

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**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**

**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**



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2017 IEC, Geneva, Switzerland

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

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

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

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

About the IEC

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

About IEC publications

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

IEC Catalogue - webstore.iec.ch/catalogue

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

IEC publications search - www.iec.ch/searchpub

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 It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing 20 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in 16 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

IEC Glossary - std.iec.ch/glossary

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

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

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

A propos de l'IEC

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

A propos des publications IEC

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

Catalogue IEC - webstore.iec.ch/catalogue

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

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

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

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne de termes électroniques et électriques. Il contient 20 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 16 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

Glossaire IEC - std.iec.ch/glossary

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

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

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

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



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

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

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 29.130.01; 29.160.30; 29.200

ISBN 978-2-8322-3996-4

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

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

CONTENTS

FOREWORD.....	8
INTRODUCTION.....	10
1 Scope.....	12
2 Normative references	13
3 Terms, definitions, symbols and abbreviated terms.....	14
3.1 Terms and definitions.....	14
3.2 Symbols and abbreviated terms	17
4 Reference PDS (RPDS), reference CDM (RCDM) and reference motor (RM).....	24
4.1 General.....	24
4.2 Reference operating points of the RPDS, RCDM, RM and associated losses	25
4.3 Combining PDS losses with the driven equipment – Workflow for the semi-analytical model (SAM)	27
4.4 IE classes of line-fed motors	29
4.5 IE classes of converter-fed motors	29
4.6 IE Classes of frequency converters (complete drive modules, CDM)	29
4.7 IES Classes of a PDS	29
4.8 Consistency of IE and IES classes	30
4.9 Determination of the IES class of a PDS by application of "reference" and "test" devices and guidance for the manufacturers	30
5 Mathematical model of CDM, motor and PDS	32
5.1 General.....	32
5.2 CDM losses	32
5.2.1 General procedure and definition of the CDM and the test load	32
5.2.2 Output inverter losses	34
5.2.3 Input converter losses	37
5.2.4 Input choke losses.....	38
5.2.5 DC link losses.....	39
5.2.6 Current conductor losses	39
5.2.7 Control and standby losses.....	40
5.2.8 Cooling loss factor	40
5.2.9 Other CDM losses	40
5.2.10 Overall CDM losses	40
5.3 Motor losses	41
5.3.1 General	41
5.3.2 Additional harmonic losses of three-phase asynchronous motors fed by a CDM	42
5.3.3 Reference motor (RM) data	42
5.4 Reference PDS (RPDS)	43
5.4.1 Reference PDS losses.....	43
5.4.2 PDS losses at different switching frequencies	44
5.5 PDS losses for regenerative operation	45
5.6 Losses of motor starters	45
6 Limits of IE and IES classes	46
6.1 General.....	46
6.2 CDM	46
6.3 Motor	48
6.4 PDS.....	48

7	Loss determination	51
7.1	General.....	51
7.2	Type testing of CDM for IE classification.....	51
7.3	Type testing of PDS for IES classification	52
7.4	Determination procedures for CDM and PDS losses in part load operation.....	52
7.5	CDM loss calculation	53
7.6	PDS loss calculation	53
7.7	Input-output measurement method.....	53
7.7.1	Input-output measurement of CDM losses	53
7.7.2	Input-output measurement of PDS losses	54
7.7.3	Requirements of input-output measurement methods	54
7.8	Calorimetric measurement of CDM losses.....	57
7.9	Testing conditions for CDM testing.....	58
7.10	Testing conditions for PDS testing	59
7.11	Flowcharts for test procedures	59
8	Requirements for the user's documentation	62
8.1	General.....	62
8.2	Information for selection	62
8.3	Information for determination of energy efficiency classification	63
8.4	Information on the determination of additional energy losses and part load conditions	63
8.4.1	General	63
8.4.2	Losses in part load conditions.....	63
8.4.3	Losses of auxiliaries and options.....	63
8.4.4	Losses in stand-by mode	64
8.4.5	Losses in regenerative mode	64
Annex A	(normative) Losses of RCDM, RM and RPDS.....	65
A.1	Relative loss tables.....	65
Annex B	(informative) Description of the elements of an extended product using PDS with regard to their impact on losses.....	69
B.1	General.....	69
B.2	Losses in the mains cabling and feeding section	69
B.3	Input filter	70
B.3.1	High frequency EMI filter	70
B.3.2	Low frequency line harmonics filter	71
B.4	Input converter.....	71
B.4.1	General	71
B.4.2	Diode rectifier	72
B.4.3	Active infeed converter	72
B.4.4	Power factor of the input converter	74
B.5	DC link.....	75
B.6	Output inverter.....	76
B.7	Output filter and motor cables	77
B.7.1	General	77
B.7.2	Sine wave filters	78
B.7.3	dV/dt filters and motor chokes.....	79
B.7.4	High frequency EMI motor filters.....	79
B.7.5	Motor cables.....	79

B.8	Motor	79
B.9	Mechanical load	79
B.10	Control and standby losses	79
B.11	Cooling losses	80
B.11.1	Primary cooling losses	80
B.11.2	Secondary cooling losses	80
Annex C	(informative) Converter topology	81
C.1	General	81
C.2	Voltage source output inverter topologies different from those mathematically described in 5.2.2	81
C.3	Voltage source input converter topologies different from those mathematically described in 5.2.3	81
C.4	CDM topologies different from voltage source type	82
Annex D	(informative) Motor model and loss interpolation	83
D.1	Overview	83
D.2	Losses of AC motors	83
D.2.1	General	83
D.2.2	Stator and rotor winding I^2R losses ($P_{LS} + P_{LR}$ (for induction or wound rotor motors))	83
D.2.3	Additional losses (P_{LL})	83
D.2.4	Iron losses (P_{Lfe})	84
D.2.5	Friction and windage losses (P_{Lfw})	84
D.2.6	Additional harmonic losses (P_{LHL})	85
D.3	Interpolation formula	85
D.4	Analytical determination of the interpolation coefficients	86
D.4.1	General	86
D.4.2	Additional losses due to frequency converter voltage drop	87
D.4.3	Alternate operating points to determine interpolation coefficients	88
D.4.4	Motors for square-torque applications	89
D.5	Determination of interpolation error	89
D.6	Numerical determination of the interpolation coefficients	89
D.7	Typical IE2 induction motor efficiency	90
Annex E	(informative) Application example for loss calculations of a CDM and a PDS	93
E.1	General	93
E.2	CDM loss determination	93
E.2.1	General	93
E.2.2	Loss determination by maximum losses of neighbouring loss points	94
E.2.3	Loss determination by two-dimensional interpolation of losses of neighbouring loss points	94
E.2.4	Loss determination by the mathematical model described in 5.2	97
E.3	Loss determination of the motor	99
E.4	Loss determination of the PDS	100
Annex F	(informative) Uncertainty of loss determination method	101
F.1	General	101
F.2	Calculation of uncertainty at randomly occurring errors	101
F.3	Comparison of uncertainties for different loss determination methods	101
Annex G	(informative) Calorimetric measurement for CDM losses	102
G.1	General	102
G.2	Calorimeter with two chambers with air as a cooling medium	102

G.3	Calorimeter with one chamber with air as a cooling medium	103
G.4	Calorimeter with liquid as a cooling medium.....	104
	Bibliography.....	105
	Figure 1 – Illustration of core requirements of energy efficiency standardization	10
	Figure 2 – Illustration of the extended product with included motor system	15
	Figure 3 – Torque-speed-characteristic of servo PDS	16
	Figure 4 – Illustration of the operating points (shaft speed, torque) for the determination of relative losses of the power drive system (RPDS)	25
	Figure 5 – Illustration of the operating points (shaft speed, torque) for the determination of relative losses of the reference motor (RM).....	26
	Figure 6 – Illustration of the operating points (relative motor stator frequency, relative torque-producing current) for the determination of losses of the reference complete drive module (RCDM)	26
	Figure 7 – Illustration of the workflow to determine the energy efficiency index (EEI) of an extended product	28
	Figure 8 – Illustration how to combine different data sources to determine the energy efficiency index (EEI) of an extended product	28
	Figure 9 – Metrical relation of IE, IES classes.....	30
	Figure 10 – Guidance for CDM and Motor manufacturers for the usage of "test" and "reference" devices to determine the IE/IES classes	31
	Figure 11 – Illustration of the CDM and the test load.....	32
	Figure 12 – Relative losses $p_{L,CDM}$ of the 9,95 kVA RCDM	41
	Figure 13 – Example of the relative power losses of PDS as function of speed and torque	44
	Figure 14 – Example of the relative power losses versus switching frequency.....	45
	Figure 15 – Example of a CDM with resistor for dissipating generated power	45
	Figure 16 – Illustration of IE classes for a CDM	48
	Figure 17 – Illustration of IES classes of a PDS	49
	Figure 18 – Losses of CDM are provided as the sum of the determined losses plus the uncertainty of the determination method	52
	Figure 19 – Input-output measurement setup for determination of CDM losses	54
	Figure 20 – Input-output measurement setup for PDS losses	54
	Figure 21 – Order of CDM measurements from [1] to [8]	56
	Figure 22 – Order of PDS measurements from [1] to [8].....	57
	Figure 23 – Calorimetric measurement setup for determining CDM losses	58
	Figure 24 – Determination of IE classification for CDM and loss determination for part load operating points	60
	Figure 25 – Determination of IES classification for PDS and loss determination for part load operating points	61
	Figure B.1 – Overview of the extended product and energy flow	69
	Figure B.2 – Equivalent circuit of the mains and mains cabling	70
	Figure B.3 – Illustration of a single phase line harmonics filter	71
	Figure B.4 – PDS with a diode rectifier input converter	72
	Figure B.5 – PDS with a standard AIC input converter	73
	Figure B.6 – PDS with a F3E-AIC input converter without line choke.....	74

Figure B.7 – Typical waveform of a diode rectifier line current	74
Figure B.8 – DC link circuit	75
Figure B.9 – DC link circuit with additional DC chokes	76
Figure B.10 – Output inverter of the PDS	77
Figure B.11 – Motor cable and optional output filter of the PDS	77
Figure B.12 – Typical waveform of inverter output voltage and motor voltage when using a sine wave output filter	78
Figure D.1 – Normative operating points	87
Figure E.1 – Segments of operating points	93
Figure E.2 – Two-dimensional interpolation	95
Figure G.1 – One-step calorimetric measurement setup for comparative loss measurement (CDM and heating resistor are loaded simultaneously)	103
Figure G.2 – Two-step calorimetric measurement setup for comparative loss measurement (CDM and heating resistor are not loaded simultaneously)	104
Figure G.3 – Liquid cooled calorimetric measurement setup for CDM loss measurement	104
Table 1 – Minimum test load currents at different points of operation	33
Table 2 – Test load displacement factor between fundamental output current and fundamental output voltage at different points of operation	33
Table 3 – Reference parameters for Formula (5)	35
Table 4 – Variables for Formula (5)	35
Table 5 – Reference parameters for Formula (6)	35
Table 6 – Reference parameters for Formula (7)	36
Table 7 – Reference parameters for Formula (8)	37
Table 8 – Reference parameters for Formula (10)	38
Table 9 – Variables for Formula (10)	38
Table 10 – Reference parameters for Formula (11):	38
Table 11 – Reference parameters for Formula (12)	39
Table 12 – Reference parameters for Formula (13)	39
Table 13 – Reference parameter for Formula (15)	40
Table 14 – Reference parameter for Formula (14)	40
Table 15 – Relative losses of the 400 V/9,95 kVA reference CDM at the operating points described in Figure 6	41
Table 16 – Reference parameter for Formula (19)	43
Table 17 – Relative losses of the 400 V/7,5 kW RPDS	44
Table 18 – Reference CDM losses for class IE1 definition	47
Table 19 – Reference PDS losses of IES class 1 definition	50
Table 20 – Information requirements	62
Table A.1 – Relative losses (%) of reference CDMs at different power ratings at the operating points described in Figure 6	65
Table A.2 – Relative losses (%) of reference motors at different power ratings at the operating points described in Figure 5	66
Table A.3 – Relative losses (%) for a reference PDS at different power ratings at the operating points described in Figure 4	67
Table B.1 – Typical values of λ for different input converter topologies	75

Table D.1 – Recommended split of windage and friction losses for IC 411 self-ventilated motors	85
Table D.2 – Normative operating points with graphical representation	86
Table D.3 – Non-normative alternate operating points.....	88
Table D.4 – Interpolation coefficients of typical 4-pole reference IE2 induction machines	91
Table D.5 – Interpolation coefficients of typical 2-pole reference IE2 induction machines	92
Table E.1 – Relative losses of a 400 V/9,95 kVA example CDM at the predefined operating points	94
Table E.2 – Parameters of the example CDM.....	98
Table E.3 – Results of the CDM calculation according to the mathematical model	99
Table E.4 – Comparison of different loss evaluation methods	99
Table E.5 – Loss data of the 7,5kW reference motor	99

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61800-9-2:2017

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

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**

FOREWORD

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

International Standard IEC 61800-9-2 has been prepared by subcommittee 22G: Adjustable speed electric drive systems incorporating semiconductor power converters, of IEC technical committee 22: Power electronic systems and equipment.

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

FDIS	Report on voting
22G/349/FDIS	22G/352/RVD

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

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

A list of all parts in the IEC 61800 series, published under the general title *Adjustable speed electrical power drive systems*, can be found on the IEC website.

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

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

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61800-9-2:2017

INTRODUCTION

This part of IEC 61800 has been developed to allow evaluation of power losses of CDMs (complete drive modules) and PDSs (power drive systems).

The requirements for measuring energy efficiency of motors with non-sinusoidal supply are under the responsibility of IEC/TC 2 and will be published under the IEC 60034 series.

IEC SC 22G includes the standardization task force for dealing with this topic. It has close collaboration with several other technical committees (for example, IEC TC 2, IEC SC 121A).

IEC SC 22G maintains responsibility for all relevant aspects in the field of energy efficiency and ecodesign requirements for power electronics, switchgear, control gear and power drive systems and their industrial applications.

The core requirements of energy efficiency standardization are illustrated in Figure 1. The work has been agreed to provide the reasonable target as a best compromise.

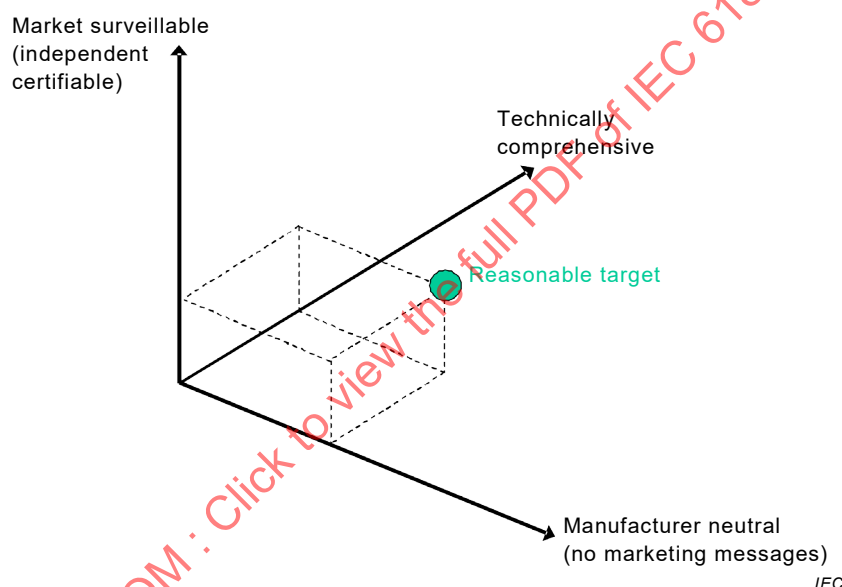


Figure 1 – Illustration of core requirements of energy efficiency standardization

IEC 61800 (all parts) does not deal with mechanical engineering components.

NOTE Geared motors (motors with directly adapted gearboxes) are treated like power drive systems (converter plus motor). See IEC 60034-30-1 for classification of the losses of a geared motor. The efficiency classes of gearboxes as individual components are under consideration.

IEC 61800-9-2 is a subpart of the IEC 61800 series, which has the following structure:

- *Part 1: General requirements – Rating specifications for low voltage adjustable speed DC power drive systems*
- *Part 2: General requirements – Rating specifications for low voltage adjustable speed AC power drive systems*
- *Part 3: EMC requirements and specific test methods*
- *Part 4: General requirements – Rating specifications for AC power drive systems above 1 000 V AC and not exceeding 35 kV*
- *Part 5: Safety requirements*

- *Part 6: Guide for determination of types of load duty and corresponding current ratings*
- *Part 7: Generic interface and use of profiles for power drive systems*
- *Part 8: Specification of voltage on the power interface*
- *Part 9: Ecodesign for power drive systems, motor starters, power electronics and their driven applications*

Each part is further subdivided into several subparts, published either as International Standards or as Technical Specifications or Technical Reports, some of which have already been published. Other will be published with the part number followed by a dash and a second number identifying the subdivision (example: IEC 61800-9-2).

It considers basic requirements from the EN 50598-2 CENELEC standard published on 2014-12-19 and considers also the following key points in cooperation with relevant technical committees.

It has been developed in close collaboration with other technical committees (IEC TC 2, IEC SC 121A) and with a customer's stakeholder committee CEN/TC 197 in order to provide a comprehensive standard for energy efficiency and ecodesign requirements.

Key points:

- Requirements for energy-efficient design of electric drive systems in accordance with the driven load
- Requirements and IE-classification of complete drive modules (CDM)
- Requirements and IES-classification of power drive systems (PDS)
- Determination of PDS losses and requirements for the link to the driven equipment for the determination of energy efficiency classification/evaluation of the extended product
- Requirements for an environmentally conscious system design and environmental declaration of a motor system

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

1 Scope

This part of IEC 61800 specifies energy efficiency indicators of power electronics (complete drive modules, CDM), power drive systems (PDS) and motor starters, all used for motor driven equipment.

It specifies the methodology for the determination of losses of the complete drive module (CDM), the power drive system (PDS) and the motor system.

It defines IE and IES-classes, their limit values and provides test procedures for the classification of the overall losses of the motor system.

Furthermore, this document proposes a methodology for the implementation of the best energy efficiency solution of drive systems. This depends on the architecture of the motor driven system, on the speed/load profile and on the operating points over time of the driven equipment.

The methodology of the extended product approach and the semi analytical models are defined in IEC 61800-9-1.

The structure of this document is as follows:

- the losses of standardized reference PDS (RPDS), standardized reference CDM (RCDM) and the mathematical model for their calculation are given and classified;
- the reference motor (RM) and the reference CDM (RCDM) are defined and can be used to determine the efficiency class of a motor system when one of its constituents is unknown;
- the requirements for the determination of the losses of a real PDS and a real CDM are given and compared to the reference RPDS and RCDM;
- the requirements for type testing and user documentation are given;
- some exemplary losses of an overall system are illustrated in annexes;
- information about system and drive topologies are given in annexes.

Specific data for power losses of RCDM, RM, RPDS and IE/IES-classes are given for low voltage (100 V up to and equal to 1 000 V), single axis AC/AC power drive systems with three-phase motors. Geared motors are treated as standard motors when motor and gearbox can be separated.

All provided reference data is derived from PDS with induction motors. It may be used for all types of PDS with other types of motors as well.

