n_{\text{FW}} - 1))} \right) + n_{\text{FW}}^2 \cdot c_{L3} + c_{L4} \cdot (n - (n_{\text{FW}} - 1))^2 \cdot n \cdot T^2 \\ & + c_{L5} \cdot (n - (n_{\text{FW}} - 1))^2 \cdot n^2 \cdot T^2 + c_{L6} \cdot T \cdot (n - (n_{\text{FW}} - 1)) + c_{L7} \cdot T^2 \cdot (n - (n_{\text{FW}} - 1))^2 \end{aligned} \quad (9)$$

NOTE 1 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 $n < 0,25$ and/or $T < 0,25$. In these cases the values for 25 % speed or torque may be used for values below.

Depending on the magnetic nonlinearity of the motor design, loss extrapolation may be inaccurate for loads exceeding rated torque, that is $T > 1$ (Range a), $T > n_{\text{FW}} / n$ (Range b).

NOTE 2 The simplified loss modelling can also cause inaccuracies below rated speed and rated torque for motors controlled with other methods than *U/f* control, especially for synchronous motors with high magnetic saliency due to their nonlinear inductance characteristic and effect on iron and winding losses.

Furthermore, the simplification of the loss modelling can cause additional inaccuracies in the field weakening range for $n > n_{\text{FW}}$.

7.4 Determination of interpolation coefficients

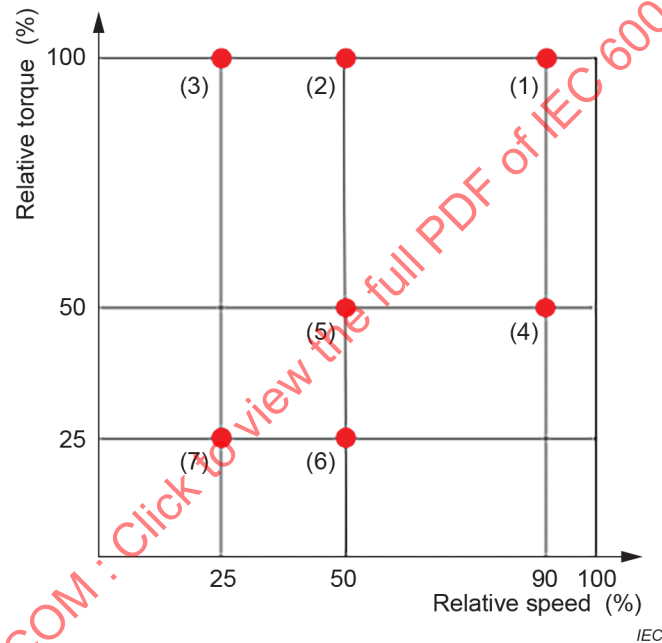
7.4.1 General

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
P_1	0,9	1	0,9	Also included in IEC 61800-9-2
P_2	0,5	1	0,5	Also included in IEC 61800-9-2
P_3	0,25	1	0,25	
P_4	0,9	0,5	0,45	Also included in IEC 61800-9-2
P_5	0,5	0,5	0,25	Also included in IEC 61800-9-2
P_6	0,5	0,25	0,125	Also included in IEC 61800-9-2
P_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.

**Figure 1 – Standardized operating points**

7.4.2 Analytical determination

For the analytical determination of the interpolation coefficients the losses in the seven operating points that are all located in the constant flux range shall be evaluated. The interpolation coefficients can then be determined from the losses in these points by a set of analytical formulas. This approach usually results in good interpolation accuracy within the constant flux speed range.

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

$$c_{L1} = -\frac{25}{156} \cdot R_{L1} + \frac{529}{780} \cdot R_{L2} - \frac{12}{65} \cdot R_{L3} + \frac{25}{39} \cdot R_{L4} - \frac{103}{39} \cdot R_{L5} - \frac{56}{195} \cdot R_{L6} + \frac{192}{65} \cdot R_{L7} \quad (10)$$

$$c_{L2} = \frac{25}{26} \cdot R_{L1} - \frac{599}{390} \cdot R_{L2} + \frac{112}{195} \cdot R_{L3} - \frac{50}{13} \cdot R_{L4} + \frac{50}{13} \cdot R_{L5} + \frac{1\,792}{195} \cdot R_{L6} - \frac{1\,792}{195} \cdot R_{L7} \quad (11)$$

$$c_{L3} = -\frac{50}{39} \cdot R_{L1} + \frac{22}{13} \cdot R_{L2} - \frac{16}{39} \cdot R_{L3} + \frac{200}{39} \cdot R_{L4} - \frac{200}{39} \cdot R_{L5} - \frac{256}{39} \cdot R_{L6} + \frac{256}{39} \cdot R_{L7} \quad (12)$$

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

$$c_{L5} = \frac{200}{39} \cdot R_{L1} - \frac{152}{13} \cdot R_{L2} + \frac{256}{39} \cdot R_{L3} - \frac{200}{39} \cdot R_{L4} + \frac{200}{39} \cdot R_{L5} + \frac{256}{39} \cdot R_{L6} - \frac{256}{39} \cdot R_{L7} \quad (14)$$

$$c_{L6} = -2 \cdot R_{L2} + 10 \cdot R_{L5} - 8 \cdot R_{L6} \quad (15)$$

$$c_{L7} = \frac{25}{39} \cdot R_{L1} - \frac{181}{195} \cdot R_{L2} + \frac{192}{65} \cdot R_{L3} - \frac{25}{39} \cdot R_{L4} - \frac{287}{39} \cdot R_{L5} + \frac{1616}{195} \cdot R_{L6} - \frac{192}{65} \cdot R_{L7} \quad (16)$$

NOTE 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).

For the above outlined extrapolation to the field-weaking range b, two more coefficients c_{WHf} and c_{BH} are required.

The coefficient c_{WHf} describes the loss separation of the winding losses due to the magnetizing current (c_{WHf}) and the high frequency losses ($1 - c_{WHf}$). If a detailed loss separation is not known, the value of 1 should be chosen for c_{WHf} as the high frequency losses can normally be neglected in comparison to the I^2R -losses of the magnetizing current.

The coefficient c_{BH} describes the loss separation of the friction and windage losses (c_{BH}) and the hysteresis losses ($1 - c_{BH}$). If a detailed loss separation is not known, an equal loss separation should be chosen ($c_{BH} = 0,5$).

7.4.3 Numerical determination

To achieve good interpolation accuracy, particularly in the field-weaking range, it is recommended to determine motor losses in a larger number of operating points, for example 16 or 20 points. Preferably, some of these operating points should be in the field weakening region ($n > 1$) and in the overload region ($T > 1$). The additional operating points shall be chosen under consideration of specific load requirements. Annex D shows typical examples for additional load points.

The 7+2 interpolation coefficients (c_{L1} , c_{L2} , ..., c_{L7} , c_{WHf} , c_{BH}) can then be determined 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.

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 7.4.

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. If 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:

$$c_{L1} = -\frac{1}{9} \cdot R_{L1}^* + \frac{28}{45} \cdot R_{L2} - \frac{8}{45} \cdot R_{L3} + \frac{4}{9} \cdot R_{L4}^* - \frac{22}{9} \cdot R_{L5} - \frac{8}{45} \cdot R_{L6} + \frac{128}{45} \cdot R_{L7} \quad (17)$$

$$c_{L2} = \frac{2}{3} \cdot R_{L1}^* - \frac{6}{5} \cdot R_{L2} + \frac{8}{15} \cdot R_{L3} - \frac{8}{3} \cdot R_{L4}^* + \frac{8}{3} \cdot R_{L5} + \frac{128}{15} \cdot R_{L6} - \frac{128}{15} \cdot R_{L7} \quad (18)$$

$$c_{L3} = -\frac{8}{9} \cdot R_{L1}^* + \frac{56}{45} \cdot R_{L2} - \frac{16}{45} \cdot R_{L3} + \frac{32}{9} \cdot R_{L4}^* - \frac{32}{9} \cdot R_{L5} - \frac{256}{45} \cdot R_{L6} + \frac{256}{45} \cdot R_{L7} \quad (19)$$

$$c_{L4} = -\frac{8}{3} \cdot R_{L1}^* + \frac{56}{5} \cdot R_{L2} - \frac{128}{15} \cdot R_{L3} + \frac{8}{3} \cdot R_{L4}^* - \frac{8}{3} \cdot R_{L5} - \frac{128}{15} \cdot R_{L6} + \frac{128}{15} \cdot R_{L7} \quad (20)$$

$$c_{L5} = \frac{32}{9} \cdot R_{L1}^* - \frac{416}{45} \cdot R_{L2} + \frac{256}{45} \cdot R_{L3} - \frac{32}{9} \cdot R_{L4}^* + \frac{32}{9} \cdot R_{L5} + \frac{256}{45} \cdot R_{L6} - \frac{256}{45} \cdot R_{L7} \quad (21)$$

$$c_{L6} = -2 \cdot R_{L2} + 10 \cdot R_{L5} - 8 \cdot R_{L6} \quad (22)$$

$$c_{L7} = \frac{4}{9} \cdot R_{L1}^* - \frac{28}{45} \cdot R_{L2} + \frac{128}{45} \cdot R_{L3} - \frac{4}{9} \cdot R_{L4}^* - \frac{68}{9} \cdot R_{L5} + \frac{368}{45} \cdot R_{L6} - \frac{128}{45} \cdot R_{L7} \quad (23)$$

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.

The interpolation error Q_{ISI} (interpolation stability index) for a total of $n = 1 \dots N$ operating points is then given by:

$$Q_{\text{ISI}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_n \left(\frac{P_{L,n}^{\text{determined}} - P_{L,n}^{\text{interpolated}}}{P_{L,n}^{\text{determined}}} \right)^2} \quad (24)$$

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60034-2-3:2024

Annex A (informative)

Losses of AC motors

A.1 General

This Annex A 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 torque values if 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_{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

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

b) Rotor winding losses

$$P_{\text{LR}}(n, T) = P_{\text{LR}}(n_{\text{N}}, T_{\text{N}}) \cdot \left(\frac{T}{T_{\text{N}}} \right)^2 \quad (\text{A.2})$$

c) Total winding losses

$$P_{\text{LSR}}(n, T) = P_{\text{LS}}(n_{\text{N}}, T_{\text{N}}) \cdot \left[\left(\frac{I_0}{I_{\text{N}}} \right)^2 + \left(1 - \left(\frac{I_0}{I_{\text{N}}} \right)^2 \right) \cdot \left(\frac{T}{T_{\text{N}}} \right)^2 \right] + P_{\text{LR}}(n_{\text{N}}, T_{\text{N}}) \cdot \left(\frac{T}{T_{\text{N}}} \right)^2 \quad (\text{A.3})$$

A.3 Iron losses (P_{Lfe})

Iron losses can be separated in two parts:

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

If the exact distribution of these two parts is not known, an equal distribution ($c_{fe} = 0,5$) 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.

$$P_{Lfe}(n, T) = c_{fe} \cdot P_{Lfe}(n_N, T_N) \cdot \frac{n}{n_N} + (1 - c_{fe}) \cdot P_{Lfe}(n_N, T_N) \cdot \left(\frac{n}{n_N}\right)^2 \quad (A.4)$$

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

If the exact distribution of additional load losses is unknown, an equal distribution ($c_{LL} = 0,5$) 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.

$$P_{LL}(f, T) = c_{LL} \cdot P_{LL}(n_N, T_N) \cdot \left(\frac{T}{T_N}\right)^2 \cdot \frac{n}{n_N} + (1 - c_{LL}) \cdot P_{LL}(n_N, T_N) \cdot \left(\frac{T}{T_N}\right)^2 \cdot \left(\frac{n}{n_N}\right)^2 \quad (A.5)$$

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

Friction and windage losses can be split in two parts:

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

Table A.1 gives recommended values for c_f 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_f	$(1 - c_f)$
3 000 to 3 600	0,2	0,8
> 1 800 to < 3 000	0,3	0,7
1 500 to 1 800	0,4	0,6
> 1 200 to < 1 500	0,55	0,45
1 000 to 1 200	0,7	0,3
< 1 000	0,8	0,2

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.

$$P_{Lfw}(n, T) = c_f \cdot P_{Lfw}(n_N, T_N) \cdot \frac{n}{n_N} + (1 - c_f) \cdot P_{Lfw}(n_N, T_N) \left(\frac{n}{n_N} \right)^3 \quad (A.6)$$

NOTE The cubic dependency of the friction and windage losses on speed is not directly covered by a respective cubic term in the interpolation formula of Clause 7. This is a conscious simplification to reduce complexity of the interpolation. In the considered speed range, the dependency is well-covered by the square term of the interpolation formula.

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 if the converter switching frequency remains unchanged:

$$P_{LHL}(n, T) = P_{LHL}(n_N, T_N) \quad (A.7)$$

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 a converter only motor (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}	$= (5\,500\text{ W}) / (2\pi \times 3\,000 / 60\text{ 1/s})$ $= 17,5$	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 motor.

For example, see Table B.3.

Table B.3 – Losses for the 7 operating points

Quantity	Symbol	Losses 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 Nm, 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 7.4.

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, if 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 1/min	Torque Nm	Relative operating time %	Computed output power 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 W	Efficiency
$= 400 / 3\,000$ $= 0,133\,3$	$= 1 / 17,5$ $= 0,057\,1$	0,003 2	$= 0,003\,2 \cdot 5\,500$ $= 18$	$= 42 / (42 + 18)$ $= 70,3\,\%$
$= 1\,400 / 3\,000$ $= 0,466\,7$	$= 5 / 17,5$ $= 0,285\,7$	0,018 3	$= 0,018\,3 \cdot 5\,500 = 100$	$= 733 / (733 + 100)$ $= 88,0\,\%$
$= 2\,800 / 3\,000$ $= 0,933\,3$	$= 15 / 17,5$ $= 0,857\,1$	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:

Average energy loss per cycle: $0,1 \times 18\,W + 0,6 \times 100\,W + 0,3 \times 411\,W = 185\,W$.

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

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

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

Annex C (informative)

Loss interpolation for different winding connections

The inter- and extrapolation procedures are applicable to three different motor connections. The motor connection is characterized by a connection coefficient c_{con} .

Each connection can be operated in two speed ranges:

Range a: Constant flux (base speed) range. (dark blue – normal load; light blue – overload condition).

Range b: Field-weakening (reduced flux) range. (dark yellow – normal load; light yellow – overload).

The relative speed, at which the field weakening range is starting, is given by:

$$n_{\text{FW}} = c_{\text{Volt}} \times c_{\text{con}} \quad (\text{C.1})$$

Connection Y or D: Motors connected for operation at grid frequency and grid voltage. This operation is applicable to motors in star-connection (Y) or in delta-connection (D), Figure C.1.

The connection coefficient is set to: $c_{\text{con}} = 1$.

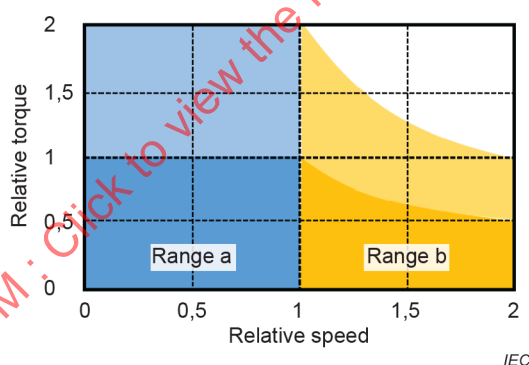


Figure C.1 – Connection Y or D, ranges a and b

Connection Y ► D: Motors connected for operation at 1,732-times grid frequency and grid voltage.

This operation is applicable to motors that were originally designed for star-connection (Y) but are permanently connected in delta-connection (D), Figure C.2.

The connection coefficient is set to: $c_{\text{con}} = 1,732$.

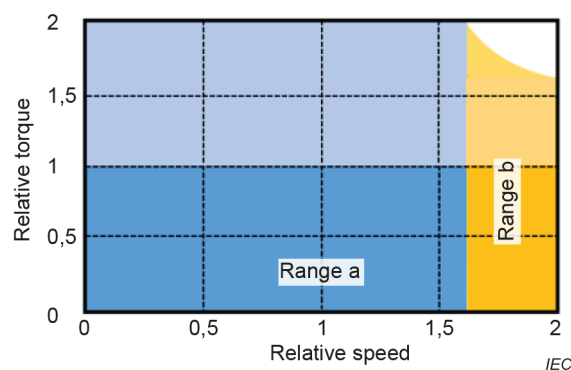


Figure C.2 – Connection Y ► D, ranges a and b

Connection Y ► YY: Motors connected for operation at 2-times grid frequency and grid voltage. This operation is applicable to motors that were originally designed for star-connection (Y) but are permanently connected in double star-connection (YY), Figure C.3.