The application of this document to the following equipment may be technically possible but is not mandatory:

- High voltage CDM and PDS with a rated voltage above 1 000 V AC;
- Low voltage CDM and PDS with a rated voltage below 100 V AC;

- High power PDS above a rated power of 1 000 kW;
- High power CDM above a rated apparent output power of 1 209 kVA;
- Low power PDS below a rated power of 0,12 kW;
- Low power CDM below a rated power of 0,278 kVA;
- CDMs other than those converting electrical AC power into one single AC output;
- PDSs other than those converting electrical AC power into one single mechanical rotating shaft;
- PDSs and CDMs that are able to regenerate energy back into the AC power supply;
- PDSs and CDMs having an input current with a THC (according to the definition in IEC 61000-3-12) of less than 10 %;
- PDS with geared motors where motor and gearbox cannot be separated, for example because of a common housing,
- Servo PDS (consisting of frequency converter, motor and position feedback sensor);
- PDSs that are not put on the market as one single product.

NOTE IEC 61800-9 (all parts) does not cover energy efficiency classification of driven equipment but provides input for the assessment according to the extended product approach.

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 60038:2009, *IEC standard voltages*

IEC 60050-161, *International Electrotechnical Vocabulary – Part 161: Electromagnetic compatibility*

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

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

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

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

IEC 60947-4-1, *Low voltage switchgear and controlgear – Part 4-1: Contactors and motor-starters – Electromechanical contactors and motor-starters*

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

IEC TS 62578, *Power electronics systems and equipment – Operation conditions and characteristics of active infeed converter (AIC) applications including design recommendations for their emission values below 150 kHz*

3 Terms, definitions, symbols and abbreviated terms

3.1 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC 60050-161 and the following apply.

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

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

3.1.1

active infeed converter

AIC

self-commutated electronic power converters of all technologies, topologies, voltages and sizes which are connected between the AC power supply system (mains) and a stiff DC-side (current source or voltage source), which can convert electric power in both directions (generative or regenerative) and can control the reactive power or the power factor

Note 1 to entry: See IEC TS 62578.

Note 2 to entry: The IEC defines terms (VSC and CSC) as voltage stiff AC/DC converter [551-12-03] and current stiff AC/DC converter [551-12-04]. Most of the AICs are bi-directional converters and have sources on the DC side. Therefore, they are known as voltage source converters and current source converters.

3.1.2

AEDM

alternate efficiency determination method

analytical model used by motor manufacturers for calculation of the losses that can be used to determine the energy efficiency index of an extended product

3.1.3

CDM

complete drive module

drive

drive controller

drive module consisting of the electronic power converter connected between the electric supply and a motor as well as extension such as protection devices, transformers and auxiliaries

Note 1 to entry: The AC/AC frequency converter, which feeds the motor. Some countries use the term "drive" instead of CDM.

3.1.4

crest factor

ratio of the peak absolute value to the RMS value of the waveform

3.1.5

driven equipment

equipment mechanically connected to the shaft of a motor

3.1.6

EEl

value describing the energy efficiency of an application, resulting from the extended product approach (EPA)

Note 1 to entry: If the extended product is a pump system, the EEl is the ratio of the demanded energy (actual plus losses) to the theoretical energy required for the application.

3.1.7**extended product****EP**

driven equipment together with its connected motor system (e.g. a PDS)

Note 1 to entry: See Figure 2

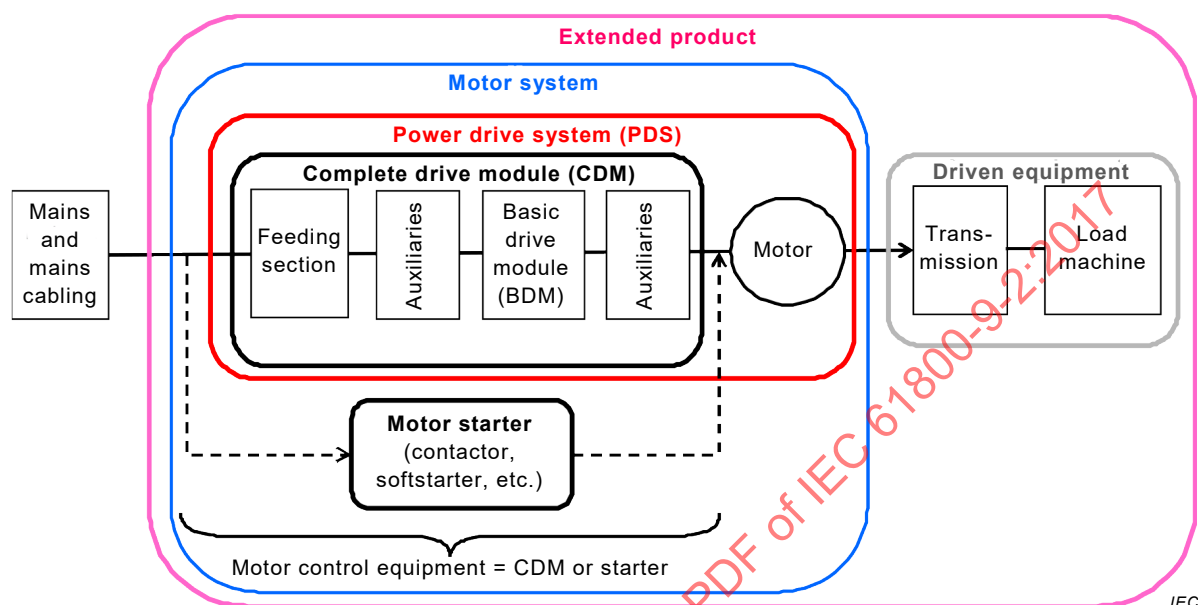


Figure 2 – Illustration of the extended product with included motor system

3.1.8**IE class**

efficiency classification of components of a motor system (3.1.10)

Note 1 to entry: IE is an abbreviation for "international efficiency".

3.1.9**IES class**

efficiency classification of a motor system (e.g. PDS or a gear drive motor)

Note 1 to entry: IES is an abbreviation for "international efficiency of systems".

3.1.10**motor system**

PDS or motor connected to the mains by a motor starter according to IEC 60947-4-1

3.1.11**PDS****power drive system**

system consisting of a CDM and a motor

3.1.12**pulse pattern**

pattern of the switched phase-to-phase voltage or phase current at the unfiltered output terminals of the converter, resulting from pulse frequency and modulation scheme

3.1.13

reference complete drive module

RCDM

complete drive module defined by mathematical equations and/or power losses

Note 1 to entry: It is used as a basis for determining the IE class of an individual CDM.

3.1.14

reference motor

RM

motor defined by mathematical equations and/or power losses

Note 1 to entry: It is used as a basis for comparing other motors.

3.1.15

reference power drive system

RPDS

combination of the reference motor and the reference PDS

3.1.16

servo PDS

closed-loop controlled electric drive system for precise and dynamical control of angular or linear position, velocity and acceleration for the driven servomechanism in typical applications such as CNC machinery, automated manufacturing or robotics

Note 1 to entry: See Figure 3.

Note 2 to entry: It consists of a frequency converter, a motor and a position feedback sensor.

Note 3 to entry: Such servo applications are characterised with non-periodically (duty type S9) or periodically variable load and speed within the permissible 4-quadrant operating range ($\pm T_{MAX}$, $\pm n_{MAX}$) and includes frequently applied operation in overload ($T > T_N$) and/or field weakening range ($n > n_N$) of the motor (see diagram below).

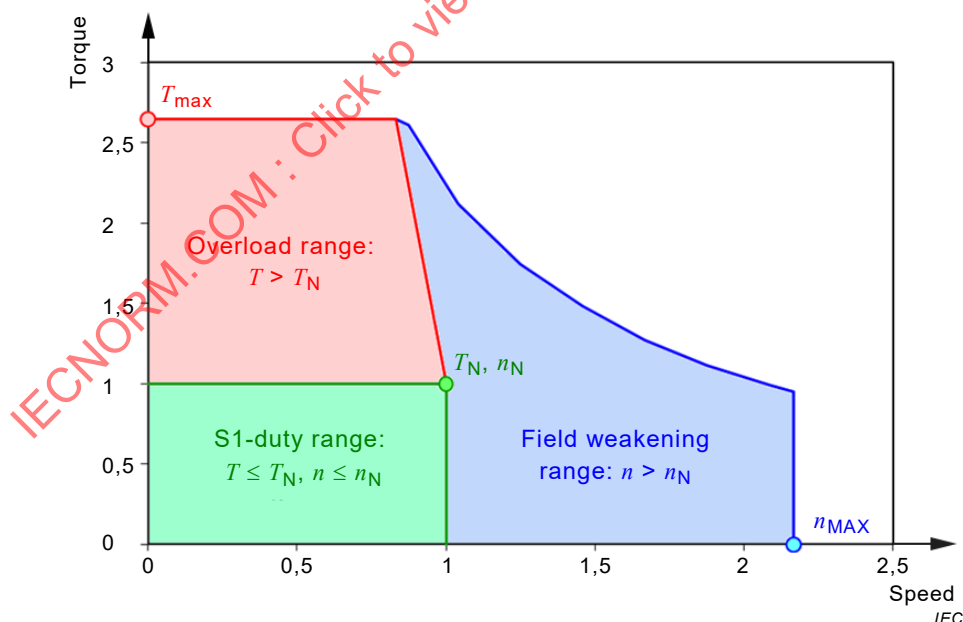


Figure 3 – Torque-speed-characteristic of servo PDS

3.1.17

single axis

single mechanical output shaft of an individual motor

Note 1 to entry: Applies to CDM supplying one motor or PDS that includes only one motor.

3.1.18**test load**

electrical device that determines the output current I_{out} and the output fundamental displacement factor $\cos \phi$ of a CDM for testing or calculation purposes

Note 1 to entry: Test load may be a test motor or a different kind of load.

3.1.19**test load current**

total apparent current into the test load to produce a certain torque (see Table 1)

3.1.20**torque-producing current**

part of the test load current (see 3.1.19) that produces a certain torque (see Figure 6, Table 1)

Note 1 to entry: For an asynchronous motor, the torque-producing current is the rotor current.

3.2 Symbols and abbreviated terms**3.2.1**

c_{liquid}

specific heat capacity of liquid

3.2.2

E_{D}

switching loss in energy per volt and per ampere of a power diode

3.2.3

E_{T}

switching loss energy per volt and per ampere of a power transistor

3.2.4

f_{sw}

number of switching events of one semiconductor within one second

Note 1 to entry: It determines, together with the selected pulse pattern and the converter topology, the lowest frequency of non-controllable harmonics or inter-harmonics at the IPC (in-plant point of coupling) or the motor.

Note 2 to entry: To turn on and turn off the semiconductor's switch are separate switching events. Thus, the switching frequency of a two level converter is two times the pulse frequency (also called the carrier frequency) of the phase-to-phase voltage for modulation that uses continuous switching and about 1,33 times the pulse frequency of the phase-to-phase voltage for modulation that uses discontinuous switching.

3.2.5

$I_{\text{motor_cable}}$

current in the motor cable of one power port (see IEC 61800-2) of the PDS, used for calculating switching losses

Note 1 to entry: This typically represents a capacitive leakage current, which is normally for shielded motor cables.

3.2.6

$I_{1,r \text{ CDM}}$

fundamental of the rated CDM or PDS input current waveform

3.2.7

I_{r}

rated CDM or PDS input current

3.2.8

I_{out}
output current

3.2.9

$I_{\text{r,out}}$
rated CDM output current

3.2.10

I_{rM}
rated motor current

3.2.11

$kI_{\text{DC_link}}$
load independent DC link loss parameter ($\frac{1}{\Omega \cdot A}$)

3.2.12

kI_{choke}
choke impedance, relative to the rated CDM impedance

3.2.13

$k^2_{\text{DC_link}}$
load dependent DC link loss parameter ($\Omega \cdot A$)

3.2.14

k^2_{choke}
relative voltage drop on the resistive part of the choke

3.2.15

K_{fe}
Additional/split iron losses in a motor

3.2.16

K_{fw}
Additional/split of friction and windage losses in a motor

3.2.17

K_{LL}
Distribution of load losses

3.2.18

k_{VD}
ratio of rated motor voltage to maximum CDM output voltage

3.2.19

$P_{\text{L,cooling}}$
power losses generated by the cooling equipment of a CDM (e.g. fan losses), in relation to the BDM (see IEC 61800-2) losses if the CDM needs to be separately cooled

3.2.20

m
modulation index, relation of CDM output frequency to the nominal motor stator frequency

3.2.21

n_i
speed [rpm] at load point i

3.2.22

n_r
rated speed [rpm]

3.2.23

P_i
power consumption [kW] at load point i

3.2.24

$P_{in,CDM}$
input power of the CDM obtained from the power loss measurement

3.2.25

$P_{in,PDS}$
input power of the PDS obtained from the power loss measurement

3.2.26

P_{Lfe}
iron losses of a motor

Note 1 to entry: See also IEC 60034-2-1.

3.2.27

P_{Lfw}
friction and windage losses of a motor

Note 1 to entry: See also IEC 60034-2-1.

3.2.28

P_{LHL}
additional harmonic losses of a motor caused by non-sinusoidal power supply

Note 1 to entry: see also IEC 60034-2-3.

3.2.29

P_{LL}
additional load losses of a motor

Note 1 to entry: see also IEC 60034-2-1.

3.2.30

$p_{L RM}$
relative losses of the reference motor

3.2.31

$P_{L RM}$
losses of the reference motor

3.2.32

P_{LR}
rotor losses of a motor

Note 1 to entry: see also IEC 60034-2-1

3.2.33

P_{LS}
stator winding losses of a motor

Note 1 to entry: See also IEC 60034-2-1.

3.2.34

P_{LTsin}

total losses of a motor at sinusoidal power supply

Note 1 to entry: According to IEC 60034-2-1:2014, method 2-1-1B.

3.2.35

$P_{LT,Mot}$

total losses of a motor when supplied by a converter (non-sinusoidal power supply)

Note 1 to entry: According to IEC 60034-2-1:2014, method 2-1-1B.

3.2.36

$P_{out,CDM}$

output power of CDM obtained from the power loss measurement

3.2.37

$P_{out,PDS}$

output power of PDS obtained from the power loss measurement

3.2.38

P_r

rated power of equipment which is assigned by its manufacturer

3.2.39

P_{proc}

power demand of the mechanical or fluid-mechanical process

3.2.40

P_L

electrical power losses

Note 1 to entry: In $P_{L,CDM}$, $P_{L,Mot}$, $P_{L,PDS}$ and $P_{L,Aux}$, the index CDM refers to the complete drive module; Mot refers to the motor, PDS to the power drive system and Aux to the auxiliary devices like cables, transformers or filters.

3.2.41

p_L

the relative power losses are the per unit losses related to the nominal power of the device

3.2.42

$P_{L,CDM}$

power losses of a CDM

3.2.43

$P_{L,CDM, determined}$

power losses of CDM from the power loss determination method

3.2.44

$p_{L,CDM}$

relative power losses of the CDM, in relation to its rated apparent power

3.2.45

$P_{L,choke}$

power losses in the choke section of a CDM

3.2.46 $P_{L,control}$

power losses in the control section of a CDM

3.2.47 P_{L,DC_link}

power losses of the DC link section of the CDM

3.2.48 $P_{L,inverter}$

power losses in the inverter section of a CDM

3.2.49 $P_{L,PDS, determined}$

power losses of the PDS from the power loss determination method

3.2.50 $P_{L,rectifier}$

power losses in the rectifier section of a CDM

3.2.51 $P_{L,resistor}$

measured power losses of the resistor in comparative calorimetric measurement

3.2.52 $P_{L,on,D}$

on state power losses of a power diode

3.2.53 $P_{L,on,D, rectifier}$

on state power losses of a rectifier diode

3.2.54 $P_{L,on,T}$

on state losses of a power transistor

3.2.55 P_{LSR}

the stator and rotor winding losses of the motor

3.2.56 $P_{L,sw,D}$

switching power losses of a power diode

3.2.57 $P_{L,sw,T}$

switching power losses of a power transistor

3.2.58 $P_{r,M}$

rated power of a motor

Note 1 to entry: In IEC 60034 (all parts) related to motors, this is named P_N .

3.2.59

$P_{L, \text{stby}}$
standby losses of a PDS

Note 1 to entry: Standby losses are generated when the PDS is powered up, but not providing current to the load. They are typically two to three orders of magnitude lower than the losses during operation. Their influence on the overall losses strongly depends on the duty profile of the extended product. Besides this, they also depend on the requirements of the extended product in terms of wake-up time and communication.

3.2.60

P_N
relative output losses of a motor

3.2.61

Q
flow rate of a pump unit

3.2.62

Q_{BEP}
flow rate of the pump at the best efficiency point

3.2.63

Q_{cooler}
volumetric flow rate of the cooler in the calorimeter

3.2.64

Q_{ISI}
interpolation error (stability index)

3.2.65

r_{HL}
ratio of additional harmonic losses when a motor is operated with a CDM compared to the losses at sinusoidal supply of a motor

3.2.66

$S_{r, \text{equ}}$
rated apparent power of a piece of equipment

3.2.67

$S_{r, \text{RCDM}}$
rated apparent power of the reference CDM

3.2.68

T
the torque of a motor

3.2.69

t_w
working time of an equipment

3.2.70

T_i
torque [Nm] at operating point i

3.2.71

$U_{1, r, \text{out}}$
fundamental rated line-to-line CDM output voltage

Note 1 to entry: For the reference CDM, this value is assumed to be 400 V unless stated otherwise.

3.2.72

U_{DC}
DC link voltage of a CDM

3.2.73

$U_{D,r}$
on state voltage of a power diode at rated CDM current

3.2.74

$U_{D,r,rectifier}$
on state voltage of a rectifier diode at rated CDM current

3.2.75

$U_{D,th}$
threshold voltage of a power diode

3.2.76

$U_{D,th,rectifier}$
threshold voltage of a rectifier diode

3.2.77

U_{mL1}
line to neutral voltage of the power supply system in phase L1

3.2.78

$U_{T,r}$
on state voltage of a power transistor at rated CDM current

3.2.79

$U_{T,th}$
threshold voltage of a power transistor

3.2.80

W_w
electrical energy demand of extended product during working time

3.2.81

λ
power factor of an equipment input current and voltage: $\lambda = P_{equ} / S_{r,equ}$

3.2.82

$\Delta p_{L,CDM}$
uncertainty [%] of power loss determination method for CDM

3.2.83

$\Delta P_{L,CDM}$
uncertainty [W] of power loss determination method for CDM

3.2.84

$\Delta p_{L,PDS}$
Uncertainty [%] of power loss determination method for PDS

3.2.85

$\Delta P_{L,PDS}$
uncertainty [W] of power loss determination method for PDS

3.2.86

θ_{in}

input temperature of cooling medium (air, liquid) in a calorimetric measurement

3.2.87

θ_{inside}

temperature of cooling air between two calorimetric measurement chambers

3.2.88

θ_{out}

output temperature of cooling medium (air, liquid) in a calorimetric measurement

3.2.89

φ

phase angle between the fundamental CDM input voltage and the fundamental CDM input current

3.2.90

ϕ

phase angle between the fundamental CDM output voltage and the fundamental CDM output current

3.2.91

Φ_r

phase angle between the fundamental CDM output voltage and the fundamental CDM output current at rated torque and speed

4 Reference PDS (RPDS), reference CDM (RCDM) and reference motor (RM)

4.1 General

In order to determine the most efficient extended product for a given application, a direct comparison of several drives topologies and/or several control strategies is required. The extended product approach described in IEC 61800-9-1 allows for this.

To support this approach, the concept of "reference PDS (RPDS)" is introduced. The standardized RPDS, consisting of a reference CDM (RCDM) and a reference converter-fed motor (RM), allows the comparison of the energy consumption of the designed extended product to an average technology PDS.

The definition of the RPDS is generic and independent of a specific product or manufacturer.

It allows

- setting the limiting values for classifications,
- classification of the real PDS in comparison to the RPDS,
- classification of the CDM,
- application of IEC TS 60034-30-2,
- classification of converter-fed motors and motors classified per IEC 60034-30-1,
- limiting the assessment to only a few appropriate measured or calculated load points, and
- determining the energy consumption of various driven applications.

Examples of relevant input values (load points) for classification of different driven applications:

Loads with square-law torque-speed characteristics (e.g. most pump units) will typically require relative losses or input powers P_1 at the load points $p_{L, PDS (50; 25)}$, $p_{L, PDS (100; 50)}$ and $p_{L, PDS (100; 100)}$ for calculation of the losses of the motor system. The permissible loss tolerance is $\pm 10\%$ of the losses in each operating point.

Constant torque loads (e.g. hoisting equipment) will need the additional points $p_{L, PDS (0; 25)}$, $p_{L, PDS (0; 50)}$ and $p_{L, PDS (0; 100)}$ in order to determine the losses of the motor system.

4.2 Reference operating points of the RPDS, RCDM, RM and associated losses

All driven equipment can be described by the power required by the machine/application. The power requirements are the product of torque and speed at any working point. At each operating point there is an associated power loss in the motor system.

The collection of (torque, speed) operating points at which the motor system may potentially be operated is infinite. Theoretically, it is necessary to know the amount of power losses generated at each point. In practice however, it is sufficient to know the power losses at a limited number of specific points (eight), which are specified for the RPDS in Figure 4, for the RM in Figure 5 and for the RCDM in Figure 6.

For operating points with speeds greater than zero, the losses are usually given as a percentage of the mechanical output power. In other approaches the rated efficiencies (η) are defined as the ratio of rated mechanical output power to electrical input power (including the losses).

In this document, losses related to the nominal output power of the power drive system (p in %) are considered instead of efficiency. This is done to secure the generality of the extended product approach.

Driven equipment, for which a standstill torque is required, exists. For such equipment the efficiency is not an appropriate value to be used in the extended product approach.

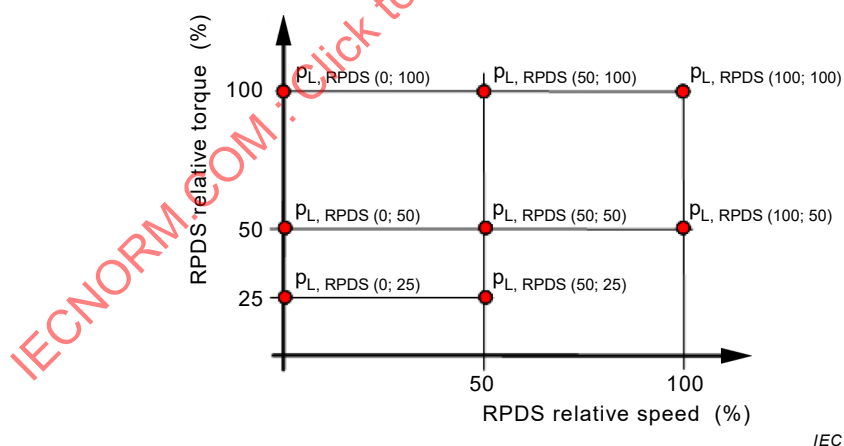


Figure 4 – Illustration of the operating points (shaft speed, torque) for the determination of relative losses of the power drive system (RPDS)

As defined, the absolute losses of the RPDS shall be the sum of the RCDM losses plus the RM losses. Therefore, those losses shall be calculated point by point at the load points of Figure 5 and Figure 6 by the following formula:

$$P_{L,RPDS} = P_{L,RM} + P_{L,RCDM} \quad (1)$$

The relative losses of the RPDS are calculated from the relative losses of the RCDM and the RM as follows:

$$p_{L,RPDS} = \frac{p_{L,RM} \cdot P_{r,RM} + p_{L,RCDM} \cdot S_{r,RCDM}}{P_{r,RM}} \quad (2)$$

At rated speed and torque, a modified formula according to Equation (19) has to be used.

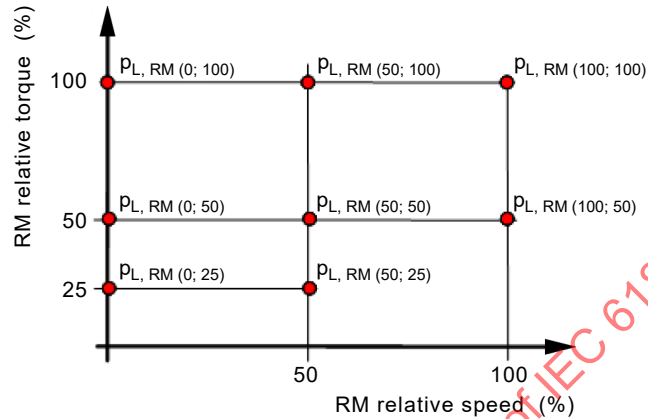


Figure 5 – Illustration of the operating points (shaft speed, torque) for the determination of relative losses of the reference motor (RM)

The load points of the reference CDM (RCDM) cannot be given as a percentage of speed and torque of the corresponding rated values as the CDM provides only currents and voltages at its output. To allow a reproducible comparison and to avoid overmodulation, the fundamental AC output voltage shall be limited to 90 % of the AC input voltage.

NOTE 1 RCDM losses at 90 % output voltage are very similar to the RCDM losses at 100 % output voltage (inverter losses are slightly higher whereas rectifier losses are slightly lower) and can consequently be used to calculate the RCDM losses at 100 % speed.

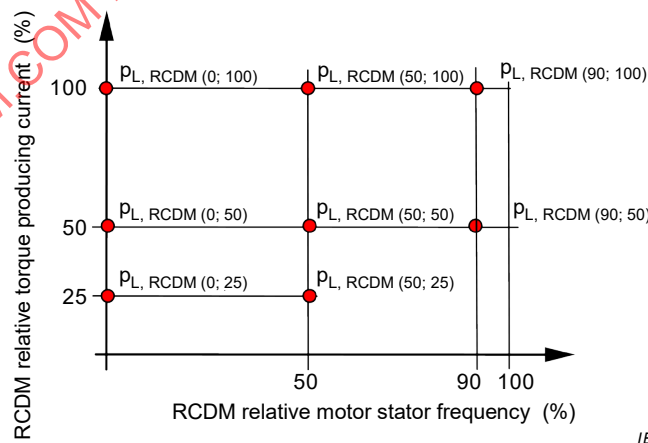


Figure 6 – Illustration of the operating points (relative motor stator frequency, relative torque-producing current) for the determination of losses of the reference complete drive module (RCDM)

NOTE 2 For asynchronous motors, the torque-producing current is the rotor current. The relation between the overall motor current and the torque producing current is given in Table 1.

NOTE 3 For physical reasons, the illustrated load points on the y-axis of Figure 6 $p_{L,RCDM}(0,n)$ are achieved only with a non-zero output voltage in order to let current flow through the resistance of the motor windings.

The relative fundamental CDM output voltage (in per cent) shall not be lower than the relative CDM output frequency (in per cent).

If required, the losses for intermediate operating points may be determined by one of the calculation methods presented in E.2.1:

- a) maximum losses in neighbouring, predefined load points;
- b) two-dimensional linear interpolation between neighbouring load points;
- c) loss calculation of the CDM according to the mathematical model described in 5.2.

Motor losses are interpolated according to Annex D.

A deviation of the relative rotor speed from the defined load points (see Figure 4) of up to the rated slip is allowed. At 0 Hz, a deviation of up to 12 Hz shall be allowed.

For losses at additional load points and at part load conditions and reduction of operating points, see 8.4 and D.4.3.

4.3 Combining PDS losses with the driven equipment – Workflow for the semi-analytical model (SAM)

The determination model for the losses or the energy efficiency index of an extended product is called "semi analytical model" (SAM), which includes physical and mathematical parameters and calculation algorithms of the subparts of an EP.

The workflow for determining the efficiency classification of an extended product is shown in Figure 7.

It also illustrates how the SAM of the motor system (left hand side) shall be linked to the SAM of the driven equipment (right hand side). The link in between both semi analytical models shall be the load loss points of the PDS and their permissible tolerances. The actual needed operating points shall be required by the semi analytical model of the driven equipment.

The PDS data containing the PDS losses according to Figure 2 (left hand side of Figure 5) is defined in this document, whereas the semi analytical energy consumption models of the PDS-driven application (right hand side of Figure 5) shall be drafted by their responsible product committees by using the same approach. An example for PDS driven pump units is given in IEC 61800-9-1. Figure 8 shows how the different data sources shall be combined.

It is the responsibility of the technical committees for specific applications to standardize publicly available SAM's for their applications.

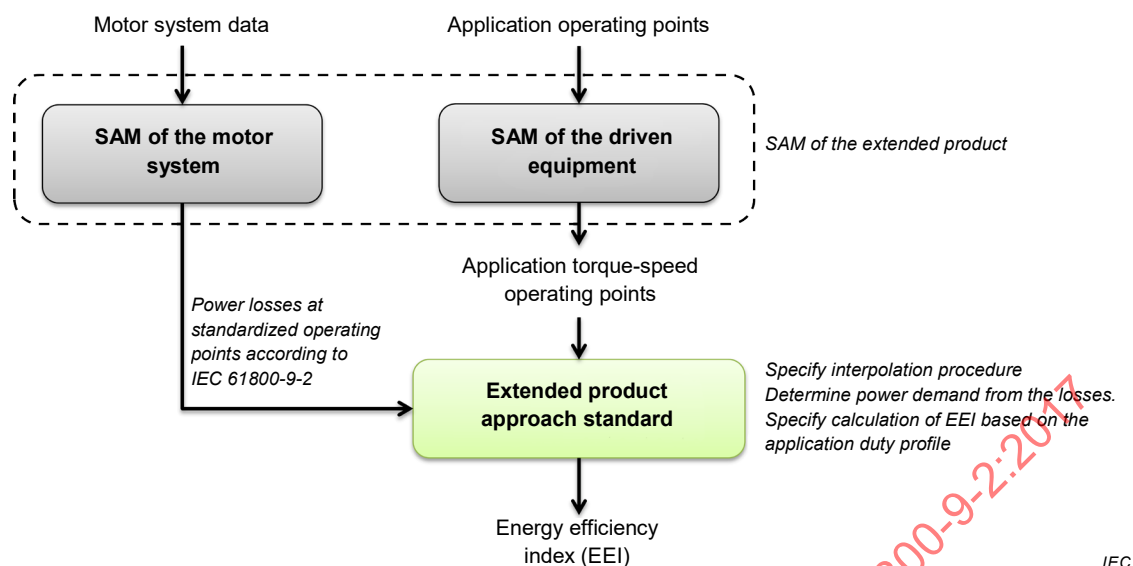
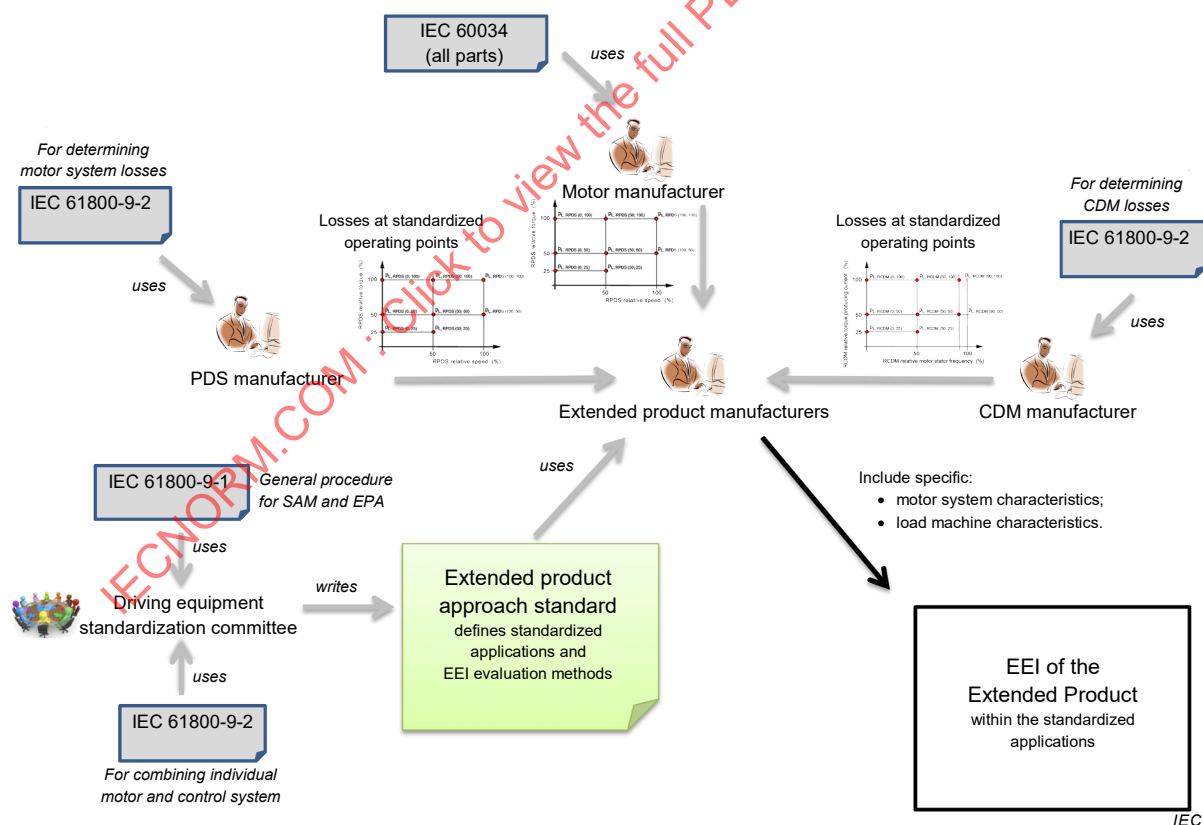


Figure 7 – Illustration of the workflow to determine the energy efficiency index (EEI) of an extended product

This document specifies how to determine the power losses of the motor system. The extended product committee shall specify the tolerances that shall apply to this process.



Motor and CDM manufacturers can provide data directly to the motor system manufacturer.

If the motor system is based on a starter, then only the motor losses are needed as input to the EPA.

Figure 8 – Illustration how to combine different data sources to determine the energy efficiency index (EEI) of an extended product

4.4 IE classes of line-fed motors

IEC 60034-30-1 defines IE classes for motors operated direct-on-line from IE1 up to IE4 (or IE5 respectively). The range above IE5 is currently not in use.

4.5 IE classes of converter-fed motors

According to IEC TS 60034-2-3, the harmonic voltage contents of CDM increases motor losses by about 15 % to 25 %.

Motors not designed to be supplied directly from mains for operation (DOL, direct on line) will be classified with an IE-class according to their losses at rated speed and torque (rated power) according to IEC TS 60034-30-2.

The IE Class for motors that are capable of running DOL is defined for fixed speed operation from IEC 60034-30-1 or for motors that could run when fed from CDM as defined from IEC TS 60034-30-2. Losses for the defined 7 operating points can be extrapolated from Annex D. Losses for these points should be provided by the motor manufacturer per the alternative efficiency determination method (AEDM) determined by using IEC 60034-2-3.

4.6 IE Classes of frequency converters (complete drive modules, CDM)

The reference CDM (RCDM) shall be declared with the efficiency class "IE1".

To declare the efficiency class of the CDM without considering the whole resulting PDS and to reflect the technological impact of the most significant parameter, the so-called "test load" shall be used as a defined unit.

The operating point for the IE class determination shall be taken according to 4.2.

AIC according to IEC TS 62578, which are CDMs with the ability to feed braking energy from the inertia of the load back to the electric power supply system, can be excluded from the IE classification. The relative losses of such AIC's are typically twice the losses of a CDM with no feedback option. Therefore, the huge efficiency contribution of an AIC cannot be demonstrated by just displaying its IE class and might be an option of the extended product with an embedded AIC.

CDMs having a mains current THC of 10 % or lower (according to IEC 61000-3-12), for example power factor correction (PFC) fed CDMs, can be excluded from the IE classification. The relative losses of an active rectifier are typically twice the losses of a CDM with a diode rectifier. However, the efficiency contribution of an active rectifier can be seen in improved power grid utilization and lower system level losses and disturbances (power transformer, cabling, voltage harmonics, flicker).

4.7 IES Classes of a PDS

The classification of the PDS shall be declared in a range of IES0 up to IES2.

IES classes remain limited to IES0, 1 and 2 in this document. Limiting values of classes IES3 to IES9 may be given in future editions of this document.

Relative losses of a PDS shall be determined by calculation or measurement. The calculation shall be done by arithmetic summation of the absolute losses of the converter-fed motor plus the converter and the auxiliaries.

The reference PDS (RPDS) (see Figure 4) shall be classified as IES1.

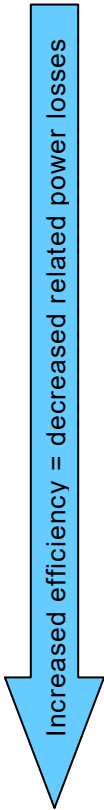
4.8 Consistency of IE and IES classes

It is important to understand that the IE classes of individual components such as converter-fed motors, grid operated motors or CDMs cannot be added in order to determine the IES class of a PDS.

The IES classification of PDSs can only be determined by the procedures laid out in 4.9 with a detailed knowledge of the losses of all components.

Individual IE classes are required for the classification of components without prior knowledge of the EP.

Generally, higher IE classes will demonstrate increased efficiency or decreased relative power losses.



Line fed motors Efficiency	Converter fed motors Efficiency	Converters (CDM) losses related to rated power	Power drive system (PDS) losses related to rated power
IE0 – not used	IE0 – u.c.	IE0 – more than 25 % higher than reference value	IES0 – more than 20 % higher than reference value
IE1 – can be mostly technically achieved	IE1 – u.c.	IE1 – reference value ± 25 %	IES1 – reference value ± 20 %
IE2 – can be achieved by enhancement	IE2 – u.c.	IE2 – more than 25 % lower than reference value	IES2 – more than 20 % lower than reference value
IE3 – needs significant amount of techniques	IE3 – u.c.	IE3 – u.c.	IES3 – u.c.
IE4 – will require new techniques	IE4 – u.c.	IE4 – u.c.	IES4 – u.c.
IE5 – experimental new technologies	IE5 – u.c.	IE5 – u.c.	IES5 – u.c.
IE6 – not used	IE6 – u.c.	IE6 – u.c.	IES6 – u.c.
IE7 – not used	IE7 – u.c.	IE7 – u.c.	IES7 – u.c.
IE8 – not used	IE8 – u.c.	IE8 – u.c.	IES8 – u.c.
IE9 – not used	IE9 – u.c.	IE9 – u.c.	IES9 – u.c.

Key

u.c. under consideration

NOTE IE classes for line fed motors are defined in IEC 60034-30-1. IE classes for converter fed motors will be defined in IEC TS 60034-30-2.

Figure 9 – Metrical relation of IE, IES classes

4.9 Determination of the IES class of a PDS by application of "reference" and "test" devices and guidance for the manufacturers

Methods for the determination of losses and IE classes of a motor are given in IEC 60034-30 (all parts) – see also Figure 9. Manufacturers may also define an IES class for a PDS that is using their motor. In that case, the manufacturer shall determine the relative losses of his motor when operated on a RCDM.

A CDM manufacturer shall declare the losses of his dedicated CDM and display an IE class according to Figure 9. The manufacturer may also declare an IES class for a PDS equipped with his CDM. In that case, the manufacturer shall measure or calculate the losses of his CDM. When real motor data is not available, the losses of the RM shall be used.

The CDM manufacturer may provide information in the documentation which determination methods described in Clause 7 have been used. This includes the expected IES classes for different combinations of a CDM and selected specific motors using the methods of this document.

Any or all available control features of the CDM may be employed to minimize losses during the PDS evaluation, and shall be reported as part of the record of evaluation.