The connection coefficient is set to: $c_{\text{con}} = 2$.

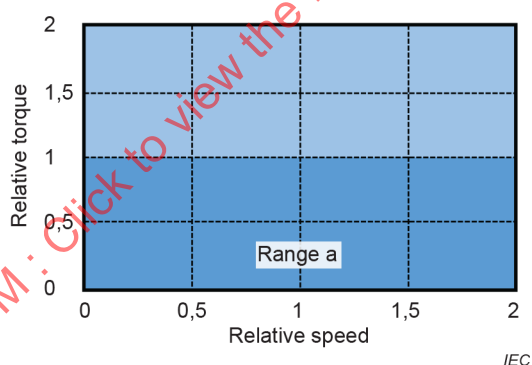


Figure C.3 – Connection Y ► YY, range a

Annex D (informative)

Examples for additional load points for the numerical interpolation procedure

See Figure D.1 and Figure D.2.

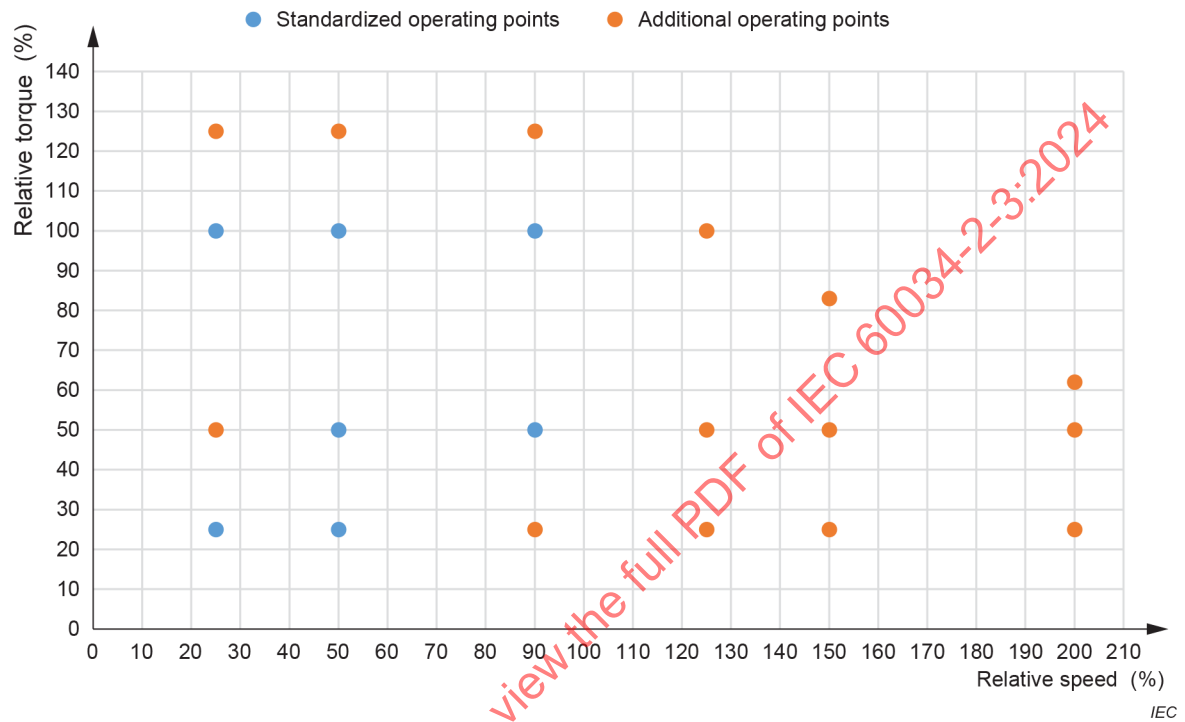


Figure D.1 – Example for additional load points mainly in the over speed area

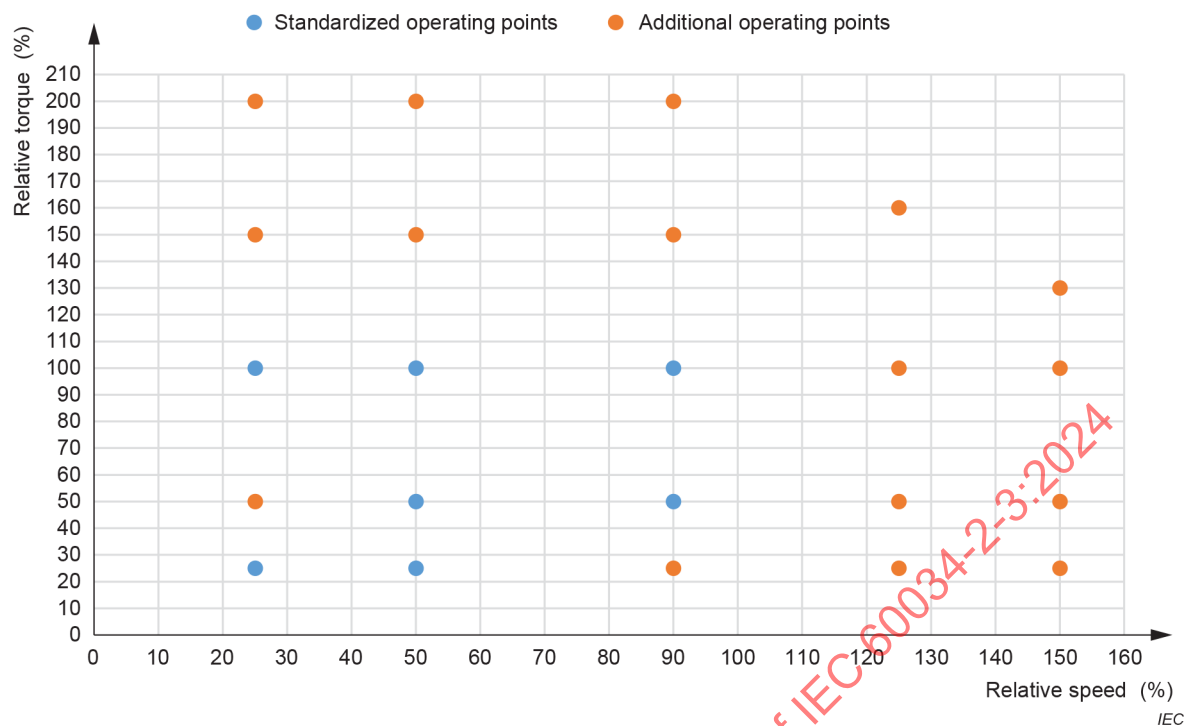


Figure D.2 – Example for additional load points in the overload and over speed area

Bibliography

IEC TS 60034-25:2022, *Rotating electrical machines – Part 25: AC electrical machines used in power drive systems – Application guide*

IEC TS 60034-31:2021, *Rotating electrical machines – Part 31: Selection of energy-efficient motors including variable speed applications – Application guidelines*

IEC 61800-2:2021, *Adjustable speed electrical power drive systems – Part 2: General requirements – Rating specifications for adjustable speed AC power drive systems*

Electronic Code of Federal Regulations (e-CFR), Title 10 – Energy, Chapter ii – Department of energy, Subchapter d – Energy conservation, part 431 – Energy efficiency program for certain commercial and industrial equipment, Subpart B – *Electric Motors Test Procedures, Materials Incorporated and Methods of Determining Efficiency*: § 431.17 Determination of efficiency

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60034-2-3:2024

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60034-2-3:2024

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	38
INTRODUCTION	40
1 Domaine d'application	42
2 Références normatives	42
3 Termes et définitions	43
4 Symboles et abréviations	44
5 Exigences fondamentales	45
5.1 Instrumentation	45
5.1.1 Généralités	45
5.1.2 Analyseur de puissance et transducteurs	46
5.1.3 Sortie mécanique du moteur	46
5.2 Configuration du convertisseur	47
5.2.1 Généralités	47
5.2.2 Configuration du convertisseur comparable pour des tensions assignées jusqu'à 1 kV	47
5.2.3 Convertisseurs avec des tensions assignées supérieures à 1 kV	47
5.2.4 Essais avec d'autres convertisseurs	48
5.3 Température ambiante pendant les essais	48
5.4 État du moteur en essai	48
6 Méthode d'essai pour la détermination du rendement des moteurs alimentés par convertisseur	48
6.1 Choix de la méthode de détermination	48
6.2 Méthode 2-3-A – Mesure directe des puissances d'entrée et de sortie	49
6.2.1 Montage d'essai	49
6.2.2 Procédure d'essai	49
6.2.3 Détermination du rendement	50
6.2.4 Mesure aux sept points de fonctionnement normalisés	50
6.3 Méthode 2-3-B – Somme des pertes avec détermination des pertes supplémentaires hautes fréquences avec alimentation par convertisseur en fonctionnement à vide	50
6.3.1 Généralités	50
6.3.2 Montage d'essai	51
6.3.3 Procédure d'essai	51
6.3.4 Détermination du rendement	51
6.4 Méthode 2-3-C – Autre méthode de détermination du rendement (AEDM)	52
6.5 Méthode 2-3-D – Détermination du rendement par calcul	52
7 Interpolation des pertes du moteur en tout point de fonctionnement	52
7.1 Généralités	52
7.2 Définitions	53
7.3 Interpolation et extrapolation des pertes relatives en tout point de fonctionnement	53
7.4 Détermination des coefficients d'interpolation	54
7.4.1 Généralités	54
7.4.2 Détermination analytique	55
7.4.3 Détermination numérique	56
7.5 Autres points de fonctionnement qui permettent de déterminer les coefficients d'interpolation	56

7.6	Détermination facultative de l'erreur d'interpolation	58
Annexe A (informative)	Pertes des moteurs à courant alternatif	59
A.1	Généralités	59
A.2	Pertes dans l'enroulement du stator et du rotor $I^2 R P_{LSR} (P_{LS} + P_{LR})$	59
A.3	Pertes dans le fer (P_{Lfe})	60
A.4	Pertes supplémentaires en charge (P_{LL})	60
A.5	Pertes par frottement et par ventilation (P_{Lfw})	60
A.6	Pertes supplémentaires hautes fréquences (P_{LHL})	61
Annexe B (informative)	Exemple de détermination des pertes et du rendement en différents points de charge	62
B.1	Généralités	62
B.2	Détermination des coefficients d'interpolation	62
B.3	Calcul des pertes et du rendement pour certains points de fonctionnement	63
Annexe C (informative)	Interpolation des pertes pour différentes connexions d'enroulement	65
Annexe D (informative)	Exemples de points de charge supplémentaires pour la procédure d'interpolation numérique	67
Bibliographie		69
Figure 1	– Points de fonctionnement normalisés	55
Figure C.1	– Connexion en Y ou en D, Plages a et b	65
Figure C.2	– Connexion en Y ► D, Plages a et b	66
Figure C.3	– Connexion en Y ► YY, plage a	66
Figure D.1	– Exemple de points de charge supplémentaires principalement dans la zone de survitesse	67
Figure D.2	– Exemple de points de charge supplémentaires dans la zone de surcharge et de survitesse	68
Tableau 1	– Méthodes d'essai préférentielles	48
Tableau 2	– Autres méthodes d'essai	49
Tableau 3	– Points de fonctionnement normatifs	55
Tableau 4	– Autres points de fonctionnement non normatifs	57
Tableau A.1	– Répartition recommandée des pertes par frottement et par ventilation pour les moteurs autoventilés IC 411	61
Tableau B.1	– Données de plaque signalétique	62
Tableau B.2	– Valeurs de référence	62
Tableau B.3	– Pertes pour les sept points de fonctionnement	63
Tableau B.4	– Coefficients d'interpolation	63
Tableau B.5	– Points de fonctionnement définis par l'utilisateur	64
Tableau B.6	– Pertes calculées pour les points de fonctionnement définis par l'utilisateur	64

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'IEC attire l'attention sur le fait que la mise en application du présent document peut entraîner l'utilisation d'un ou de plusieurs brevets. L'IEC ne prend pas position quant à la preuve, à la validité et à l'applicabilité de tout droit de brevet revendiqué à cet égard. À la date de publication du présent document, l'IEC n'avait pas reçu notification qu'un ou plusieurs brevets pouvaient être nécessaires à sa mise en application. Toutefois, il y a lieu d'avertir les responsables de la mise en application du présent document que des informations plus récentes sont susceptibles de figurer dans la base de données de brevets, disponible à l'adresse <https://patents.iec.ch>. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets.

L'IEC 60034-2-3 a été établie par le comité d'études 2 de l'IEC: Machines tournantes. Il s'agit d'une Norme internationale.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition de l'IEC 60034-2-3 parue en 2020. Cette édition constitue une révision technique.

Cette édition inclut les modifications techniques majeures suivantes par rapport à l'édition précédente:

- a) harmonisation des exigences et procédures avec l'IEC 60034-2-1;
- b) extension de la procédure d'interpolation à la plage d'affaiblissement du champ.

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

Projet	Rapport de vote
2/2164/FDIS	2/2179/RVD

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

La langue employée pour l'élaboration de cette Norme internationale est l'anglais.

Le présent document a été rédigé selon les Directives ISO/IEC, Partie 2. Il a été développé selon les Directives ISO/IEC, Partie 1 et les Directives ISO/IEC, Supplément IEC, disponibles sous www.iec.ch/members_experts/refdocs. Les principaux types de documents développés par l'IEC sont décrits plus en détail sous www.iec.ch/publications.

Une liste de toutes les parties de la série IEC 60034, publiées sous le titre général *Machines électriques tournantes*, se trouve 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 webstore.iec.ch dans les données relatives au document recherché. À cette date, le document sera

- reconduit,
- supprimé, ou
- révisé.

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

L'objet 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 nominale sinusoïdale, déterminées par les méthodes de l'IEC 60034-2-1. Les résultats déterminés selon le présent document permettent de comparer les pertes et le rendement de différents moteurs s'ils sont alimentés par convertisseur.

De plus, le présent document décrit sept points de fonctionnements normalisés qui permettent de définir les pertes et le rendement sur l'ensemble de la plage des couples/vitesses. Une procédure d'interpolation qui permet 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 spécifiques 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 du moteur en essai.

Les pertes déterminées avec un convertisseur comparable, comme cela est défini dans le 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 de 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 sur un réseau nominale sinusoïdal, même si le convertisseur permet normalement de réaliser d'importantes économies d'énergie globales au niveau du système, si le moteur et la charge appliquée peuvent fonctionner à vitesse variable. 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 plus d'informations, voir l'IEC TS 60034-25.

L'objet 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 beaucoup avec le couple pour une vitesse spécifique. 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 aux réglementations nationales en matière de rendement énergétique, le présent document décrit un convertisseur dit comparable utilisé pour les essais des moteurs à basse tension.

En principe, le convertisseur comparable représente une source de tension à contenu type d'harmoniques à haute fréquence qui alimente le moteur en essai. Il ne s'applique pas aux moteurs moyenne tension.

Limitations relatives à l'application du convertisseur comparable

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, ce 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.

Des écarts sont également attendus pour les moteurs entraînés par des convertisseurs de source de tension ou de source de courant multiniveaux 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 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, le type de MLI du convertisseur est exigé. Ces procédures ne relèvent pas du présent document.

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. Le moteur est alors considéré comme faisant partie intégrante d'un système d'entraînement électrique de puissance (PDS) à fréquence variable, comme cela est défini dans l'IEC 61800-9-2.

Avec l'approche du convertisseur comparable, le rendement du moteur déterminé par l'utilisation du présent document s'applique uniquement à la comparaison de différentes conceptions de moteurs basse tension. L'approche du convertisseur comparable ne s'applique pas aux moteurs moyenne tension.

Le présent document spécifie également des procédures de détermination des pertes du moteur en tout point de charge (couple, vitesse) dans la plage de flux constants (plage de couples constants, plage de vitesses de base), la plage d'affaiblissement du champ et la plage de surcharge 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 pour un fonctionnement à fréquence variable et alimenté en tension variable.

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités dans le texte de sorte qu'ils 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, *Machines électriques tournantes – Partie 1: Caractéristiques assignées et caractéristiques de fonctionnement*

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

IEC 60034-30-1, *Machines électriques tournantes – Partie 30-1: Classes de rendement pour les moteurs à courant alternatif alimentés par le réseau (code IE)*

IEC TS 60034-30-2, *Rotating electrical machines – Part 30-2: Efficiency classes of variable speed AC motors (Ie-code)* (disponible en anglais seulement)

IEC 61000-2-4, *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, *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 de l'IEC 60034-1, de l'IEC 60034-2-1 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 <https://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <https://www.iso.org/obp>

3.1

pertes supplémentaires hautes fréquences

les pertes supplémentaires hautes fréquences sont générées dans le moteur par les formes d'onde de tension et de courant non sinusoïdales produites par le convertisseur, et s'ajoutent aux pertes dans le fer, aux pertes par frottement et par ventilation, aux pertes dans l'enroulement du rotor, aux pertes dans l'enroulement du stator et aux pertes supplémentaires en charge (pertes dues à la fréquence fondamentale)

3.2

plage de flux constants

plage de vitesses comprise entre l'arrêt et la vitesse la plus élevée à laquelle le moteur peut être alimenté par une tension qui varie proportionnellement à la vitesse, de façon que le flux magnétique reste constant (rapport U/f constant). Dans la plage de flux constants, le couple maximal du moteur est constant (plage de couples constants), si un contrôle du flux constant est utilisé. La plage de flux constants peut également être appelée plage de vitesses de base.