A spreadsheet on the application of "test" and "reference" devices for the determination of IE and IES classes is shown in Figure 10. It also gives guidance to sole CDM or sole motor manufacturers regarding the determination of the IES class of a resulting PDS in combination with "test" or "reference" devices.

For PDS manufacturers, the upper left handed intersection field of "Motor" and "CDM" is applicable.

Combination of	CDM	Test CDM	Reference CDM (RCDM)	
Motor	Determine the IES class of the resulting PDS	Determine the IE class of the given motor (IEC TS 60034-2-3)	Determine the IES class of the resulting PDS	Guidance for motor manufacturer
Test load	Determine the IE class of the given CDM	Combination not used	Combination not used	
Reference Motor (RM)	Determine the IES class of the resulting PDS	Combination not used	Calculation model of a reference PDS	
	Guidance for CDM manufacturer			

IEC

Figure 10 – Guidance for CDM and Motor manufacturers for the usage of "test" and "reference" devices to determine the IE/IES classes

This approach allows the determination of the IES efficiency class of a final PDS even when only one component (the motor or the CDM) is available.

5 Mathematical model of CDM, motor and PDS

5.1 General

The mathematical models given in Clause 5 describe procedures for the determination of losses of the CDM, motor and PDS. They allow for the calculation of losses of a product without measurements.

The models consist of formulae, variables and parameters. The formulae describe state of the part loss calculation procedures, which are generally accepted today and published in literature. The variables depend on the operating point of the evaluated CDM, motor or PDS. The parameters are physical values describing a real product. In order to determine the losses of a product, these parameters have to be set according to specific design of the product.

If an extended product committee needs to define a typical CDM or PDS for their dedicated application(s), typical CDM or PDS parameters for those specific applications may be used. These deviations shall be provided in the extended product standard.

For the reference CDM (RCDM), reference motor (RM) and reference PDS (RPDS), reference parameters are defined respectively in 5.2, 5.3.3 and 5.4.

The procedure of the loss determination is illustrated in Clause 7.

5.2 CDM losses

5.2.1 General procedure and definition of the CDM and the test load

The CDM and test load are illustrated in Figure 11.

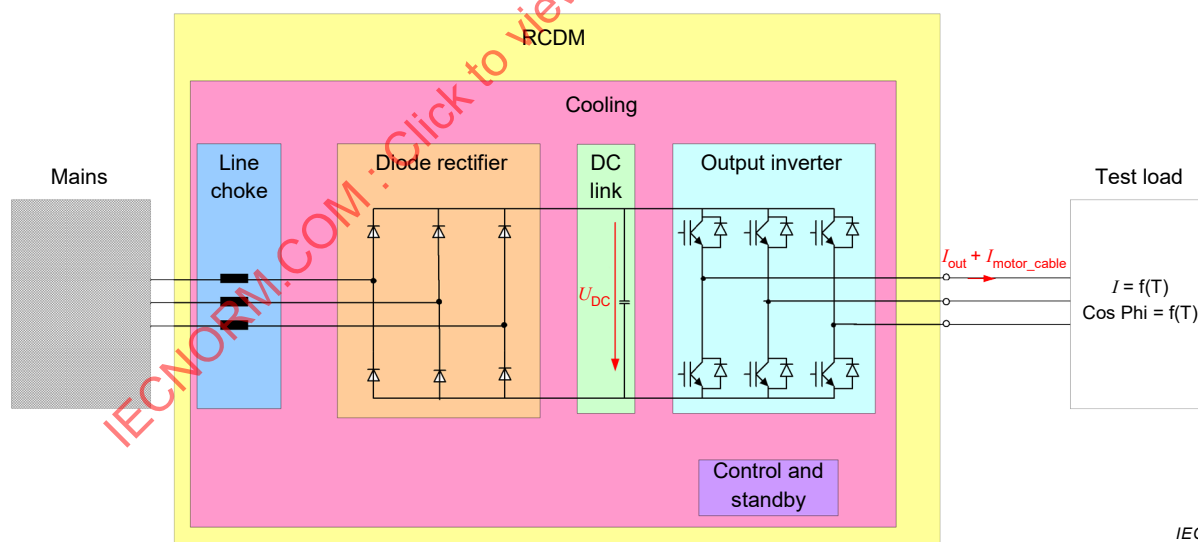


Figure 11 – Illustration of the CDM and the test load

Basically, it is the goal to describe the CDM losses as a function of torque and speed of the PDS. However, the CDM losses depend on its relative fundamental output voltage, its relative fundamental output current and the phase angle between the fundamental CDM output voltage and fundamental CDM output current.

The relative output voltage is approximately the same as the relative output frequency. This is at least true in the operating field up to the nominal motor speed. In the range of field

weakening, the relative CDM output voltage remains 1,00 for all motor speeds above the nominal motor speed.

In the first step, the motor speed has to be transferred into a CDM output frequency, and the motor torque has to be converted to an CDM output current and a phase angle between the fundamental output current and output voltage of the CDM.

In a first order approximation, the relative output speed of the PDS can be regarded as being identical to the relative CDM output frequency.

For CDM evaluation, the following data obtained by measurements on real motors shall be used as a test load data for all frequencies within scope:

Table 1 – Minimum test load currents at different points of operation

Torque producing current %	Test load current $\frac{I_{out}}{I_{r,out}}$ for the apparent power range $S_{r,eq}$ of				
	0,278 kVA (0,12 kW) to < 1,29 kVA (0,75 kW)	1,29 kVA (0,75 kW) to < 7,94 kVA (5,5 kW)	7,94 kVA (5,5 kW) to < 56,9 kVA (45 kW)	56,9 kVA (45 kW) to < 245 kVA (200 kW)	245 kVA (200 kW) to < 1 209 kVA (1 000 kW)
25	0,79	0,58	0,45	0,42	0,39
50	0,81	0,71	0,60	0,58	0,56
75	0,89	0,82	0,79	0,78	0,77
100	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Table 2 – Test load displacement factor between fundamental output current and fundamental output voltage at different points of operation

Torque producing current %	Test load displacement factor $\cos \phi$ for the apparent power range $S_{r,eq}$ of				
	0,278 kVA (0,12 kW) to < 1,29 kVA (0,75 kW)	1,29 kVA (0,75 kW) to < 7,94 kVA (5,5 kW)	7,94 kVA (5,5 kW) to < 56,9 kVA (45 kW)	56,9 kVA (45 kW) to < 245 kVA (200 kW)	245 kVA (200 kW) to < 1 209 kVA (1 000 kW)
25	0,34	0,38	0,49	0,54	0,57
50	0,51	0,60	0,71	0,75	0,78
75	0,64	0,72	0,80	0,83	0,85
100	0,73	0,79	0,85	0,86	0,87

NOTE For CDM testing, a tolerance of $\pm 0,08$ (see 7.9) of the test load displacement factors stated in Table 3 is allowed

Test load current in Table 1 and test load phase angle in Table 2 for different related torque values depend on the rated power. In order to limit the amount of required data, motors in a certain power range are classified within one class. The amount of uncertainty on the resulting power losses of the CDM introduced thereby is small enough to justify the simplification. The test load data in Table 1 and Table 2 can be used for any CDM relative output frequency. Data for torque producing currents different from the defined operating points in Table 1 and Table 2 shall be obtained by linear inter- and extrapolation from the defined values.

The mathematical model of a CDM shall be calculated with its rated output current. If a CDM is not specified with a rated output current, but only with a rated real power $P_{r,M}$, its rated CDM output current shall be calculated from the rated real power by the following formula, using the phase angle from Table 2 and the IE2 efficiency η_{nMotor} defined in IEC 60034-30-1:

$$I_{r,out} = \frac{P_{r,M}}{\sqrt{3} \cdot U_{1,r,out} \cdot \cos \Phi \cdot \eta_{nMotor}} \quad (3)$$

The rated apparent CDM output power shall be calculated as follows:

$$S_{r,equ} = \sqrt{3} \cdot U_{1,r,out} \cdot I_{r,out} = \frac{P_{r,M}}{\cos \Phi \cdot \eta_{nMotor}} \quad (4)$$

For calculating the losses of a CDM with the input variables from Table 1 and Table 2, the analytical Formulae (5) to (16) given below shall be used. In order to calculate the losses of a real CDM, the parameter values of the real CDM shall be used.

The results of the RCDM calculations are given in Table 18 for the IE class determination and in Table A.1 for the eight operating points defined in Figure 6. The RCDM is based on 400V supply voltage.

In contrast to Annex B, which describes the PDS sub-frames from the mains to the load, 5.2 starts with those parts of the PDS creating highest losses, followed by the other parts contributing to the overall PDS losses with a minor impact.

5.2.2 Output inverter losses

5.2.2.1 General

The major part of the CDM losses is created by the output inverter section of the CDM. Its losses are described by the following analytical formulae, which are well established in literature. These formulae assume that the CDM output current is sinusoidal and the PWM pulses are randomly distributed over the sinusoidal current fundamental waveform. The random distribution is achieved as soon as the PWM frequency is at least 20 times the fundamental frequency of the motor current and the standard space vector modulation algorithm is used. Reduced losses due to overmodulation of the CDM are not taken into account. The reference CDM is consequently calculated according to these assumptions. For the loss calculation of a real CDM, the parameter values on power semiconductors shall be determined either at actual temperature when operating the CDM or at maximum operating temperature specified in the datasheet.

For a real CDM, the parameter values on power semiconductors and other devices may be referred to typical values. Additionally, the model presented in 5.2 may be used for the determination of losses of a CDM by calculation. The manufacturer is allowed to use a different calculation model or loss simulations. Manufacturers are responsible to apply correct accuracies in Formula (21).

5.2.2.2 Transistor on state losses

Transistor on state losses shall be calculated according to the following formula:

$$P_{L,on,T} = \sqrt{2} \cdot I_{out} \cdot U_{T,th} \cdot \left(\left(\frac{1}{2\pi} \right) + \frac{1,22 \cdot m \cdot \cos \phi}{8} \right) + \frac{U_{T,r} - U_{T,th}}{I_{r,out}} \cdot 2 \cdot I_{out}^2 \cdot \left(\frac{1}{8} + \frac{1,22 \cdot m \cdot \cos \phi}{3\pi} \right) \quad (5)$$

The RCDM parameters in Formula (5) are given in Table 3:

Table 3 – Reference parameters for Formula (5)

Abbreviation	Description	RCDM parameter value	Unit
$U_{T,th}$	Threshold voltage of the power transistor (IGBT)	1,0	V
$U_{T,r}$	On state voltage of the power transistor (IGBT) at rated CDM output current	2,3	V
$I_{r,out}$	Rated CDM output current, RMS value		A

The variables in Formula (5) are given in Table 4:

Table 4 – Variables for Formula (5)

Abbreviation	Description	Unit
I_{out}	CDM output current, RMS value according to Table 1	A
ϕ	Phase angle between fundamental CDM output voltage and fundamental CDM output current according to Table 2	°
m	Modulation index, identical to the relative CDM output frequency up to the rated output frequency	

5.2.2.3 Freewheeling diode on state losses

Diode on state losses shall be calculated according to the following formula:

$$P_{L,on,D} = \sqrt{2} \cdot I_{out} \cdot U_{D,th} \cdot \left(\left(\frac{1}{2\pi} \right) - \frac{1,22 \cdot m \cdot \cos \phi}{8} \right) + \frac{U_{D,r} - U_{D,th}}{I_{r,out}} \cdot 2 \cdot I_{out}^2 \cdot \left(\frac{1}{8} - \frac{1,22 \cdot m \cdot \cos \phi}{3\pi} \right) \quad (6)$$

The RCDM parameters in Formula (6) are given in Table 5:

Table 5 – Reference parameters for Formula (6)

Abbreviation	Description	RCDM parameter value	Unit
$U_{D,th}$	Threshold voltage of the power diode	1,1	V
$U_{D,r}$	On state voltage of the power diode at rated CDM output current	2,4	V

The variables in Formula (6) are identical to the variables in Formula (5).

5.2.2.4 Transistor switching losses

It is standard practice in power IGBT datasheets to describe the transistor switching energy as a function of the inverter output current. Usually, this value is obtained by recording the IGBT collector to emitter voltage and the IGBT collector current during switching, multiplying those graphs to obtain the instantaneous power losses and integrating those losses over one switching event to finally get the switching loss energy. In a first order approximation, the resulting curve shows the energy increasing in a linear way with the collector current and the DC link voltage of the inverter. The ratio between the switching energy and the product of DC link voltage and IGBT collector current is often described in literature as a factor E_T . This factor contains the sum of the loss energy at switching on and switching off of a power transistor.

At low current, the current which is relevant for determining the switching losses is higher than the inverter output current, because the motor cables lead to an additional output current. In order to consider this effect, a correction term $I_{\text{motor_cable}}$ is introduced. This current is added to the inverter output current for the calculation of the switching losses. For the reference converter, a simple model for the cable current is given in Table 6 below.

Assuming the inverter is producing a sinusoidal output current with a fundamental frequency that is substantially (at least factor 15) lower than the switching frequency, the transistor switching losses shall be calculated according to the following formula:

$$P_{L,sw,T} = \frac{E_T}{\pi} \cdot U_{DC} \cdot \sqrt{2} \cdot (I_{\text{out}} + I_{\text{motor_cable}}) \cdot f_{sw} \quad (7)$$

The RCDM parameters in Formula (7) are given in Table 6:

Table 6 – Reference parameters for Formula (7)

Abbreviation	Description	RCDM parameter value	Unit
E_T	Switching loss energy of the power transistor (IGBT) per volt and per ampere	$7,5 \times 10^{-7}$	$\frac{J}{V \cdot A}$
U_{DC}	CDM DC link voltage	540	V
$I_{\text{motor_cable}}$	Motor cable current, relevant for increased switching losses	$I_{\text{motor_cable}} = 4$ for $I_{r,out} \leq 4$ A $I_{\text{motor_cable}} = i_{r,out}$ for $4 \text{ A} < I_{r,out} < 10$ A $I_{\text{motor_cable}} = 10$ for $I_{r,out} \geq 10$ A	A
f_{sw}	CDM switching frequency	4 000 for a CDM up to 90 kW 2 000 for a CDM above 90 kW	Hz

The variable in Formula (7) is again the inverter output current I_{out} . The switching losses do not depend on the motor speed.

If the inverter output frequency was identical to 0 Hz for all operating time of the CDM, Formula (7) would not be correct anymore. However, it can be assumed that for nearly all applications at least a small output frequency different from 0 Hz, for example 0,05 Hz, will be found, so Formula (7) shall be used for all applications.

5.2.2.5 Freewheeling diode switching losses

The diode switching losses shall be calculated in the same way:

$$P_{L,sw,D} = \frac{E_D}{\pi} \cdot U_{DC} \cdot \sqrt{2} \cdot (I_{\text{out}} + I_{\text{motor_cable}}) \cdot f_{sw} \quad (8)$$

The RCDM parameters in Formula (8) are given in Table 7:

Table 7 – Reference parameters for Formula (8)

Abbreviation	Description	RCDM parameter value	Unit
E_D	Switching loss energy of the power diode per volt and per ampere	$2,5 \times 10^{-7}$	$\frac{J}{V \cdot A}$

5.2.2.6 Output inverter total losses

The losses calculated in the Formulae (5) to (8) define the losses created in an individual power semiconductor. The sum of the output inverter losses shall be calculated for a three phase CDM with six transistors and diodes as follows:

$$P_{L, \text{inverter}} = 6 \cdot (P_{L, \text{on}, T} + P_{L, \text{on}, D} + P_{L, \text{sw}, T} + P_{L, \text{sw}, D}) \quad (9)$$

5.2.3 Input converter losses

5.2.3.1 Active infeed converter

If the input converter section consists of an active infeed converter, its losses shall be calculated in an identical way as the output inverter section. In this case, the output current of the active infeed part of the converter is the mains input current of the CDM.

The AC side fundamental frequency of the active infeed converter is identical to the mains frequency. This limits the possible values for the modulation index m close to 1. The displacement factor, $\cos \phi$, between fundamental input current and fundamental input voltage is close to 1 in case of motoric operation of the CDM or to -1 in case of regenerative operation. Due to this displacement factor, the CDM input current is lower than the CDM output current for AIC infeed converters; it corresponds to $I_{\text{out}} \cdot m \cdot \cos \phi$.

The reference CDM is assumed not to contain an active infeed converter, but a diode rectifier.

5.2.3.2 Diode rectifier

The fundamental of the CDM input current is proportional to the active CDM output power and is calculated by the product of the inverter output current, output phase angle and modulation index. The RMS value of the CDM input current is furthermore proportional to a factor $1/\lambda$. The factor λ , being defined in Formula (B.2) as ratio of the active input power to the apparent input power of the CDM, is proportional to the displacement factor between CDM input current and decreasing with the harmonic content of the input current waveform. Standard values of λ for different rectifier topologies are given in B.4.2.

Finally, the rectifier losses shall be calculated according to Formula (10):

$$P_{L, \text{rectifier}} = 6 \cdot \left(\frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot m \cdot \cos \phi \cdot I_{\text{out}} \cdot U_{D, \text{th}, \text{rectifier}} + \frac{U_{D, \text{r}, \text{rectifier}} - U_{D, \text{th}, \text{rectifier}}}{\cos \phi_r \cdot I_{r, \text{out}}} \cdot \frac{\left(\frac{m \cdot \cos \phi \cdot I_{\text{out}}}{\lambda} \right)^2}{2} \right) \quad (10)$$

The RCDM parameters in Formula (10) are given in Table 8:

Table 8 – Reference parameters for Formula (10)

Abbreviation	Description	RCDM parameter value	Unit
$U_{D,th,rectifier}$	Threshold voltage of the rectifier power diode	0,9	V
$U_{D,r,rectifier}$	On state voltage of the rectifier power diode at rated CDM input current	2,2	V
λ	Power factor of the CDM input current and voltage	0,7	

The variables in Formula (10) are given in Table 9:

Table 9 – Variables for Formula (10)

Abbreviation	Description	Unit
ϕ_t	Phase angle between fundamental CDM output voltage and fundamental CDM output current at rated torque according to Table 2	°

5.2.4 Input choke losses

Input chokes are sometimes used to reduce harmonics. The inductance of the choke decreases with higher input power of the converter. Typically, the impedance of the input choke is chosen to be a certain part $k1_{choke}$ of the rated inverter impedance U_{mL1}/I_{equ} . Assuming the voltage drop at the resistive part of the input choke to be a certain part $k2_{choke}$ of the overall voltage drop on the input choke, the losses in the input choke shall be calculated to

$$P_{L,choke} = k1_{choke} \cdot k2_{choke} \cdot 3 \cdot \frac{\left(\frac{m \cdot \cos \phi \cdot I_{out}}{\lambda} \right)^2}{\cos \phi_t \cdot I_{r,out}} \cdot U_{mL1} \quad (11)$$

The RCDM parameters for the reference converter in Formula (11) are given in Table 10:

Table 10 – Reference parameters for Formula (11):

Abbreviation	Description	RCDM parameter value	Unit
$k1_{choke}$	Choke impedance, relative to the rated CDM impedance	0,02	
$k2_{choke}$	Relative voltage drop on the resistive part of the choke	0,25	
U_{mL1}	Phase to ground voltage of the supply network	230	V

The losses of DC chokes can be calculated in the same way as the losses for AC chokes.

The losses of low frequency line harmonic filters are calculated in the same way, because the major part of these losses is generated in the choke and losses in the filter capacitors can be neglected.