3.3

plage d'affaiblissement du champ

plage de vitesses au-dessus de la vitesse à laquelle le moteur peut être alimenté avec une tension qui varie proportionnellement à la vitesse. Par conséquent, le flux magnétique dans cette plage de vitesses est réduit en fonction de la plage de flux constants.

3.4

pertes dues à la fréquence fondamentale

Les pertes dues à la fréquence fondamentale dans le moteur peuvent être séparées en cinq composantes: les pertes dans le fer (qui varient avec la fréquence du moteur et la tension fondamentale appliquée), les pertes par frottement et par ventilation (qui varient avec la vitesse du moteur), les pertes dans l'enroulement du rotor, les pertes dans l'enroulement du stator et les pertes supplémentaires en charge (qui varient toutes trois avec le courant du moteur). Les pertes dues à la fréquence fondamentale d'un moteur qui fonctionne sous l'application d'une tension assignée à la fréquence fondamentale qui ne contient pas de plus hautes fréquences

3.5

pertes du moteur avec alimentation par le convertisseur

si 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

3.6

convertisseur de source de tension multiniveaux

topologie de convertisseur de fréquence où la tension de sortie (phase-terre) est commutée en au moins trois pas ou niveaux jusqu'à la valeur de sortie maximale possible de la tension, en valeur positive et en valeur négative

3.7

événement de commutation

séquence de fonctionnement d'un semiconducteur avec une mise en marche et une mise à l'arrêt

3.8

fréquence de commutation

nombre d'événements de commutation 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) du moteur

3.9

équilibre thermique

niveau de température en régime établi d'un moteur, qui est atteint si le taux de variation de la température est inférieur ou égal à 1 K par demi-heure

3.10

convertisseur de source de tension à deux niveaux

topologie de convertisseur de fréquence où la tension de sortie (phase-terre) est commutée en deux niveaux

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 3.8 en cas de modulation continue, et à environ 1,33 fois la fréquence de commutation définie en 3.8 en cas de modulation discontinue.

4 Symboles et abréviations

c_{BH}	Coefficient de séparation des pertes pour les pertes par frottement et par ventilation et les pertes par hystérésis
c_{Con}	Coefficient de connexion des enroulements
c_{fe}	Coefficient de séparation des pertes pour les pertes hystérésis et les pertes par courants de Foucault
c_{LL}	Coefficient de séparation des pertes pour les pertes supplémentaires en charge
c_{Volt}	Coefficient de tension
c_{WHf}	Coefficient de séparation des pertes pour les pertes dans les enroulements et les pertes hautes fréquences
f	Fréquence, 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
MTPA (Maximum Torque Per Ampere)	Couple maximal par ampère
n	Vitesse, s^{-1}

n_N	Vitesse assignée, s^{-1}
n_{ref}	Vitesse de référence, s^{-1}
n_{FW}	Vitesse relative à laquelle la plage d'affaiblissement du champ commence,
P	Puissance, W
P_{Ccon}	Pertes constantes en cas d'alimentation par un convertisseur, W
P_{Csin}	Pertes constantes avec alimentation sinusoïdale conformément à l'IEC 60034-2-1, W
PDS (Power Drive System)	Entraînement électrique de puissance
P_{LHL}	Pertes supplémentaires hautes fréquences de l'alimentation par le convertisseur, W
P_N	Puissance assignée, W
P_{ref}	Puissance de référence, W
P_{1C}	Puissance d'entrée du moteur en cas d'alimentation par un convertisseur, W
$P_{1_60034-2-1}$	Puissance d'entrée du moteur avec alimentation sinusoïdale conformément à l'IEC 60034-2-1, W
P_{2C}	Puissance de sortie du moteur en cas d'alimentation par un convertisseur, W
$P_{2_60034-2-1}$	Puissance de sortie du moteur avec alimentation sinusoïdale conformément à l'IEC 60034-2-1, W
MLI	Modulation de largeur d'impulsion
T	Couple du moteur, Nm
T_C	Couple du moteur en cas d'alimentation par un 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.

Lors de l'essai des moteurs électriques en charge, des fluctuations lentes de la puissance de sortie et d'autres grandeurs mesurées peuvent être inévitables. Par conséquent, pour chaque point de charge, de nombreuses lectures doivent être effectuées automatiquement à l'aide d'un compteur numérique approprié sur une période d'au moins 5 s, mais de 60 s au maximum, et cette moyenne doit être utilisée pour la détermination du rendement.

Pour les mesures de température des enroulements, les méthodes décrites dans l'IEC 60034-2-1 doivent être utilisées. La méthode de résistance est privilégiée.

5.1.2 Analyseur de puissance et transducteurs

Compte tenu des hautes fréquences impliquées dans les convertisseurs qui alimentent 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 exactitude suffisante.

L'instrumentation pour mesurer la puissance et le courant à l'entrée du moteur doit satisfaire aux exigences de l'IEC 60034-2-1. 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 du moteur en fonctionnement assigné ou mieux pour la puissance assignée à 50 Hz ou 60 Hz. Il s'agit de l'incertitude totale du wattmètre qui comprend les capteurs éventuels.

NOTE 1 Par exemple, si un moteur triphasé a une tension assignée de 400 V et un courant assigné de 10 A, alors l'incertitude sur la puissance active du wattmètre doit être inférieure ou 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 que l'erreur de mesure de la puissance active calculée totale pour toute la plage de fréquences (au-dessus 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.

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 (TFR, transformation de Fourier rapide).

Les filtres internes à la fréquence du réseau des wattmètres numériques peuvent être utilisés pour des fréquences 10 fois supérieures à la fréquence de commutation. Des filtres de synchronisation (également appelés filtres de passage à zéro) qui n'interfèrent pas avec le signal peuvent en outre 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 exactitude de $\pm 0,1$ % de la pleine échelle.

Il convient que la mesure de la vitesse soit exacte à $0,1 \text{ min}^{-1}$ près pour les vitesses inférieures ou égales à $3\,600 \text{ min}^{-1}$, et à 0,03 % près pour les vitesses supérieures.

L'instrumentation utilisée pour mesurer le couple doit avoir une classe minimale de 0,2 si le rendement assigné est inférieur à 92 %, de 0,1 s'il est inférieur à 95 % et de 0,05 ou mieux pour des rendements plus élevés, en appliquant la méthode préférentielle selon le Tableau 1. Si la méthode 2-3-B selon le Tableau 2 est appliquée, l'instrumentation doit au minimum respecter les exigences de l'IEC 60034-2-1. Le couple minimal mesuré doit être égal à au moins 10 % du couple assigné du dispositif de mesure du couple. Si un appareil de classe supérieure est utilisé, la plage des valeurs de couple autorisée peut être élargie en conséquence.

5.2 Configuration du convertisseur

5.2.1 Généralités

Pour tous les essais qui utilisent 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.

Le mode de fonctionnement avec le convertisseur comparable n'est prévu ou demandé pour aucune application commerciale, mais constitue une configuration type. 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 du moteur, 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, il convient d'utiliser de préférence la configuration d'origine du système.

Les conditions de référence suivantes sont définies:

- le convertisseur doit être un convertisseur de source de tension à deux niveaux;
- aucun composant supplémentaire qui a 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 appareils de mesure;
- fonctionnement à la vitesse et au couple assigné à 90 %;
- fonctionnement avec un flux assigné constant (environ 90 % de la tension assignée) pour les moteurs à induction et les moteurs synchrones, sauf indication contraire explicite dans la documentation du moteur;

NOTE Le flux assigné est défini par la tension assignée donnée sur la plaque signalétique du moteur. Le flux assigné à la vitesse à 90 % donne une tension assignée à 90 %. Différents niveaux de flux peuvent être définis par le fabricant du moteur, en définissant la tension préférable aux bornes du moteur à la vitesse à 90 % de manière explicite dans la documentation du moteur. Par conséquent, une mesure à la vitesse à 90 % et au point de couple à 100 % avec un flux préférentiel est entièrement reproductible par les autorités de réglementation.

- pour les moteurs de vitesse assignée inférieure ou égale à $3\,600\text{ min}^{-1}$, la fréquence de commutation ne doit pas dépasser 5 kHz;
- pour les moteurs de vitesse assignée supérieure à $3\,600\text{ min}^{-1}$, la fréquence de commutation ne doit pas dépasser 10 kHz.

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

5.2.3 Convertisseurs avec des tensions assignées supérieures à 1 kV

Pour les convertisseurs qui ont une tension assignée supérieure à 1 kV, un convertisseur comparable et une longueur de câble généralement acceptés ne peuvent pas être spécifiés. Ces moteurs, câbles et convertisseurs spécifiques ne peuvent être soumis aux essais qu'en tant que système d'entraînement électrique de puissance complet, car le type de MLI des convertisseurs de fréquence pour des puissances de sortie plus élevées varie 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 qui fonctionnent 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 qui ont des fréquences de commutation supérieures, ont généralement des pertes inférieures par rapport aux mesures obtenues avec le convertisseur comparable à une fréquence de commutation de 5 kHz ou de 10 kHz. Les mesures de référence sur ces moteurs doivent toujours être obtenues sous les conditions de référence données en 5.2.2. Les valeurs de rendement du moteur qui ne sont pas mesurées sous les conditions de référence peuvent être fournies dans la documentation du moteur.

5.3 Température ambiante pendant les essais

Il convient que la température ambiante se situe dans la plage comprise entre 15 °C et 40 °C.

5.4 État du moteur en essai

Les essais doivent être effectués sur un moteur assemblé avec les composants essentiels en place, afin d'obtenir des conditions d'essai identiques aux conditions normales de fonctionnement ou très proches de celles-ci. Pour la manipulation des systèmes d'étanchéité pour les mesures liées à la classification du rendement, voir l'IEC 60034-30-1 ou l'IEC TS 60034-30-2.

Il est préférable de choisir le moteur de manière aléatoire à partir d'une production en série, sans considérations particulières.

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 2-3-A selon le Tableau 1 doit être appliquée.

Pour la vérification du rendement par les organismes de réglementation ou les utilisateurs finaux, la méthode préférentielle 2-3-A est obligatoire pour la vérification du rendement assigné déclaré par le fabricant. Pour le processus de déclaration et les sept points de charge selon le Tableau 3 ou le Tableau 4, le fabricant est également libre d'utiliser d'autres méthodes de détermination applicables.

Tableau 1 – Méthodes d'essai préférentielles

Référence	Méthode	Description	Paragraphe	Dispositifs exigés
2-3-A	Mesure directe Entrée-sortie	Mesure du couple	6.2	Dispositif de mesure du couple pour la pleine charge; alimentation par convertisseur comparable ou spécifique

D'autres méthodes de détermination du rendement conformes aux méthodes 2-3-B, 2-3-C et 2-3-D peuvent être utilisées à d'autres fins que la vérification du rendement par les organismes de réglementation (voir le Tableau 2).

Tableau 2 – Autres méthodes d'essai

Référence	Méthode	Description	Paragraphe	Dispositifs exigés
2-3-B	Sommation 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 avec 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 des puissances d'entrée et de sortie

6.2.1 Montage d'essai

Il s'agit d'une méthode d'essai dans laquelle la puissance mécanique P_{2C} d'un moteur est déterminée par la mesure du couple sur l'arbre et de la vitesse. La puissance électrique d'entrée P_{1C} du moteur 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 aux conditions normales de fonctionnement ou très proches de celles-ci.

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

Appliquer au moteur en essai le couple et la vitesse assignés jusqu'à atteindre l'équilibre thermique.

À la fin de l'essai, enregistrer:

- U tension aux bornes;
- I courant de ligne;
- T_C couple de sortie;
- n vitesse;
- P_{1C} puissance d'entrée du moteur;
- ϑ_C température du fluide de refroidissement.

Immédiatement après l'essai, la dérive du dispositif de mesure du couple doit être vérifiée. En cas de moteurs à aimant permanent, désaccoupler physiquement le moteur en essai, pour éviter un couple résiduel induit par les aimants permanents du moteur non alimenté. En cas d'écart supérieur à la tolérance admissible du dispositif de mesure du couple, le régler et répéter les mesurages. Lorsque plusieurs points de charge sont mesurés, le décalage du dispositif de mesure du couple doit être vérifié seulement après le mesurage du dernier point de charge.

Corriger le couple de sortie T_C avec le décalage déterminé.

6.2.3 Détermination du rendement

Calculer la puissance de sortie:

$$P_{2C} = 2\pi \times T_C \times n \quad (1)$$

Calculer le rendement:

$$\eta = \frac{P_{2C}}{P_{1C}} \quad (2)$$

NOTE Lorsque la différenciation entre les pertes d'alimentation sinusoïdale et les pertes dues au convertisseur est exigée, un mesurage sur l'alimentation sinusoïdale immédiatement suivi par un mesurage sur l'alimentation par le convertisseur (le moteur devant être arrêté entre les deux) peuvent être effectués à des tensions fondamentales égales. Cela s'applique uniquement aux moteurs à induction.

6.2.4 Mesure aux sept points de fonctionnement normalisés

Appliquer la charge au moteur aux sept points de fonctionnement normalisés donnés dans le Tableau 3.

Les mesurages au premier point de charge de cette série d'essais doivent être réalisés après avoir atteint l'équilibre thermique.

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 le moteur lors de l'essai. En variante, les points de fonctionnement peuvent être mesurés dans l'ordre suivant: 4, 2, 5, 6, 3 et 7.

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

NOTE 1 Les bonnes pratiques de laboratoire prennent au moins 15 s pour chaque point de charge.

NOTE 2 L'exactitude admise pour régler les points de charge n'entraîne généralement pas d'écarts significatifs pour les pertes mesurées aux points de charge respectifs.

Immédiatement après le mesurage des sept points de fonctionnement normalisés, vérifier la dérive du dispositif de mesure du couple.

6.3 Méthode 2-3-B – Sommation des pertes avec détermination des pertes supplémentaires hautes fréquences avec 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 de source de tension sont en général fondamentalement 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 convertisseur. Les pertes supplémentaires hautes fréquences sont la différence entre les pertes mesurées des deux essais.

NOTE 1 Cette procédure ne s'applique pas à tous les types de machines électriques.

NOTE 2 La méthode 2-3-B est une procédure d'essai supplémentaire pour vérifier le rendement d'un point de charge spécifique avec le convertisseur spécifique et son réglage spécifique pour le point de charge à soumettre à l'essai. Pour ces conditions, les pertes supplémentaires hautes fréquences du moteur peuvent être considérées comme indépendantes de la charge. La méthode 2-3-B n'est pas destinée à être utilisée pour la détermination des sept points de charge (Article 7).

6.3.2 Montage 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 nominale sinusoïdale).

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

En principe, cette procédure peut également être utilisée pour déterminer les pertes supplémentaire hautes fréquences avec alimentation par convertisseur pour les sept points de fonctionnement normalisés indiqués dans le Tableau 3. Dans ce cas, chaque mesure doit reposer sur les conditions thermiques du premier point de charge. Cela signifie que le moteur doit atteindre l'équilibre thermique à la vitesse assignée à 90 % et au couple assigné à 100 % avant le réglage du point de charge désigné et avant le mesurage.

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 pour la détermination des pertes constantes P_{Csin} ;
- effectuer un essai à vide avec l'alimentation par le convertisseur d'essai (fréquence et tension) au point de fonctionnement désigné pour la détermination des pertes constantes P_{Ccon} .

Ces mesurages doivent être effectués immédiatement l'un après l'autre.

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

$$P_{LHL} = P_{Ccon} - P_{Csin} \quad (3)$$

6.3.4 Détermination du rendement

Les pertes supplémentaires hautes fréquences du moteur P_{LHL} doivent être ajoutées aux pertes du moteur dues à la fréquence fondamentale, déterminées avec une alimentation sinusoïdale conformément à l'IEC 60034-2-1, pour obtenir le rendement du moteur en fonctionnement avec le convertisseur de fréquence.