5.2.5 DC link losses

As explained in Clause B.5, the DC link losses are mainly generated by resistors which are required to ensure a proper voltage sharing between the DC link capacitors and by the equivalent series resistor inside each capacitor. In a first order approximation, the amount of DC link capacitance is proportional to the rated inverter power. Consequently, the load independent losses in the resistors in parallel to the capacitors are proportional to the rated inverter output current as well. Furthermore, they are proportional to the square of the DC link voltage. The losses in the equivalent series resistor of the capacitor depend on the square of the AC part of the rectifier output current. Losses caused by high frequency inverter current are small enough to be neglected. The DC link losses shall finally be calculated by:

$$P_{L,dc_link} = k1_{DC_link} \cdot I_{r,out} \cdot U_{DC}^2 + k2_{DC_link} \cdot \frac{\left(\frac{\sqrt{3}}{1,35} \cdot \frac{m \cdot \cos \phi \cdot I_{out}}{1 + 50 \cdot k1_{choke}} \right)^2}{I_{r,out}} \quad (12)$$

The RCDM parameters for the reference converter in Formula (12) are given in Table 11:

Table 11 – Reference parameters for Formula (12)

Abbreviation	Description	RCDM parameter value	Unit
$k1_{DC_link}$	Load independent DC link loss parameter	8×10^{-7}	$\frac{1}{\Omega \cdot A}$
$k2_{DC_link}$	Load dependent DC link loss parameter	2	$\Omega \cdot A$

The determination of the parameters $k1_{DC_link}$ and $k2_{DC_link}$ for a CDM is explained in Clause B.5.

5.2.6 Current conductor losses

Ohmic losses are generated for example in current conductors of the CDM. In the mathematical model, these losses depend on the amplitude of the CDM output current and the ohmic resistance of current conductors. This ohmic resistance reduces in a linear way with increased rated CDM output current, because higher power CDMs use current conductors with a larger diameter. Consequently, the voltage drop at the ohmic conductor elements remains independent of the rated CDM current.

$$P_{L,rails} = \frac{U_{rails}}{I_{r,out}} I_{out}^2 \quad (13)$$

The RCDM parameter for the reference CDM in Formula (13) is given in Table 12:

Table 12 – Reference parameters for Formula (13)

Abbreviation	Description	RCDM parameter value	Unit
U_{rails}	Voltage drop at ohmic conductor elements at rated CDM current	0,7	V

5.2.7 Control and standby losses

In Clause B.10, the load independent losses are explained. In order to get comparable results, these losses shall be evaluated without external components such as position sensors, communication electronics and motor brakes connected. For the reference converter, they shall assumed to be the value in Table 13.

Table 13 – Reference parameter for Formula (15)

Abbreviation	Description	RCDM parameter value	Unit
$P_{L,control}$	Standby and control losses	50	W

5.2.8 Cooling loss factor

State-of-the-art CDMs use a cooling system to transport the losses to the ambient. In many cases, for example a fan is used, which is a part of the CDM. This cooling component causes additional losses. In the mathematical model, these losses are calculated proportional to all other losses created in the CDM at its operating point of maximum losses.

$$P_{L,cooling} = k_{L,cooling} \cdot (P_{L,inverter(90;100)} + P_{L,rectifier(90;100)} + P_{L,rails(90;100)} + P_{L,DC_link(90;100)} + P_{L,choke(90;100)} + P_{L,control}) \quad (14)$$

For the RCDM, the cooling loss parameter is set to 20 % (see Table 14):

Table 14 – Reference parameter for Formula (14)

Abbreviation	Description	RCDM parameter value	Unit
$k_{L,cooling}$	Cooling loss parameter	0,2	

5.2.9 Other CDM losses

All losses in other parts of the CDM are neglected in the mathematical model, as they are significantly lower than the losses described above.

5.2.10 Overall CDM losses

All the losses in the CDM shall be with reference to the rated apparent output power of the PDS, which is formed by the rated output phase voltage and rated output current of the CDM. As a final result of 5.2, the absolute CDM losses result in:

$$P_{L,CDM} = P_{L,inverter} + P_{L,rectifier} + P_{L,choke} + P_{L,rails} + P_{L,DC_link} + P_{L,control} + P_{L,cooling} \quad (15)$$

The relative losses of the CDM result in:

$$P_{L,CDM} = \frac{P_{L,CDM} / kW}{S_{r,equ} / kVA} \quad (16)$$

The following Figure 12 shows the relationship between relative torque producing current, relative motor stator frequency and relative losses $p_{L,CDM,relative}$ of the 9,95 kVA (see Table 18) reference CDM operated at 400V:

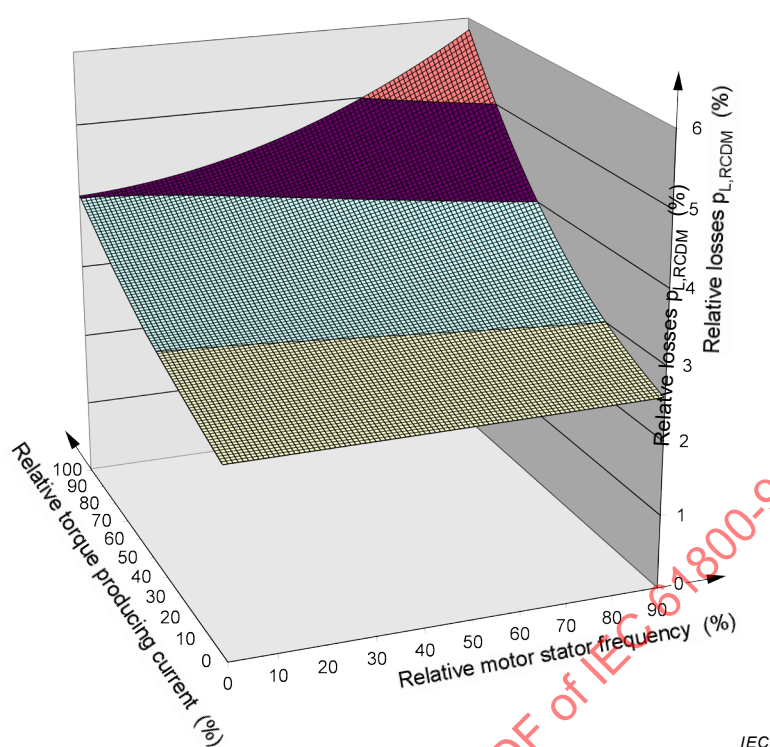


Figure 12 – Relative losses $p_{L,RCDM}$ of the 9,95 kVA RCDM

The following Table 15 shows the relative losses of the 400 V/9,95 kVA reference CDM at the operating points defined in Figure 6:

Table 15 – Relative losses of the 400 V/9,95 kVA reference CDM at the operating points described in Figure 6

$S_{r,eq}$ kVA	I_{rout} A	$p_{L,RCDM}$ (0;25) %	$p_{L,RCDM}$ (0;50) %	$p_{L,RCDM}$ (0;100) %	$p_{L,RCDM}$ (50;25) %	$p_{L,RCDM}$ (50;50) %	$p_{L,RCDM}$ (50;100) %	$p_{L,RCDM}$ (90;50) %	$p_{L,RCDM}$ (90;100) %
9,95	14,4	2,80	3,09	4,02	2,86	3,28	4,64	3,61	5,84

The value of 5,84 % of losses refers to the rated apparent output power of 9,95 kVA, resulting in absolute loss value of 581 W. The relative losses of RCDM's with a different rated power are given for the operating point (90;100) in Table 18 and in Table A.1 for all operating points defined in Figure 6.

5.3 Motor losses

5.3.1 General

Three-phase asynchronous motors are widely used in industrial applications. They are standard products and generally able to run direct on-line or on variable voltage and frequency supplied by a CDM.

In order to determine losses, efficiencies and the efficiency class of a PDS, the user needs information on motor losses. Such information can be obtained either

- from the motor manufacturer, or

- from losses of the reference motor as given in Annex A, or
- from typical losses of standard IE2 machines as given in Annex D.

The interpolation procedure given in Annex D shall be applied to obtain losses and efficiency at any required operating point (load, torque), for example those of 4.2, from the losses provided by the manufacturer at the seven reference points (see Table F.2).

5.3.2 Additional harmonic losses of three-phase asynchronous motors fed by a CDM

Often, losses of three-phase induction motors are only available for on-line operation at purely sinusoidal voltage. When such a motor is operated on a CDM, additional harmonics losses P_{LHL} are caused by the non-sinusoidal voltage supply.

Preferably, the motor should be re-tested on a CDM to determine these losses (see Annex D).

Alternatively, the additional harmonic losses can be determined by using a fixed ratio r_{HL} as an estimation.

r_{HL} represents the ratio of additional harmonic losses of converter supply to losses of the motor supplied with sinusoidal input voltage at nominal power and nominal frequency (see IEC 60034-2-3).

The total losses are:

$$P_{LHL} = r_{HL} \cdot P_{LTsin} \quad (17)$$

where

P_{LTsin} are the total losses determined at sinusoidal power supply at any operating point;

P_{LHL} are the total losses estimated for CDM power supply at that operating point.

Additional harmonic losses due to a converter supply shall be considered constant and independent of load and speed. They are dependent on the switching frequency.

Unless r_{HL} is known from measurements according to IEC 60034-2-3, the following estimations shall be used:

$r_{HL} = 0,15$ (15 %) for motors with a rated output power up to 90 kW and 4 kHz switching frequency

$r_{HL} = 0,25$ (25 %) for motors with a rated output power above 90 kW and 2 kHz switching frequency

5.3.3 Reference motor (RM) data

Reference motor losses are given in Annex A.

The tabled values were derived from the 50 Hz IE2 efficiency values of 4-pole asynchronous machines according to IEC 60034-30-1, from the factor r_{HL} as described in 5.3.2, from the factors K_{fe} , K_{ll} and K_{fw} all set equal to 0,5 as described in Annex D and from a voltage drop correction factor of $400/360 = 1,11$ at rated speed (see Annex D).

The 50 Hz reference motor values shall also be used in 60 Hz applications.

5.4 Reference PDS (RPDS)

5.4.1 Reference PDS losses

The resulting electrical power losses of the PDS at a specific speed (n) and torque (T) operation point will be the sum of the electrical power losses of the subcomponents of the PDS according to Formula (18):

$$P_{L,PDS(n;T)} = P_{L,CDM(n;T)} + P_{L,Aux(n;T)} + P_{L,Mot(n;T)} \quad (18)$$

where

$P_{L,CDM}$ is the losses of the CDM according to methods from 5.2;

$P_{L,Mot}$ is the losses of the motor according to methods from 5.3;

$P_{L,Aux}$ is the losses of the auxiliaries according to Annex B.

A reference PDS (RPDS) is defined to be a single motor (RM) and a single CDM (RCDM). Auxiliaries are not included in the reference PDS.

The selection of matching RM and RCDM for the RPDS is done according to power, see Annex A.

The calculation of losses is generally performed according to Formula (18). However, RPDS losses at 100 % speed and 100 % torque are determined according to Formula (19) by using the 90 % frequency and 100 % torque point of the RCDM and the 100 % speed and 100 % torque point of the motor.

The 90 % frequency of the RCDM is used in order to avoid overmodulation, which would appear for 100 % frequency of the RCDM. Overmodulation decreases the losses of the CDM but increases harmonic motor losses due to higher harmonic contents in the motor's voltages and currents.

The loss calculation of the RPDS is using the assumption that the RCDM losses at the operating point 100 % frequency and 90 % voltage are the same as for the operating point at 90 % frequency and 90 % voltage. It is further assumed that fundamental losses of the RM increase with a correction factor $k_{VD} = 1,11$ (according to 10 % voltage drop – see Clause D.4) compared to Formula (18).

$$P_{L,RPDS(100;100)} = P_{L,RCDM(90;100)} + k_{VD} \cdot P_{L,RM(100;100)} \quad (19)$$

The reference parameter for Formula (19) is given in Table 16.

Table 16 – Reference parameter for Formula (19)

Abbreviation	Description	Value	Unit
k_{VD}	Correction factor of motor losses for the RPDS, see F.3.1.	1,11	

It is in the responsibility of the PDS supplier to add all losses that are part of the PDS, for example motor, CDM, auxiliaries (filter, cable, etc.), for the calculation of losses of an actual PDS.

The following Table 17 shows the relative losses of an 400 V/7,5 kW reference PDS (RCDM and RM) at the operating points defined in Figure 6:

Table 17 – Relative losses of the 400 V/7,5 kW RPDS

$P_{r,M}$ kW	$P_{L,RPDS}$, relative (0;25) %	$P_{L,RPDS}$, relative (0;50) %	$P_{L,RPDS}$, relative (0;100) %	$P_{L,RPDS}$, relative (50;25) %	$P_{L,RPDS}$, relative (50;50) %	$P_{L,RPDS}$, relative (50;100) %	$P_{L,RPDS}$, relative (100;50) %	$P_{L,RPDS}$, relative (100;100) %
7,5	6,21	7,80	14,63	7,79	9,65	17,36	13,45	24,01

The relative losses of RPDS with different rated powers are given in Table A.3.

An example for the relative losses is shown in Figure 13. All relative values are related to the rated output power of the PDS.

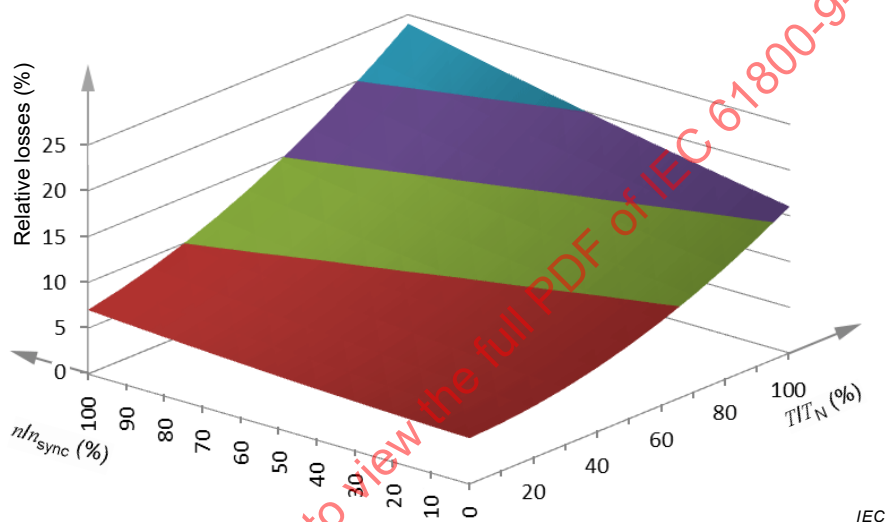


Figure 13 – Example of the relative power losses of PDS as function of speed and torque

5.4.2 PDS losses at different switching frequencies

PDS are often operated with parameters that are different from those used by the RPDS. An important parameter for the loss calculation of the CDM is the switching frequency. An increased switching frequency will increase the losses of the CDM but the additional harmonic losses of the motor will decrease.

The resulting power losses of a PDS for a dedicated switching frequency will be the sum of the electrical power losses of the subcomponents of the PDS, see Formula (20) and example in figure 12, when the operating point (speed, torque) is kept constant.

$$R_{L,PDS}(f_{sw}) = R_{L,CDM}(f_{sw}) + R_{L,Aux}(f_{sw}) + R_{L,Mot}(f_{sw}) \quad (20)$$

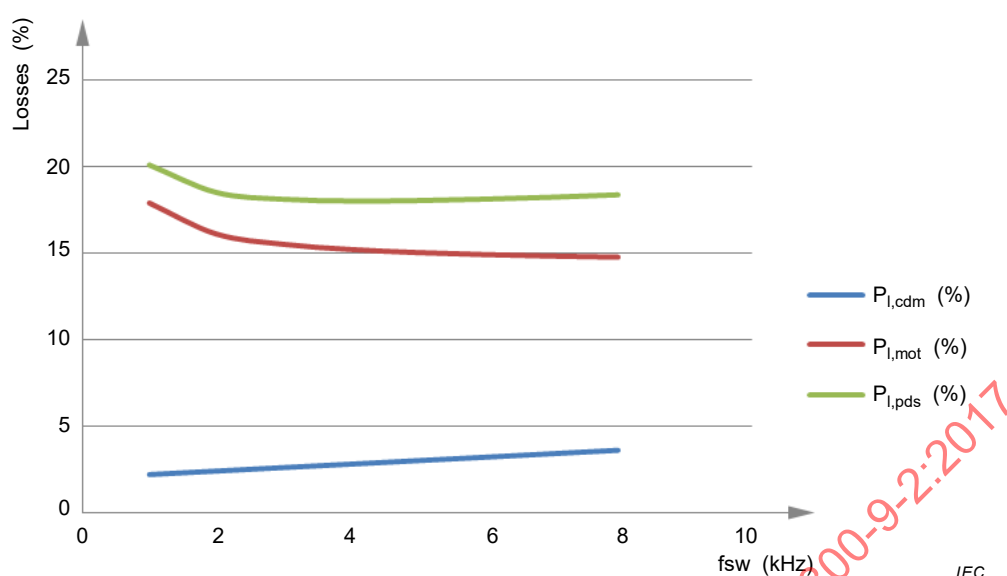


Figure 14 – Example of the relative power losses versus switching frequency

5.5 PDS losses for regenerative operation

Some PDSs have the capability of handling regenerative loads, i.e. loads that generate electrical power. Power can be generated from decelerating the inertia of a load or motor, or from torque produced by the load (for example by draft in a fan).

Some CDMs have the capability to feed the generated power into the mains by using an active infeed converter (AIC). The power fed into the mains is the generated power minus the losses of the PDS.

A CDM can also have the capability to dissipate the generated power into heat, which is distributed inside or outside of the CDM (for example by a resistor), see Figure 14. The power dissipated in the resistor is considered as auxiliary losses for the PDS loss calculation, see Formula (18).

A CDM can also have the capability to store electrical energy in batteries, capacitors or similar technologies. This energy can later be reused when active motor power is needed. Such storage devices cause losses that have to be added as auxiliary losses when calculating the losses of the extended product.

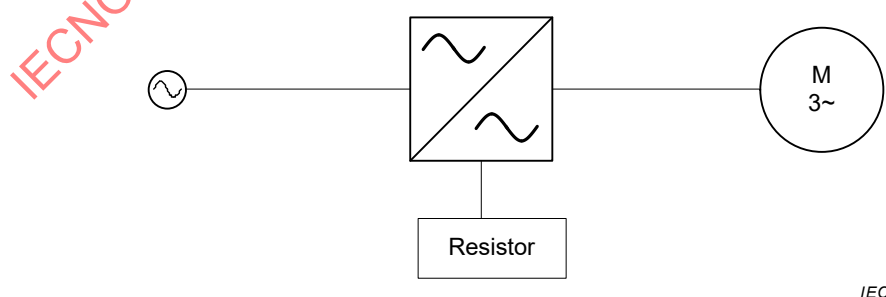


Figure 15 – Example of a CDM with resistor for dissipating generated power

5.6 Losses of motor starters

For the purpose of loss calculations, the power losses of motor starters (including control losses) according to the product standard IEC 60947-4-1 shall be calculated as 0,1 % of the rated motor power.

Soft starters according to the product standard IEC 60947-4-2 are usually mechanically bypassed at longer duty cycle (S1 operation) and therefore calculated like motor starters.

The power losses of motor starters are sufficiently small so that the same IE class is used for a motor as well as for a motor controlled by a starter.

6 Limits of IE and IES classes

6.1 General

The losses or efficiency of the reference CDM, reference motor and reference PDS are used as a basis for assessing compliance with an IE and IES class of an existing motor, CDM or PDS.

Reference devices are associated with IE1 and IES1. Existing devices with losses lower than the reference losses (i.e. better efficiency) are identified by levels higher than 1. The threshold and tolerance of each level are specified in 6.2 to 6.4.

Compliance with an IE and IES class can be shown by either measurements or by calculations, which are described in Clause 7. The various test points shown in Figure 4 can be used to determine the losses and energy efficiency of an overall system for a specific application.