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

$$\eta = \frac{P_{2_60034-2-1}}{P_{1_60034-2-1} + P_{LHL}} \quad (4)$$

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

Il s'agit du calcul du rendement avec un modèle analytique ou numérique. 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 au 6.2;
- le laboratoire d'essai doit être qualifié pour effectuer les essais de manière fiable avec l'exactitude exigée;
- suffisamment de types différents ou de modèles de base ont été soumis aux essais et évalués pour prouver que l'outil est exact pour toute la gamme de produits;
- un nombre adéquat d'échantillons de chaque modèle de base d'une conception identique doit être soumis à l'essai afin de vérifier que l'outil prédit avec exactitude les pertes et le rendement nominal, respectivement;
- toutes les données d'entrée reposent sur une analyse statistique qui assure leur exactitude.

Les calculs doivent reposer sur une température ambiante de référence de 25 °C.

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

Il convient en général que les modèles de base varient en puissance assignée, en enveloppe, en vitesse, en caractéristiques électriques et autres caractéristiques physiques ou fonctionnelles variables qui influencent 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. Pour le moment, consulter la référence de la Bibliographie (Electronic Code of Federal Regulations (e-CFR), Title 10) pour plus d'informations sur la méthode AED.

6.5 Méthode 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, en utilisant des modèles de moteurs capables de couvrir les effets des hautes fréquences.

7 Interpolation des pertes du moteur 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 pour déterminer les points d'interpolation. Dans le présent article, des procédures d'interpolation sont données pour calculer les pertes en tout point de fonctionnement entre l'arrêt ($n = 0$) et le double de la vitesse assignée ($n = 2$) et entre le fonctionnement à vide ($T = 0$) et le double du couple assigné ($T = 2$).

Les procédures s'appliquent à la fois aux moteurs synchrones et asynchrones (à induction).

Pour les moteurs à induction et les moteurs synchrones, il convient de préférence que la tension du moteur corresponde aux conditions de la configuration d'origine du système. Si cela exige de faire varier la tension par rapport à une caractéristique U/f pour les moteurs à induction ou par rapport au MTPA pour les moteurs synchrones, cela doit être indiqué dans la documentation du moteur.

NOTE Si la configuration d'origine du système n'est pas connue, Ulf peut être appliquée pour les moteurs à induction ou le MTPA pour les moteurs synchrones.

Le premier point de charge (90 % de la vitesse assignée et 100 % du couple assigné) pour cette série d'essais doit être établi après avoir atteint l'équilibre thermique. 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 Définitions

À l'Article 7, la vitesse n , le couple T et la puissance P sont utilisés en tant que valeurs relatives (dans la plage 0 ... 2) 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:

$$T_{\text{ref}} = \frac{P_{\text{ref}}}{2\pi \times n_{\text{ref}}} \quad (5)$$

Le courant assigné I_N est le courant dans la connexion normale du moteur selon la plaque signalétique, qui est soit une connexion en Y soit une connexion en D.

Un coefficient de tension est défini pour prendre en compte les chutes de tension dans le convertisseur de fréquence et les écarts entre la tension assignée du moteur et la tension d'entrée dans le convertisseur de fréquence.

$$c_{\text{Volt}} = \frac{U_{\text{inv}}}{U_N} \times 0,95 \quad (6)$$

où

U_{inv} est la tension d'entrée réelle au niveau de l'onduleur.

U_N est la tension assignée du moteur.

7.3 Interpolation et extrapolation des pertes relatives en tout point de fonctionnement

Les pertes en tout point de fonctionnement doivent être obtenues en appliquant les formules d'interpolation suivantes. Si une interpolation dans la plage d'affaiblissement du champ est prévue, deux coefficients supplémentaires c_{WHf} et c_{BH} sont exigés.

La vitesse relative, à laquelle la plage d'affaiblissement du champ commence, est donnée par:

$$n_{\text{FW}} = c_{\text{Volt}} \times c_{\text{con}} \quad (7)$$

Pour les conditions assignées, le coefficient c_{con} est égal à 1. D'autres scénarios sont couverts par l'Annexe C.

Plage a – plage de flux constants ($n = 0 \dots n_{FW}$, $T = 0 \dots 2$):

$$R_L(n, T) = c_{L1} + c_{L2} \times n + c_{L3} \times n^2 + c_{L4} \times n \times T^2 + c_{L5} \times n^2 \times T^2 + c_{L6} \times T + c_{L7} \times T^2 \quad (8)$$

Plage b – plage d'affaiblissement du champ ($n = n_{FW} \dots 2$, $T = 0 \dots 2 \cdot n_{FW} / n$):

$$\begin{aligned} R_L(n, T) = & c_{L1} \cdot \left(c_{WHf} \cdot \frac{1}{(n - (n_{FW} - 1))^2} - c_{WHf} \cdot T^2 + T^2 \cdot (n - (n_{FW} - 1))^2 + (1 - c_{WHf}) \right) \\ & + c_{L2} \cdot \left(c_{BH} \cdot n + (1 - c_{BH}) \cdot \frac{n_{FW}}{(n - (n_{FW} - 1))} \right) + n_{FW}^2 \cdot c_{L3} + c_{L4} \cdot (n - (n_{FW} - 1))^2 \cdot n \cdot T^2 \\ & + c_{L5} \cdot (n - (n_{FW} - 1))^2 \cdot n^2 \cdot T^2 + c_{L6} \cdot T \cdot (n - (n_{FW} - 1)) + c_{L7} \cdot T^2 \cdot (n - (n_{FW} - 1))^2 \end{aligned} \quad (9)$$

NOTE 1 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 ne tient par conséquent pas 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 $n < 0,25$ et/ou $T < 0,25$. Dans ce cas, les valeurs pour 25 % de la vitesse ou du couple peuvent être utilisées pour les valeurs ci-dessous.

Selon la non-linéarité magnétique de la conception du moteur, l'extrapolation des pertes peut être inexacte pour les charges qui dépassent le couple assigné, c'est-à-dire $T > 1$ (Plage a), $T > n_{FW} / n$ (Plage b).

NOTE 2 La modélisation simplifiée des pertes peut également entraîner des inexactitudes au-dessous de la vitesse assignée et du couple assigné pour les moteurs contrôlés par d'autres méthodes que le contrôle en U/f , en particulier pour les moteurs synchrones à haute saillance magnétique en raison de leur caractéristique d'inductance non linéaire et de leur effet sur les pertes dans le fer et les enroulements.

En outre, la simplification de la modélisation des pertes peut entraîner des inexactitudes supplémentaires dans la plage d'affaiblissement du champ pour $n > n_{FW}$.

7.4 Détermination des coefficients d'interpolation

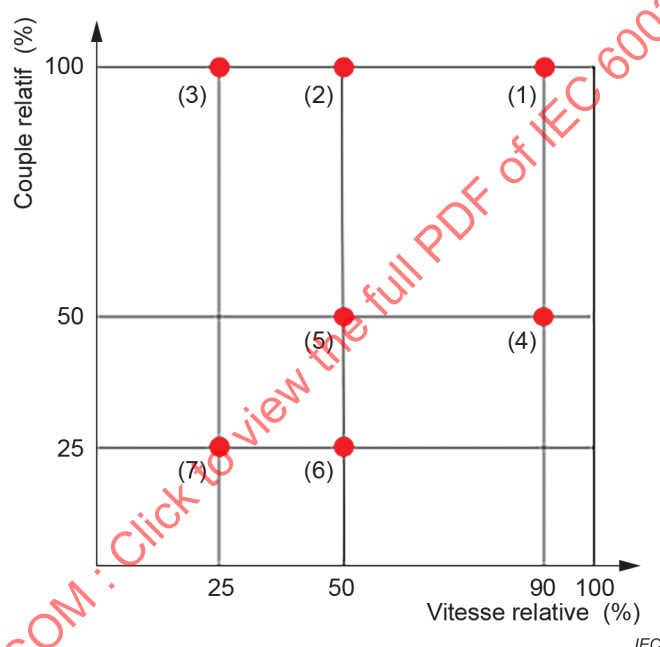
7.4.1 Généralités

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

	<i>n</i>	<i>T</i>	<i>P</i>	Commentaire
P_1	0,9	1	0,9	Également inclus dans l'IEC 61800-9-2
P_2	0,5	1	0,5	Également inclus dans l'IEC 61800-9-2
P_3	0,25	1	0,25	
P_4	0,9	0,5	0,45	Également inclus dans l'IEC 61800-9-2
P_5	0,5	0,5	0,25	Également inclus dans l'IEC 61800-9-2
P_6	0,5	0,25	0,125	Également inclus dans l'IEC 61800-9-2
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.