In order to minimize the certification process, compliance with an IE class shall be shown for the CDM at rated current and 90 % rated motor stator frequency, respectively rated motor voltage, only.

Compliance with an IES class shall be shown for the PDS at rated torque and rated shaft speed only.

Regenerative operation is not taken into account when determining an IE or IES class for a CDM or a PDS.

NOTE The rated output current of a CDM is its maximum steady-state output current.

6.2 CDM

The reference CDM is described by the parameters given in 5.2. Its losses are given in Table 18.

The power rating of a RCDM is defined according to its apparent output power, which is of most influence on CDM losses.

As CDMs are usually rated according to output current rather than apparent output power, examples of rated RCDM output currents are given in Table 18 for typical standard line voltages. The relation to standard motor power ratings defined in IEC 60072-1 and IEC 60034-30-1 can be found in Table A.1.

Table 18 – Reference CDM losses for class IE1 definition

Apparent output power $S_{r, \text{equ}}$	Relative losses $p_{L, \text{RCDM}} (90, 100)$	Absolute losses $P_{L, \text{RCDM}} (90, 100)$	Examples for CDM output current at typical line voltages $I_{r, \text{out}} = \frac{S_{r, \text{equ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{1, r, \text{out}}}$			
kVA	%	kW	$U_{1, r, \text{out}} = 200\text{V}$	$U_{1, r, \text{out}} = 400\text{V}$	$U_{1, r, \text{out}} = 460\text{V}$	$U_{1, r, \text{out}} = 690\text{V}$
			A			
0,278	35,85	0,100	0,803	0,401	0,349	0,233
0,381	27,30	0,104	1,10	0,550	0,478	0,319
0,500	21,80	0,109	1,44	0,722	0,627	0,418
0,697	16,84	0,117	2,01	1,01	0,875	0,583
0,977	13,21	0,129	2,82	1,41	1,23	0,818
1,29	11,02	0,142	3,73	1,86	1,62	1,08
1,71	9,51	0,163	4,94	2,47	2,15	1,43
2,29	8,21	0,188	6,62	3,31	2,88	1,92
3,30	7,20	0,237	9,54	4,77	4,15	2,76
4,44	6,72	0,299	12,8	6,41	5,58	3,72
5,85	6,39	0,374	16,9	8,44	7,34	4,89
7,94	6,01	0,477	22,9	11,5	9,96	6,64
9,95	5,84	0,581	28,7	14,4	12,5	8,32
14,4	5,43	0,781	41,6	20,8	18,1	12,1
19,5	5,18	1,01	56,2	28,1	24,4	16,3
23,9	5,05	1,21	68,9	34,4	30,0	20,0
28,3	4,97	1,41	81,6	40,8	35,5	23,6
38,2	4,87	1,86	110	55,2	48,0	32,0
47,0	4,79	2,25	136	67,8	58,9	39,3
56,9	4,75	2,70	164	82,1	71,4	47,6
68,4	4,74	3,24	197	98,7	85,8	57,2
92,8	4,69	4,35	268	134	116	77,6
111	4,66	5,17	321	160	139	93,0
135	4,11	5,55	391	195	170	113
162	4,10	6,65	468	234	203	136
196	4,09	8,02	566	283	246	164
245	4,07	10,0	706	353	307	205
302	4,10	12,4	872	436	379	253
381	4,09	15,6	1 099	550	478	319
429	4,09	17,5	1 239	619	539	359
483	4,09	19,8	1 396	698	607	405
604	4,08	24,7	1 745	872	758	506
677	4,08	27,6	1 954	977	850	566
761	4,08	31,1	2 198	1 099	956	637
858	4,08	35,0	2 477	1 239	1 077	718
967	4,08	39,4	2 791	1 396	1 214	809
1 088	4,08	44,3	3 140	1 570	1 365	910
1 209	4,08	49,3	3 489	1 745	1 517	1 011

NOTE 1 The change of the switching frequency from 4 kHz at 111 kVA to 2 kHz at 135 kVA causes a discontinuity in the relative RCDM loss values $p_{L, \text{RCDM}}$ between those power ratings.

If the rated apparent output power of a CDM is between two values in Table 18, the relative loss value $p_{L,RCDM}$ of the RCDM with the next higher power rating shall be used for the IE class determination. The RCDM losses in Table 18 shall be used for all low voltage (above 200 V up and equal to 1 000 V) CDMs. For a given apparent output power rating, CDMs with an input voltage up to and including 200V are expected to create higher losses than CDMs rated for higher input voltage. In order to take this into account, the values in Table 18 shall be multiplied by a factor of 1,35 (reference IEC TS 61800-8) when assessing the IE class for a CDM with a rated input voltage up to 200 V.

A CDM shall be classified as IE1 if its relative losses are within ± 25 % of the RCDM value.

A CDM shall be classified as IE0 if its relative losses are more than 25 % higher than the RCDM value.

A CDM shall be classified as IE2 if its relative losses are more than 25 % lower than the RCDM value.

These definitions are illustrated in Figure 16:

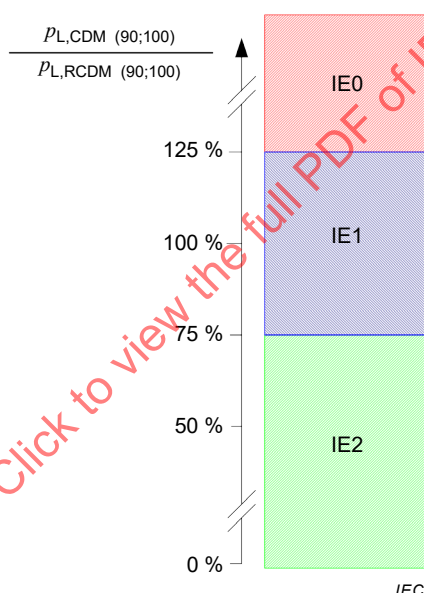


Figure 16 – Illustration of IE classes for a CDM

NOTE 2 In this document, limit classes for CDMs are defined up to IE2 only. Classes IE 3 up to IE 9 are reserved to describe future technological improvements of CDMs.

In this document, the determination of IE classes is only mandatory for CDMs converting AC input power to AC output power.

6.3 Motor

IE classes for motors operated on a CDM are defined in IEC 60034-30 (all parts).

6.4 PDS

The IES classes of PDS system are defined in relation to RPDS losses. The IES1 class of PDS is defined by the loss level of the RPDS.

A PDS shall be classified as IES1 if its relative losses are within ± 20 % of the value specified in Table 19.

A PDS shall be classified as IES0 if its relative losses are more than 20 % higher than the value specified in Table 19.

A PDS shall be classified as IES2 if its relative losses are more than 20 % lower than the value specified in Table 19.

These definitions are illustrated in Figure 17:

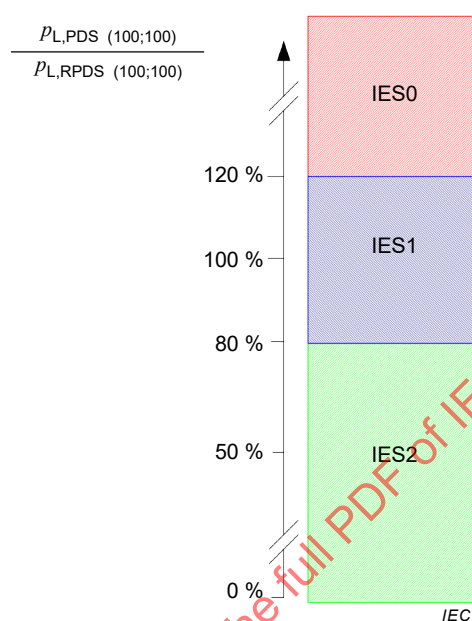


Figure 17 – Illustration of IES classes of a PDS

The reference PDS losses are described in 5.4.1. The losses of the reference PDS result in:

Table 19 – Reference PDS losses of IES class 1 definition

$P_{r,M}$ kW	$P_{L,RPDS(100;100)}$ % of $P_{r,M}$	$P_{L,RPDS(100;100)}$ kW
0,12	171,41	0,206
0,18	127,38	0,229
0,25	102,32	0,256
0,37	79,67	0,295
0,55	61,43	0,338
0,75	51,70	0,388
1,1	43,98	0,484
1,5	39,06	0,586
2,2	34,55	0,760
3	31,59	0,948
4	29,10	1,16
5,5	26,55	1,46
7,5	24,06	1,80
11	21,65	2,38
15	19,94	2,99
18,5	18,85	3,49
22	18,05	3,97
30	16,86	5,06
37	16,19	5,99
45	15,44	6,95
55	14,77	8,13
75	13,91	10,4
90	13,63	12,3
110	13,15	14,5
132	12,80	16,9
160	12,45	19,9
200	12,09	24,2
250	12,06	30,1
315	12,05	38,0
355	12,05	42,8
400	12,04	48,2
500	12,03	60,2
560	12,04	67,4
630	12,03	75,8
710	12,03	85,4
800	12,04	96,3
900	12,04	108
1 000	12,04	120

If the rated power of a PDS is between two values in Table 19, the relative loss value $P_{L,RPDS(100;100)}$ of the RPDS with the next higher rating shall be used for the IES class determination.

7 Loss determination

7.1 General

The purpose of Clause 7 is to define type tests, which shall be performed on the CDM to verify the IE classification and for the PDS to verify the IES classification. Loss determination methods for IE energy classes of CDM and IES classes of PDS are considered as type testing of CDM and PDS in this document. Furthermore, determination procedures for CDM and PDS losses in partial load conditions are defined.

If a CDM is specified by active power only, its output current shall be calculated according to (3). Its rated apparent output power shall be calculated according to Formula (4).

Losses and IE/IES classes shall be calculated and measured at rated input voltage according to IEC 60038:2009, Table 1. Furthermore, the rated equipment voltage and, in case of the PDS, rated motor speed shall be stated in the documentation.

7.2 Type testing of CDM for IE classification

To define the IE energy efficiency class of a CDM, type tests shall be performed. IE energy efficiency classes are defined based on a single operation point according to 6.1. The losses in this point shall be determined by one of the following options:

- single component loss determination as described in 7.5;
- input-output measurement according to 7.7 (the testing procedure is given in 7.7.3.4 and testing conditions are described in 7.9);
- calorimetric measurement method according to 7.8 (testing conditions are described in 7.9).

The manufacturer is free to choose any of the three options.

NOTE Testing laboratories will use determination methods based on measurements, i.e. calorimetric or input-output determination methods.

CDM output current and displacement factor are defined in Table 1 and Table 2.

If a CDM is dedicated to run a non-asynchronous motor, it shall be tested with an appropriate test load, and the deviations from the test conditions described in 7.9 shall be stated in the user's documentation and the test report.

The losses required for IE energy efficiency classification shall be calculated from the determined losses $P_{L,CDM,determined}$ and the measurement uncertainty according to the following formula:

$$P_{L,CDM} = P_{L,CDM,determined} + \Delta P_{L,CDM} = P_{L,CDM,determined} \cdot (1 + \Delta p_{L,CDM}) \quad (21)$$

This corrected power loss value shall be used to define relative power losses of CDM.

The uncertainty of the used method shall be added to the determined loss value, as described in Figure 18.

The manufacturer shall determine the uncertainty of the selected method for determining losses. The manufacturer is responsible to apply the correct uncertainty. The applied uncertainty shall be based on randomly occurring errors with normal distribution at 2 standard deviations (e.g. 95 % confidence level). Typical uncertainties for different determination methods and a calculation procedure for loss uncertainty are given in Annex F.

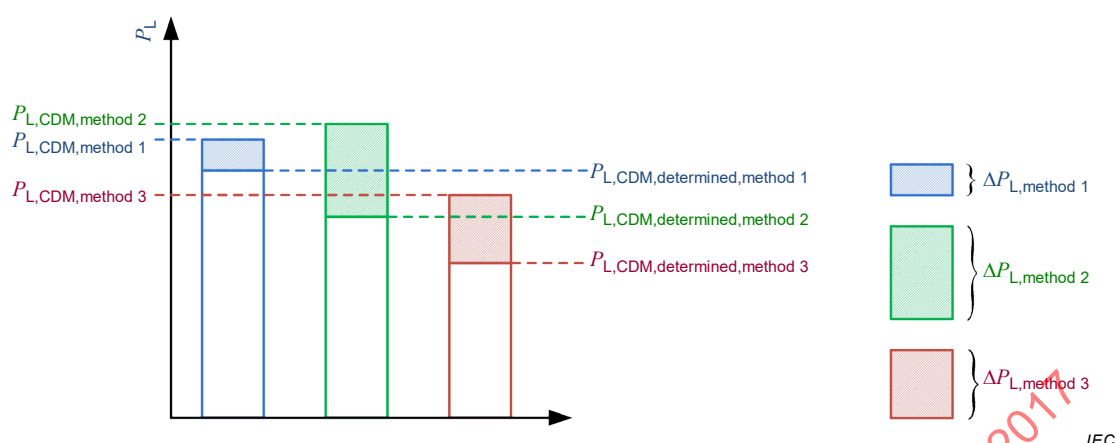


Figure 18 – Losses of CDM are provided as the sum of the determined losses plus the uncertainty of the determination method

7.3 Type testing of PDS for IES classification

The manufacturer shall perform type tests to define the IES energy efficiency class of a PDS. IES energy efficiency classes are defined based on a single operation point according to 6.1. Losses in this point shall be determined by one of the following options:

- loss calculation according to 7.6;
- input-output measurement according to 7.7 (the testing procedure is given in 7.7.3.5 and testing conditions are described in 7.10).

The manufacturer is free to choose any of the two options.

NOTE Testing laboratories will use the input-output determination method.

The calorimetric measurement method is excluded, as it is difficult to perform on electric motors.

The losses required for the IES energy efficiency classification shall be calculated from the determined losses $P_{L,PDS,determined}$ and the measurement uncertainty according to the following formula:

$$P_{L,PDS} = P_{L,PDS,determined} + \Delta P_{L,PDS} = P_{L,PDS,determined} \cdot (1 + \Delta p_{L,PDS}) \quad (22)$$

This corrected power loss value shall be used to define the relative power losses of a PDS.

The manufacturer shall determine the uncertainty of the selected method for determining losses. The manufacturer is responsible to apply the correct uncertainty. The applied uncertainty shall be based on randomly occurring errors with normal distribution. Typical uncertainties for different determination methods and a calculation procedure for loss uncertainty are given in Annex F.

7.4 Determination procedures for CDM and PDS losses in part load operation

The manufacturer shall state the power losses of the CDM or PDS according to the part load points as defined in 4.2.

For CDMs, losses shall be determined according to the same approach as for IE class determination in 7.2. The manufacturer shall state part load power losses of CDM with uncertainties as described in Formula (21).

For PDSs, losses shall be determined according to same approach as for IES class determination in 7.3. The manufacturer shall state part load power losses of PDS with uncertainties as described in Formula (22).

NOTE Testing laboratories will use determination methods based on measurements, i.e. calorimetric or input-output determination methods.

7.5 CDM loss calculation

The model presented in 5.2 may be used for the determination of losses of a CDM by calculation. The manufacturer is allowed to use a different calculation model or loss simulations. Manufacturers are responsible to apply correct accuracies in Formula (21).

CDM loss calculations have to be performed with respect to component manufacturer's data with typical values of power semiconductors at the actual CDM operating temperature or at the maximum operating temperature specified in the datasheet.

The parameters affecting losses of CDM components shall be determined in the required operating points. When no manufacturer's data on losses is available, losses shall be determined by measurement.

NOTE For some CDM components, loss measurements are easy to perform. Combination of measured and calculated losses is one possible way to determine losses of CDM.

Finally, the different individual losses are calculated or measured separately and the total losses of the CDM ($P_{L,CDM,determined}$) are determined as the sum of all individual losses.

7.6 PDS loss calculation

Losses of PDSs can be determined by calculation according to Formulas (18) and (19). When calculating PDS losses with a RCDM, no tolerances have to be added to CDM losses. If PDS losses are calculated with the RM, tolerances according to IEC 60034-1 shall be added to the losses of the final PDS.

7.7 Input-output measurement method

7.7.1 Input-output measurement of CDM losses

The input-output determination method of CDM losses is based on measurements of electric power at the input and the output of the CDM. The measurement setup is illustrated in Figure 19. The losses of the CDM shall be determined by using formula:

$$P_{L,CDM,determined} = P_{in,CDM} - P_{out,CDM} \quad (23)$$

Input power P_{in} is determined based on measured input voltages U_{in} and input currents I_{in} by a power analyser. Accordingly, output power P_{out} is determined based on output voltages U_{out} and currents I_{out} measured by a power analyser. The measurement of the CDM output shall be done directly at the output terminals of the CDM. The accuracy of this method is limited by the accuracy of the available measurement equipment.

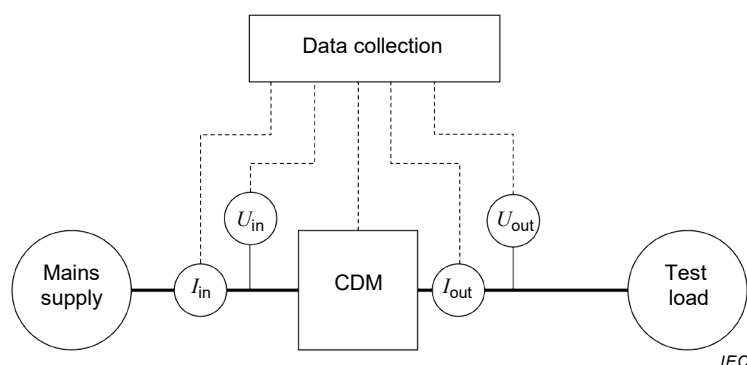


Figure 19 – Input-output measurement setup for determination of CDM losses

7.7.2 Input-output measurement of PDS losses

The input-output determination method of PDS losses is based on measurements of electric power at the input and mechanical power at the output of the PDS. The measurement setup is illustrated in Figure 20. The losses of the PDS shall be determined by using the formula:

$$P_{L,PDS,determined} = P_{in,PDS} - P_{out,PDS} \quad (24)$$

Input power $P_{in,PDS}$ is determined based on input voltages U_{in} and input currents I_{in} measured by a power analyser. Output power $P_{out,PDS}$ is determined based on measured torque and speed of the motor. The accuracy of this method is limited by the accuracy of the available measurement equipment.

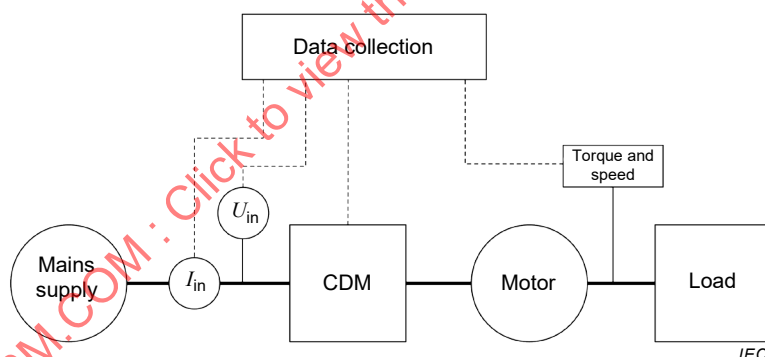


Figure 20 – Input-output measurement setup for PDS losses

7.7.3 Requirements of input-output measurement methods

7.7.3.1 General

When testing CDM or PDS under load, slow fluctuations in the output power and other measured quantities may be unavoidable. Therefore, for each load point, several measurements over a period of time (at least several slip cycles, typically 1 min to 3 min) shall be simultaneously sampled and the average of these values shall be used for the determination of losses.

Considering the harmonics involved in converters, the measuring equipment has to be selected according to the range of relevant frequencies with sufficient accuracy.

7.7.3.2 Power analyser and transducers

The instrumentation used for measuring power and current at the CDM's input or output shall meet the requirements of IEC 60034-2-1.

The uncertainty specified by the instrument manufacturer of the power meters shall be 0,2 % of S_{equ} or better for the total active power at 50 Hz/60 Hz. This is the total uncertainty of the power meter including possible sensors.

The bandwidth of power meters and sensors shall be sufficiently wide to ensure an error of the total active power of less or equal to 0,3 % of S_{equ} .

NOTE 1 The apparent output power of a CDM at switching frequency is typically not more than 5 % of the total rated output power. The output power at higher frequencies reduces according to a square function. Therefore, a bandwidth from 0 Hz up to 10 times of switching frequency f_{sw} is sufficient to measure PWM converter output power.

The measurement range shall be chosen adequately in relation to the measured currents and voltages.

It is preferred to feed current and voltage directly into the power analyser. If an external current transducer is required, inductive transducers, wide bandwidth shunts or zero-flux transducers can be used.

NOTE 2 Inductive transducers are not applicable when DC components are present.

NOTE 3 Inductive transducers have higher uncertainties and/or amplitude limitations at lower frequencies than at nominal frequency.

All cables used to transmit measurement signals shall be carefully installed and should be shielded, if possible.

7.7.3.3 Mechanical output of the motor

The instrumentation for measuring torque and speed at the motor's output shall meet the requirements of IEC 60034-2-1:2014.

7.7.3.4 CDM loss determination according to input-output method

The following measurement procedure determines losses at the 8 required load points of a CDM.

The procedure starts with an initial heat-run of the CDM, which is needed to achieve stable temperature at rated speed and load. The test procedure includes three further periods of operation at lower speeds and torques. The required order of the measurements is shown in Figure 21 (see the bracketed numbers).

At all test points, the relative CDM output voltage (in per cent) shall be no less than the relative CDM output frequency (in per cent).

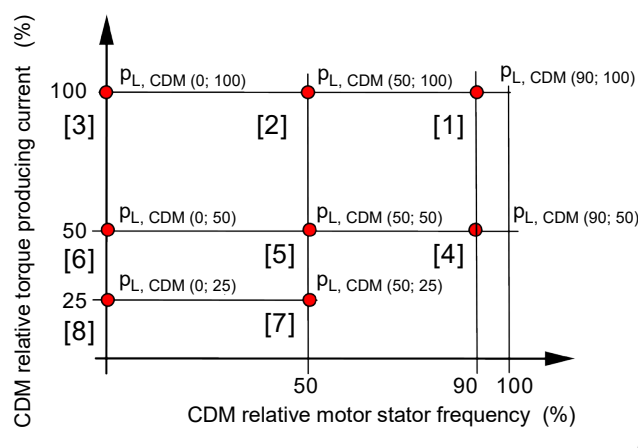


Figure 21 – Order of CDM measurements from [1] to [8]

First, the CDM is run at 90 % of frequency and 100 % of current [1] until thermal stability (measured, e.g. on the heat sink, in the output airflow, display parameters etc.) has been achieved. Stability has been achieved when the rate of temperature rise is less than 1 K per 30 min.

Once thermal stability has been achieved, voltage, current, power and power factor both at the input and output terminals of the CDM shall be measured and recorded.

All other operating points shall be measured in successive order immediately, but with averaged fluctuations, see 7.7.3.1, after the first operating point [1] has been completed. All data required at the first load point shall also be recorded at each load point.

The operating points at 50 % [2] and at 0 % [3] of rated frequency shall be measured with unchanged load settings.

Next, the torque producing current shall be reduced to 50 % of its rated value for the measurements at 90 % [4], 50 % [5] and 0 % [6] of rated frequency.

Finally, the torque producing current shall be reduced to 25 % of its rated value for the measurements at 50 % [7] and 0 % [8] of rated frequency.

In some cases, testing might be more convenient when testing all points at one frequency after each other. Consequently, it is allowed to change the order of the test points to [1] – [4] – [2] – [5] – [7] – [3] – [6] – [8].

In order to overcome limitations of commercially available measuring equipment at low frequencies, it is acceptable to measure CDM losses at a frequency of up to 12 Hz instead of zero. These losses shall be used without further extrapolation as the losses at the load points [3], [6] and [8]. These test points shall be provided in the documentation supplied by the manufacturer.

7.7.3.5 PDS loss determination according to input-output method

The following measurement procedure determines losses at the 8 required load points of a PDS.

The procedure starts with an initial heat-run of the PDS, which is needed to achieve stable temperature at rated speed and load. The test procedure includes three further periods of operation at lower speeds and torques. The required order of the measurements is shown in Figure 22 (see the bracketed numbers).

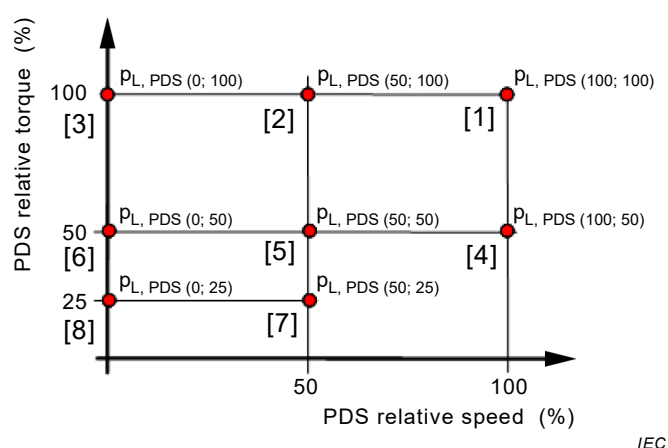


Figure 22 – Order of PDS measurements from [1] to [8]

First the PDS is run at full rated speed and torque [1] until the motor reaches a stable temperature-rise (defined as the external motor temperature measured directly at the motor's stator housing surface – not on top of cooling fins, not at the terminal box – minus the ambient air temperature). Stability has been achieved when the rate of temperature rise is less than 1 K per 30 min. Due to the shorter time constant, it can be assumed that the power electronic equipment associated with the motor has also achieved thermal stability at that time.

When thermal stability has been achieved, the supply voltage, input current, input power, input power factor, shaft torque and shaft speed shall be measured and recorded.

All other operating points shall be measured in successive order immediately, but with averaged fluctuations, see 7.7.3.1, after the first operating point [1]. All data required at the first load point shall be recorded at each load point.

The operating points at 50 % [2] and at 0 % [3] of rated speed shall be measured with unchanged torque settings.

The motor torque shall then be reduced to 50 % of its rated value, and measurements shall be taken at 100 % [4], 50 % [5] and 0 % [6] of rated speed.

Finally, motor torque shall be reduced to 25 % of its rated value for the measurement at 50 % [7] and 0 % [8] of rated speed.

In some cases, testing might be more convenient when testing all points at one frequency after each other. Consequently, it is allowed to change the order of the test points to [1] – [4] – [2] – [5] – [7] – [3] – [6] – [8].

As electric motors will exhibit an uneven current distribution and therefore uneven heating in their coils when the supply frequency is zero or very close to zero, PDS losses can also be given for a speed corresponding to up to 12 Hz stator frequency instead of zero speed. These losses shall be used without further extrapolation as the losses at the load points [3], [6] and [8].

7.8 Calorimetric measurement of CDM losses

In calorimetric measurements, CDM losses are measured by means of cooling medium flow and temperatures.

The measurement setup is presented in Figure 23. Testing conditions are described in 7.9. Detailed test methods and procedures are described in Annex G.

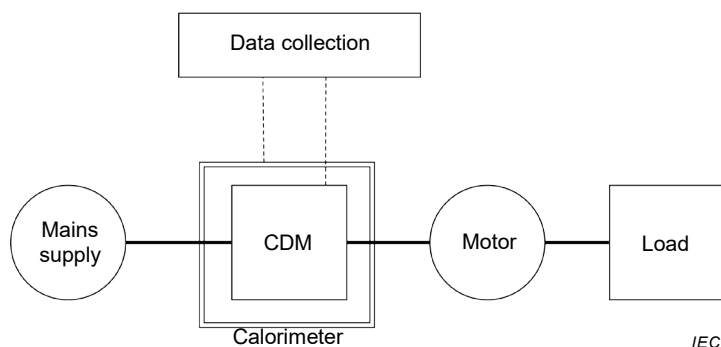


Figure 23 – Calorimetric measurement setup for determining CDM losses

7.9 Testing conditions for CDM testing

Testing conditions and procedures are of high importance for the results and for the reproducibility and comparability of measurements by different manufacturers and test laboratories. The following requirements are mandatory. All operating conditions shall be recorded and documented, see 8.4.

- Switching frequency and pulse pattern of the CDM shall be at the default factory setting as defined by the manufacturer.
- The operating points are according to Figure 21.
- At all test points, the relative CDM output voltage shall (in per cent) be no lower than the relative CDM output frequency (in per cent).
- Measurements shall be done according to the measurement procedure described in 7.7.3.4.
- CDM input voltage and frequency have to be set to the rated values.
- The crest factor of the supply voltage shall be between 1,35 and 1,44.
- The short circuit ratio of the CDM and the supply network shall be in the range of 50 to 200 for CDM with a rated apparent output power of up to and including 111 kVA and 5 to 50 for CDM with a rated output power above 111 kVA.
- CDM output current shall be no lower than the values given in Table 1 as lower inverter output current leads to reduced losses.
- It is allowed to use an electronic load instead of an actual electric motor.
- The displacement factor of the load's fundamental current in relation to the fundamental voltage shall be according to Table 2 with a tolerance of $\pm 0,08$. Sometimes it is not possible to use the displacement factor from the table in part load operating points. If it not, a displacement factor as close as possible without changing the size of the motor shall be used and included in the documentation.
- In case the rated CDM output current is between two values given in Table 18, the next larger motor shall be used.
- The test load for the CDM loss measurement has to be chosen in a way that the THD of the CDM fundamental output current is lower or equal to 5 %. Higher distortion will lead to increased CDM losses.
- Unless otherwise specified, CDMs having a rated apparent output power below 8 kVA shall be measured with a minimum of 15 m shielded cable. If the CDM manufacturer specifies less than 15 m maximum cable length, the highest admissible cable length shall be used.

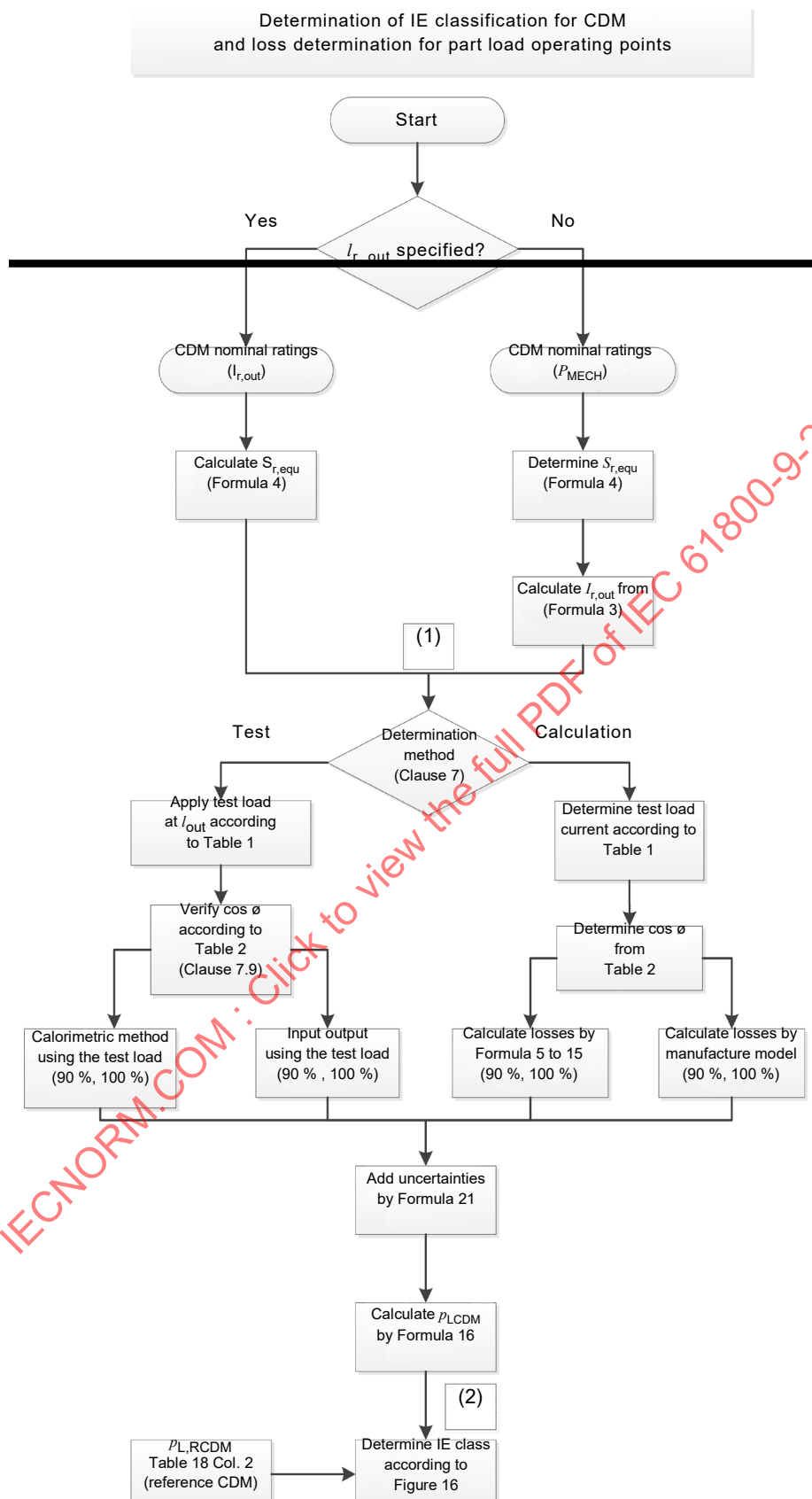
- The CDM should be equipped and installed to fulfil the requirement of IEC 61800-5-1 with respect to electrical safety.
- Losses have to be determined in continuous operation.
- The tests can be done at any temperature.
- Measurements shall be made with the cooling system at full performance. In case the cooling is temperature controlled (on/off or PWM control), an average measurement over a time period of 10 min may be performed at each load point.

7.10 Testing conditions for PDS testing

- The operating point shall be defined according to Figure 22.
- The measurement shall be done according to the measurement procedure described in 7.7.3.5.
- CDM input voltage and frequency have to be the rated values of the CDM.
- The crest factor of the supply voltage shall be between 1,35 and 1,44.
- The short circuit ratio of the CDM and the supply network shall be in the range of 50 to 200 for CDM with a rated output power of up to and including 90 kW and 5 to 50 for CDM with a rated output power above 90 kW.
- Unless otherwise specified, PDSs having rated power below 7,5 kW shall be measured with a minimum of 15 m shielded cable. If the PDS or CDM manufacturer specifies less than 15 m maximum cable length, the highest admissible cable length shall be used. There is no requirement for cable lengths for integrated PDS.
- The tests shall either be performed for a motor ambient temperature between +15 °C and +30 °C, or otherwise an appropriate temperature correction shall be applied for motor losses.
- Measurements shall be made with the cooling system at full performance. In case cooling is temperature controlled (on/off or PWM control), an average measurement over a time period of 10 min may be performed at each load point.

7.11 Flowcharts for test procedures

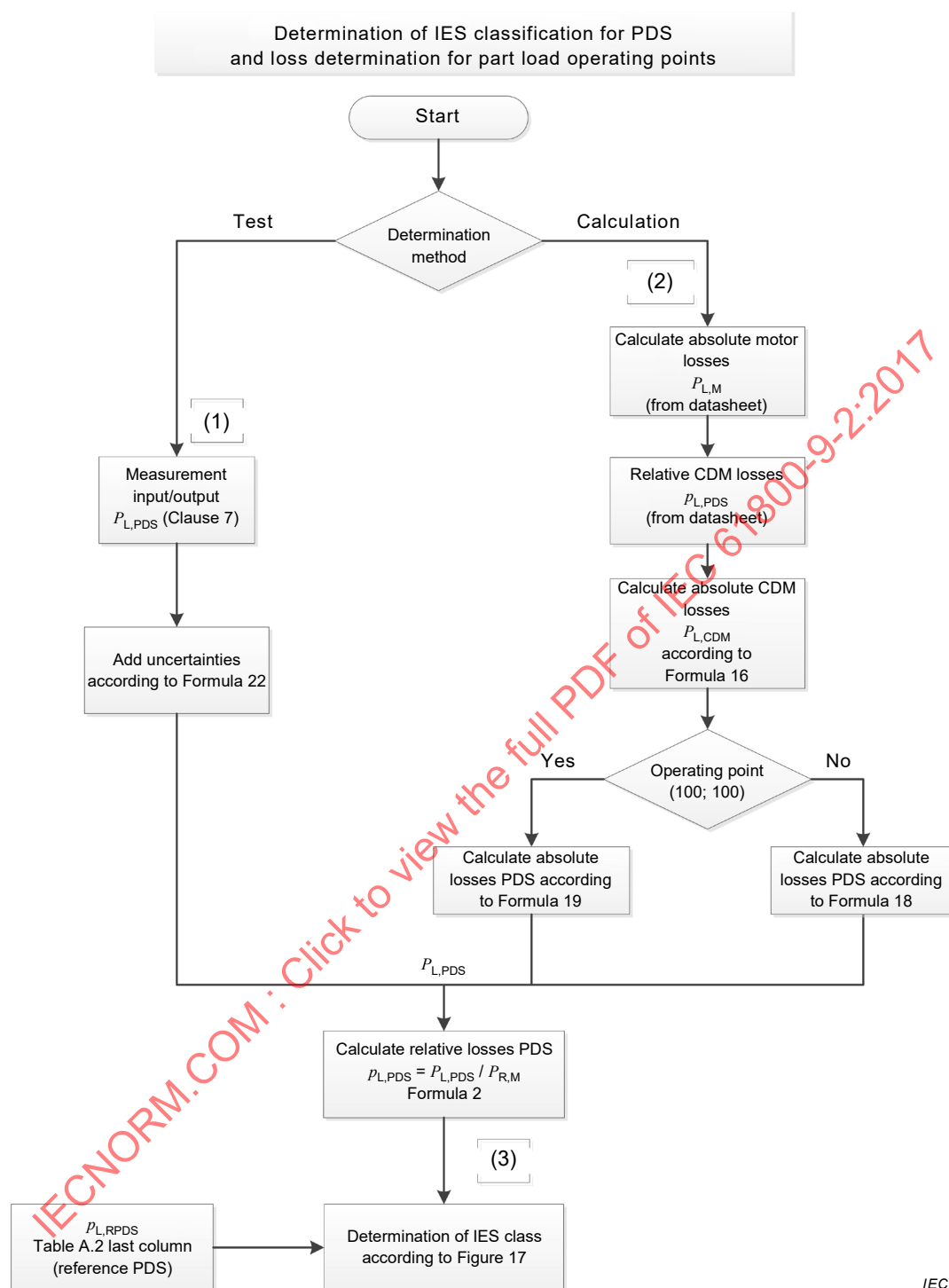
See Figure 24 and Figure 25.



IEC

NOTE Partload operating point: For determination of partload operation the flowchart from point 1 to 2 is repeated for each part load operating point adjusting the I_{OUT} and $\cos \Phi$ according to Tables 1 and 2 at each of the 8 partload operating points (relative torque 25 %, 50 %, 90 % and relative speed 0 %, 50 %, 90 % according to Figure 21).