**Figure 1 – Points de fonctionnement normalisés**

7.4.2 Détermination analytique

Pour la détermination analytique des coefficients d'interpolation, les pertes aux sept points de fonctionnement, qui sont tous situés dans la plage de flux constants, doivent être évaluées. Les coefficients d'interpolation peuvent alors être déterminés à partir des pertes en ces points par un ensemble de formules analytiques. Cette approche donne généralement une exactitude d'interpolation satisfaisante dans la plage de vitesses à flux constant.

Les formules suivantes doivent être utilisées pour déterminer les coefficients d'interpolation:

$$c_{L1} = -\frac{25}{156} \cdot R_{L1} + \frac{529}{780} \cdot R_{L2} - \frac{12}{65} \cdot R_{L3} + \frac{25}{39} \cdot R_{L4} - \frac{103}{39} \cdot R_{L5} - \frac{56}{195} \cdot R_{L6} + \frac{192}{65} \cdot R_{L7} \quad (10)$$

$$c_{L2} = \frac{25}{26} \cdot R_{L1} - \frac{599}{390} \cdot R_{L2} + \frac{112}{195} \cdot R_{L3} - \frac{50}{13} \cdot R_{L4} + \frac{50}{13} \cdot R_{L5} + \frac{1\,792}{195} \cdot R_{L6} - \frac{1\,792}{195} \cdot R_{L7} \quad (11)$$

$$c_{L3} = -\frac{50}{39} \cdot R_{L1} + \frac{22}{13} \cdot R_{L2} - \frac{16}{39} \cdot R_{L3} + \frac{200}{39} \cdot R_{L4} - \frac{200}{39} \cdot R_{L5} - \frac{256}{39} \cdot R_{L6} + \frac{256}{39} \cdot R_{L7} \quad (12)$$

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

$$c_{L5} = \frac{200}{39} \cdot R_{L1} - \frac{152}{13} \cdot R_{L2} + \frac{256}{39} \cdot R_{L3} - \frac{200}{39} \cdot R_{L4} + \frac{200}{39} \cdot R_{L5} + \frac{256}{39} \cdot R_{L6} - \frac{256}{39} \cdot R_{L7} \quad (14)$$

$$c_{L6} = -2 \cdot R_{L2} + 10 \cdot R_{L5} - 8 \cdot R_{L6} \quad (15)$$

$$c_{L7} = \frac{25}{39} \cdot R_{L1} - \frac{181}{195} \cdot R_{L2} + \frac{192}{65} \cdot R_{L3} - \frac{25}{39} \cdot R_{L4} - \frac{287}{39} \cdot R_{L5} + \frac{1616}{195} \cdot R_{L6} - \frac{192}{65} \cdot R_{L7} \quad (16)$$

NOTE P_{L1} à P_{L7} sont les pertes mesurées aux points P_1 à P_7 par rapport à la puissance de sortie assignée (vitesse assignée et couple assigné).

Pour l'extrapolation décrite ci-dessus à la Plage b d'affaiblissement du champ, deux coefficients supplémentaires c_{WHf} et c_{BH} sont exigés.

Le coefficient c_{WHf} décrit la séparation des pertes dans les enroulements dues au courant magnétisant (c_{WHf}) et des pertes hautes fréquences ($1 - c_{WHf}$). Si la séparation précise des pertes n'est pas connue, il convient de choisir la valeur 1 pour c_{WHf} , car les pertes hautes fréquences peuvent normalement être négligées par rapport aux pertes I^2R du courant magnétisant.

Le coefficient c_{BH} décrit la séparation des pertes par frottement et par ventilation (c_{BH}) et des pertes par hystérésis ($1 - c_{BH}$). Si la séparation précise des pertes n'est pas connue, il convient de choisir une séparation égale des pertes ($c_{BH} = 0,5$).

7.4.3 Détermination numérique

Pour obtenir une exactitude d'interpolation satisfaisante, en particulier dans la plage d'affaiblissement du champ, il est recommandé de déterminer les pertes du moteur en un plus grand nombre de points de fonctionnement, par exemple 16 ou 20 points. Il convient de préférence que certains de ces points de fonctionnement se trouvent dans la zone d'affaiblissement du champ ($n > 1$) et dans la zone de surcharge ($T > 1$). Les points de fonctionnement supplémentaires doivent être choisis en tenant compte des exigences de charge spécifiques. L'Annexe D donne des exemples types de points de charge supplémentaires.

Les coefficients d'interpolation 7+2 (c_{L1} , c_{L2} , ..., c_{L7} , c_{WHf} , c_{BH}) peuvent alors être déterminés en procédant à une optimisation numérique de l'erreur minimale d'interpolation. La méthode de Newton-Raphson est un algorithme adapté; il est déjà inclus dans de nombreux progiciels numériques disponibles dans le commerce.

7.5 Autres points de fonctionnement qui permettent de déterminer les coefficients d'interpolation

Les points de fonctionnement indiqués dans le Tableau 4 peuvent être utilisés comme autres points de fonctionnement non normatifs pour la détermination analytique des constantes d'interpolation c_{L1} ... c_{L7} indiquées en 7.4.

Tableau 4 – Autres points de fonctionnement non normatifs

	<i>n</i>	<i>T</i>	<i>P</i>
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 Seuls les points de fonctionnement P_1^* et P_4^* ont été modifiés par rapport au Tableau 3, ce qui est indiqué par l'astérisque.

Un mesurage à la vitesse assignée avec un flux magnétique complet exige une tension d'alimentation par le convertisseur de fréquence plus élevée que la tension assignée du moteur afin de compenser la chute de tension IGBT interne. Si le mesurage est effectué à une tension d'entrée par le convertisseur de fréquence égale à la tension assignée du moteur, les pertes du moteur en ces points de fonctionnement augmentent en raison d'une réduction de la tension fondamentale.

Les formules suivantes peuvent être utilisées pour déterminer les coefficients d'interpolation:

$$c_{L1} = -\frac{1}{9} \cdot R_{L1}^* + \frac{28}{45} \cdot R_{L2} - \frac{8}{45} \cdot R_{L3} + \frac{4}{9} \cdot R_{L4}^* - \frac{22}{9} \cdot R_{L5} - \frac{8}{45} \cdot R_{L6} + \frac{128}{45} \cdot R_{L7} \quad (17)$$

$$c_{L2} = \frac{2}{3} \cdot R_{L1}^* - \frac{6}{5} \cdot R_{L2} + \frac{8}{15} \cdot R_{L3} - \frac{8}{3} \cdot R_{L4}^* + \frac{8}{3} \cdot R_{L5} + \frac{128}{15} \cdot R_{L6} - \frac{128}{15} \cdot R_{L7} \quad (18)$$

$$c_{L3} = -\frac{8}{9} \cdot R_{L1}^* + \frac{56}{45} \cdot R_{L2} - \frac{16}{45} \cdot R_{L3} + \frac{32}{9} \cdot R_{L4}^* - \frac{32}{9} \cdot R_{L5} - \frac{256}{45} \cdot R_{L6} + \frac{256}{45} \cdot R_{L7} \quad (19)$$

$$c_{L4} = -\frac{8}{3} \cdot R_{L1}^* + \frac{56}{5} \cdot R_{L2} - \frac{128}{15} \cdot R_{L3} + \frac{8}{3} \cdot R_{L4}^* - \frac{8}{3} \cdot R_{L5} - \frac{128}{15} \cdot R_{L6} + \frac{128}{15} \cdot R_{L7} \quad (20)$$

$$c_{L5} = \frac{32}{9} \cdot R_{L1}^* - \frac{416}{45} \cdot R_{L2} + \frac{256}{45} \cdot R_{L3} - \frac{32}{9} \cdot R_{L4}^* + \frac{32}{9} \cdot R_{L5} + \frac{256}{45} \cdot R_{L6} - \frac{256}{45} \cdot R_{L7} \quad (21)$$

$$c_{L6} = -2 \cdot R_{L2} + 10 \cdot R_{L5} - 8 \cdot R_{L6} \quad (22)$$

$$c_{L7} = \frac{4}{9} \cdot R_{L1}^* - \frac{28}{45} \cdot R_{L2} + \frac{128}{45} \cdot R_{L3} - \frac{4}{9} \cdot R_{L4}^* - \frac{68}{9} \cdot R_{L5} + \frac{368}{45} \cdot R_{L6} - \frac{128}{45} \cdot R_{L7} \quad (23)$$