Figure 24 – Determination of IE classification for CDM and loss determination for part load operating points



- a) Actual motor might be replaced by Reference motor data Table A.2
- b) Actual CDM might be replaced by reference CDM data Table A.1
- c) For determination of part load operation the test sequence flowchart point (1) – (3) is repeated for each part load operating point adjusting the torque and speed according to Figure 4
- d) For determination of part load operation the calculation sequence flowchart point (2) – (3) is repeated for each part load operating point adjusting the torque and speed according to Figure 5 and Figures 6 for motor and CDM

**Figure 25 – Determination of IES classification for PDS and
loss determination for part load operating points**

8 Requirements for the user's documentation

8.1 General

The purpose of Clause 8 is to define the information necessary for determination of energy losses of CDM and PDS. The required information is given in Table 20, showing where the information shall be provided, followed by explanatory subclauses.

All energy efficiency related equipment labels shall be provided in the documentation.

The requirements of Clause 8 shall apply to all CDM and the PDS, unless otherwise stated.

The information provided shall ensure an energy efficiency classification of the CDM and PDS and it shall also provide sufficient information to ensure an energy efficiency classification of the final application and/or system where the CDM or PDS is used as a component.

The manufacturer shall define whether the rated test load stator frequency is 50 Hz or 60 Hz and give this information in the documentation.

Table 20 – Information requirements

Information	Subclause reference	Location ^{a, b}			Technical subclause reference
		1	2	3	
For selection	8.2				
For determination of energy efficiency classification	8.3				
General	8.3			X	4.6, 4.7, 6.1, 6.2, 6.4, 7
Supply voltage	8.3			X	4.6, 4.7, 6.1, 6.2, 6.4, 7
Supply frequency	8.3			X	4.6, 4.7, 6.1, 6.2, 6.4, 7
Rated test load stator frequency in case of CDM and rated motor speed (mechanical revolutions per minute) in case of PDS	8.3			X	4.6, 4.7, 6.1, 6.2, 6.4, 7
IE rating of CDM and IES rating of PDS	8.3			X	4.6, 4.7, 6.1, 6.2, 6.4, 7
CDM maximum fundamental output voltage	8.3			X	5.3, Annex D
For determination of additional energy losses and part load conditions	8.4			X	
General	8.4.1			X	Annex B, 4.2, 7
Part load losses	8.4.2			X	4.2, 7
Losses of auxiliaries and options	8.4.3			X	
Stand-by mode losses	8.4.4			X	5.2.7
Losses in regenerative mode	8.4.5			X	B.4.3, 5.5
^a Location: 1. On product (see 8.1); 2. On packaging; 3. In product documentation.					
^b The product documentation requested by clause 8.4 may be supplied in electronic format. When multiple identical products are supplied to a single customer, a manual need not be supplied with each unit, if acceptable to the customer.					

8.2 Information for selection

Each part of a CDM or PDS that is supplied as a separate product shall be provided with information relating to its function and electrical characteristics as requested by the applicable product standards.

NOTE Typical examples of product standards are

- IEC 61800-2 for adjustable speed electric drive systems
- IEC 60947-4-1 for contactors and motor-starters – Electromechanical contactors and motor-starters
- IEC 60947-4-2 for contactors and motor-starters – AC semiconductor motor controllers and starters

8.3 Information for determination of energy efficiency classification

The manufacturer shall provide information on the energy efficiency classification (IE/IES) of the CDM and PDS as determined in 4.6, 4.7, 6.2 and 6.4 and verified according to Clause 7.

A PDS IES rating shall be given in case where motor and CDM are physically combined to a single unit or when they are intended to be used in this combination only. In this case, individual IE ratings of the CDM and the motor are not required.

For a general purpose CDM, which is not intended to be sold and operated together with a specific motor, only the CDM IE rating is required. However, an IES rating for a combination of a CDM and a motor may be specified.

The following additional information shall be provided together with the IE/IES classification:

- RMS value of phase-to-phase supply voltage U_{mL1} ;
- supply voltage frequency (e.g. 50 Hz, 60 Hz);
- rated test load stator frequency in case of CDM or rated motor speed (mechanical revolutions per minute) in case of PDS;
- CDM maximum RMS phase to phase fundamental output voltage.

8.4 Information on the determination of additional energy losses and part load conditions

8.4.1 General

For the calculation of the energy efficiency classes in final applications or system (see 4.9 and Figure 7), where the CDM and/or PDS are used as components as described in Annex B, the losses of the CDM or PDS are required. This also includes part load operation as well as applicable options needed for operation of this application.

8.4.2 Losses in part load conditions

The manufacturer shall state the losses of the CDM according to the part load measurement points as defined in 4.2 and verified according to Clause 7. In this document, the information on losses is only mandatory for CDMs converting AC input power to AC output power.

The manufacturer shall state the losses of the PDS according to the part load operation points as defined in 4.2 and verified according to Clause 7.

The number of part load operation points can be reduced when the final application only requires a limited number of load points according to the extended product approach. If the manufacturer of the CDM/PDS only provides limited part load operation points to support specific applications, this shall be stated in the manual.

8.4.3 Losses of auxiliaries and options

Losses of optional EMI filters, line chokes, transformers, external fans, output chokes, output filters or other power consuming options, which are intended to be used together with the PDS or CDM for the operation in the final application, that exceed

- 0,1 % of the rated CDM power, and
- 5 W in total.

The losses shall be stated in the documentation at the operating point of rated power with a tolerance of ± 25 %, unless they are included in the CDM or PDS losses.

The same applies to motion controllers or application options, which are specifically intended for use together with the drive.

8.4.4 Losses in stand-by mode

The manufacturer shall state the power losses in stand-by mode of the CDM and PDS with a tolerance of ± 25 %.

8.4.5 Losses in regenerative mode

It shall be stated in the user's documentation whether a CDM or PDS is able to regenerate energy from the load to the mains or not.

The manufacturer shall provide sufficient information in order for the system integrator to determine the losses of the CDM or PDS in regenerative mode based on the regenerative topology supported by the CDM or PDS.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61800-9-2:2017

Annex A (normative)

Losses of RCDM, RM and RPDS

A.1 Relative loss tables

Tables A.1, A.2 and A.3 provide relative loss percentages for reference CDMs, motors and PDSs, respectively.

Table A.1 – Relative losses (%) of reference CDMs at different power ratings at the operating points described in Figure 6

P_{RM} kW informative	$S_{r,eq}$ kVA	$P_{L,RCDM}$, relative (0;25)	$P_{L,RCDM}$, relative (0;50)	$P_{L,RCDM}$, relative (0;100)	$P_{L,RCDM}$, relative (50;25)	$P_{L,RCDM}$, relative (50;50)	$P_{L,RCDM}$, relative (50;100)	$P_{L,RCDM}$, relative (90;50)	$P_{L,RCDM}$, relative (90;100)
0,12	0,278	33,79	33,84	34,30	33,89	34,04	34,84	34,39	35,85
0,18	0,381	25,24	25,28	25,75	25,34	25,48	26,28	25,83	27,30
0,25	0,5	19,74	19,78	20,25	19,84	19,99	20,78	20,34	21,80
0,37	0,697	14,77	14,82	15,29	14,87	15,02	15,82	15,37	16,84
0,55	0,977	11,14	11,19	11,66	11,24	11,39	12,19	11,74	13,21
0,75	1,29	8,96	9,00	9,47	9,06	9,20	10,00	9,55	11,02
1,1	1,71	6,86	7,13	7,82	6,93	7,33	8,40	7,68	9,51
1,5	2,29	5,56	5,83	6,52	5,63	6,03	7,10	6,38	8,21
2,2	3,3	4,54	4,82	5,51	4,61	5,02	6,09	5,37	7,20
3	4,44	4,07	4,35	5,04	4,14	4,55	5,62	4,90	6,72
4	5,85	3,74	4,02	4,71	3,82	4,22	5,29	4,57	6,39
5,5	7,94	3,35	3,63	4,32	3,42	3,83	4,90	4,18	6,01
7,5	9,95	2,80	3,09	4,02	2,86	3,28	4,64	3,61	5,84
11	14,4	2,39	2,68	3,61	2,46	2,87	4,23	3,20	5,43
15	19,5	2,15	2,44	3,37	2,22	2,63	3,99	2,96	5,18
18,5	23,9	2,02	2,32	3,24	2,09	2,51	3,86	2,83	5,05
22	28,3	1,94	2,23	3,16	2,01	2,43	3,78	2,75	4,97
30	38,2	1,83	2,12	3,05	1,90	2,31	3,67	2,64	4,87
37	47	1,76	2,05	2,98	1,83	2,24	3,60	2,57	4,79
45	56,9	1,71	2,01	2,93	1,78	2,20	3,55	2,52	4,75
55	68,4	1,62	1,93	2,90	1,70	2,13	3,53	2,47	4,74
75	92,8	1,58	1,88	2,85	1,65	2,08	3,48	2,42	4,69
90	111	1,55	1,86	2,82	1,62	2,05	3,45	2,39	4,66
110	135	1,24	1,48	2,27	1,32	1,68	2,91	2,02	4,11
132	162	1,23	1,47	2,26	1,30	1,67	2,89	2,01	4,10
160	196	1,22	1,46	2,25	1,29	1,66	2,88	2,00	4,09
200	245	1,21	1,45	2,24	1,28	1,65	2,87	1,98	4,07
250	302	1,17	1,42	2,24	1,24	1,61	2,88	1,95	4,10
315	381	1,16	1,41	2,23	1,23	1,61	2,87	1,94	4,09

P_{rM} kW informative	$S_{r,eq}$ kVA	$P_{L,RCDM}$ relative (0;25)	$P_{L,RCDM}$ relative (0;50)	$P_{L,RCDM}$ relative (0;100)	$P_{L,RCDM}$ relative (50;25)	$P_{L,RCDM}$ relative (50;50)	$P_{L,RCDM}$ relative (50;100)	$P_{L,RCDM}$ relative (90;50)	$P_{L,RCDM}$ relative (90;100)
355	429	1,16	1,41	2,23	1,23	1,60	2,87	1,94	4,09
400	483	1,16	1,41	2,23	1,23	1,60	2,87	1,94	4,09
500	604	1,15	1,40	2,22	1,22	1,60	2,86	1,94	4,08
560	677	1,15	1,40	2,22	1,22	1,60	2,86	1,93	4,08
630	761	1,15	1,40	2,22	1,22	1,60	2,86	1,93	4,08
710	858	1,15	1,40	2,22	1,22	1,59	2,86	1,93	4,08
800	967	1,15	1,40	2,22	1,22	1,59	2,86	1,93	4,08
900	1 088	1,15	1,39	2,21	1,21	1,59	2,85	1,93	4,08
1 000	1 209	1,14	1,39	2,21	1,21	1,59	2,85	1,93	4,08

NOTE Table A.1 is applicable for the evaluation of 50Hz and 60Hz CDMs.

Table A.2 – Relative losses (%) of reference motors at different power ratings at the operating points described in Figure 5

P_N kW	$P_{L,RM}$ (0;25)	$P_{L,RM}$ (0;50)	$P_{L,RM}$ (0;100)	$P_{L,RM}$ (50;25)	$P_{L,RM}$ (50;50)	$P_{L,RM}$ (50;100)	$P_{L,RM}$ (100;50)	$P_{L,RM}$ (100;100)
0,12	28,9	32,8	59,9	36,6	40,5	66,8	51,5	79,6
0,18	23,8	27,1	47,3	30,6	33,8	53,4	44,4	62,7
0,25	19,5	22,4	38,0	25,3	28,1	43,2	37,5	52,9
0,37	15,0	17,6	30,7	19,5	22,1	34,4	28,9	43,2
0,55	11,7	14,4	27,7	15,0	17,7	30,1	21,8	34,2
0,75	9,3	11,7	22,8	12,1	14,5	24,7	19,2	29,5
1,1	7,4	9,7	20,5	10,0	12,3	22,2	16,2	26,3
1,5	6,0	8,2	17,9	8,3	10,8	19,7	14,0	23,9
2,2	5,2	7,2	15,5	7,4	9,4	17,9	12,7	21,4
3	4,5	6,3	13,8	6,5	8,3	16,2	11,4	19,5
4	3,8	5,4	12,2	5,6	7,3	14,4	10,2	17,8
5,5	3,0	4,4	10,5	4,7	6,1	12,6	8,8	16,1
7,5	2,5	3,7	9,3	4,0	5,3	11,2	7,8	14,7
11	2,2	3,4	8,7	3,6	4,9	10,4	7,2	13,1
15	1,8	3,0	7,5	3,1	4,3	9,2	6,4	11,9
18,5	1,7	2,8	7,1	2,9	4,0	8,7	5,9	11,1
22	1,6	2,6	6,8	2,8	3,8	8,3	5,7	10,5
30	1,5	2,3	6,2	2,5	3,4	7,5	5,2	9,6
37	1,3	2,1	5,6	2,4	3,2	6,9	4,9	9,1
45	1,2	1,9	5,0	2,2	2,9	6,3	4,7	8,5
55	1,1	1,7	4,3	2,1	2,7	5,6	4,6	8,0
75	1,0	1,3	3,5	2,0	2,4	4,8	4,4	7,3
90	1,0	1,3	3,5	1,9	2,2	4,6	4,1	7,1
110	1,0	1,4	3,2	2,2	2,7	4,7	4,7	7,3
132	1,0	1,4	3,2	1,9	2,5	4,6	3,9	7,0

P_N kW	$P_{L, RM, (0;25)}$	$P_{L, RM, (0;50)}$	$P_{L, RM, (0;100)}$	$P_{L, RM, (50;25)}$	$P_{L, RM, (50;50)}$	$P_{L, RM, (50;100)}$	$P_{L, RM, (100;50)}$	$P_{L, RM, (100;100)}$
160	1,0	1,4	3,1	1,8	2,4	4,6	3,9	6,7
200	1,0	1,4	3,1	1,8	2,3	4,5	3,8	6,4
250	1,0	1,4	3,0	1,8	2,3	4,4	3,8	6,4
315	0,9	1,3	3,0	1,8	2,3	4,3	3,8	6,4
355	0,9	1,3	2,9	1,8	2,3	4,3	3,8	6,4
400	0,9	1,3	2,9	1,8	2,3	4,2	3,8	6,4
500	0,9	1,3	2,8	1,8	2,3	4,2	3,8	6,4
560	0,9	1,3	2,7	1,8	2,3	4,1	3,8	6,4
630	0,9	1,3	2,6	1,8	2,3	4,1	3,8	6,4
710	0,9	1,3	2,6	1,8	2,3	4,1	3,8	6,4
800	0,9	1,3	2,5	1,8	2,3	4,0	3,8	6,4
900	0,9	1,3	2,4	1,8	2,3	3,9	3,8	6,4
1 000	0,9	1,3	2,4	1,8	2,3	3,8	3,8	6,4

NOTE 1 The factor of the additional losses in the motor due to converter-fed operation changes according 5.3.2 from 15 % to 25 % between the output powers of 90 kW and 110 kW. This causes a discontinuity in the values.

NOTE 2 Table A.2 is applicable for the evaluation of 50Hz and 60Hz motors

NOTE 3 The absolute losses are calculated by the relative losses x rated power.

Table A.3 – Relative losses (%) for a reference PDS at different power ratings at the operating points described in Figure 4

$P_{r,M}$ kW	$P_{L,PDS, \text{relative (0;25)}}$	$P_{L, PDS, \text{relative (0;50)}}$	$P_{L,RPDS, \text{relative (0;100)}}$	$P_{L,PDS, \text{relative (50;25)}}$	$P_{L,PDS, \text{relative (50;50)}}$	$P_{L,PDS, \text{relative (50;100)}}$	$P_{L,PDS, \text{relative (100;50)}}$	$P_{L,PDS, \text{relative (100;100)}}$
0,12	107,18	111,20	139,36	115,11	119,36	147,51	131,17	171,41
0,18	77,22	80,61	101,80	84,24	87,73	109,03	99,07	127,38
0,25	58,98	61,96	78,50	64,98	68,08	84,76	78,18	102,32
0,37	42,82	45,52	59,50	47,51	50,39	64,20	57,85	79,67
0,55	31,49	34,28	48,41	34,97	37,93	51,75	42,65	61,43
0,75	24,71	27,18	39,09	27,68	30,32	41,90	35,63	51,70
1,1	18,06	20,78	32,66	20,77	23,69	35,26	28,14	43,98
1,5	14,49	17,10	27,85	16,90	20,01	30,54	23,74	39,06
2,2	12,01	14,43	23,77	14,32	16,93	27,04	20,76	34,55
3	10,52	12,74	21,26	12,63	15,03	24,52	18,65	31,59
4	9,27	11,28	19,09	11,19	13,47	22,14	16,88	29,10
5,5	7,84	9,64	16,74	9,64	11,63	19,67	14,83	26,55
7,5	6,21	7,80	14,63	7,79	9,65	17,36	12,59	24,06
11	5,33	6,91	13,43	6,82	8,66	15,94	11,39	21,65
15	4,60	6,17	11,88	5,99	7,72	14,39	10,25	19,94
18,5	4,31	5,80	11,29	5,60	7,24	13,69	9,56	18,85
22	4,10	5,47	10,86	5,39	6,93	13,16	9,24	18,05
30	3,83	5,00	10,08	4,92	6,34	12,17	8,56	16,86

$P_{r,M}$ kW	$P_{L,PDS}$, relative (0;25)	$P_{L,PDS}$, relative (0;50)	$P_{L,RPDS}$, relative (0;100)	$P_{L,PDS}$, relative (50;25)	$P_{L,PDS}$, relative (50;50)	$P_{L,PDS}$, relative (50;100)	$P_{L,PDS}$, relative (100;50)	$P_{L,PDS}$, relative (100;100)
37	3,54	4,70	9,39	4,72	6,05	11,47	8,16	16,19
45	3,36	4,44	8,70	4,45	5,68	10,79	7,89	15,44
55	3,11	4,10	7,91	4,21	5,35	9,99	7,67	14,77
75	2,95	3,63	7,03	4,04	4,97	9,11	7,39	13,91
90	2,91	3,59	6,98	3,90	4,73	8,86	7,05	13,63
110	2,52	3,22	5,99	3,82	4,76	8,27	7,18	13,15
132	2,51	3,20	5,97	3,50	4,55	8,15	6,37	12,80
160	2,49	3,19	5,86	3,38	4,43	8,13	6,35	12,45
200	2,48	3,18	5,84	3,37	4,32	8,02	6,23	12,09
250	2,41	3,12	5,71	3,30	4,24	7,88	6,16	12,06
315	2,30	3,01	5,70	3,29	4,25	7,77	6,15	12,05
355	2,30	3,00	5,59	3,29	4,23	7,77	6,14	12,05
400	2,30	3,00	5,59	3,29	4,23	7,67	6,14	12,04
500	2,29	2,99	5,48	3,27	4,23	7,65	6,14	12,03
560	2,29	2,99	5,38	3,27	4,23	7,56	6,13	12,04
630	2,29	2,99	5,28	3,27	4,23	7,55	6,13	12,03
710	2,29	2,99	5,28	3,27	4,22	7,56	6,13	12,03
800	2,29	2,99	5,18	3,27	4,22	7,46	6,13	12,04
900	2,29	2,98	5,07	3,26	4,22	7,35	6,13	12,04
1 000	2,28	2,98	5,07	3,26	4,22	7,25	6,13	12,04

NOTE 1 The loss calculation of RPDS at 100 % speed is the sum of RCDM and RM. The (90,100) point of the CDM has been used in the calculation of the PDS point (100,100).

NOTE 2 Table A.3 is applicable for the evaluation of 50Hz and 60Hz PDSs.

Example for 400 kW reference PDS using Formula (19):

$$P_{L,PDS(100;100)} = \frac{4,09 \cdot 483 + 1,11 \cdot 6,4 \cdot 400}{400} = 12,04 \quad (\text{A.1})$$

Example for 400 kW reference PDS using Formula (18):

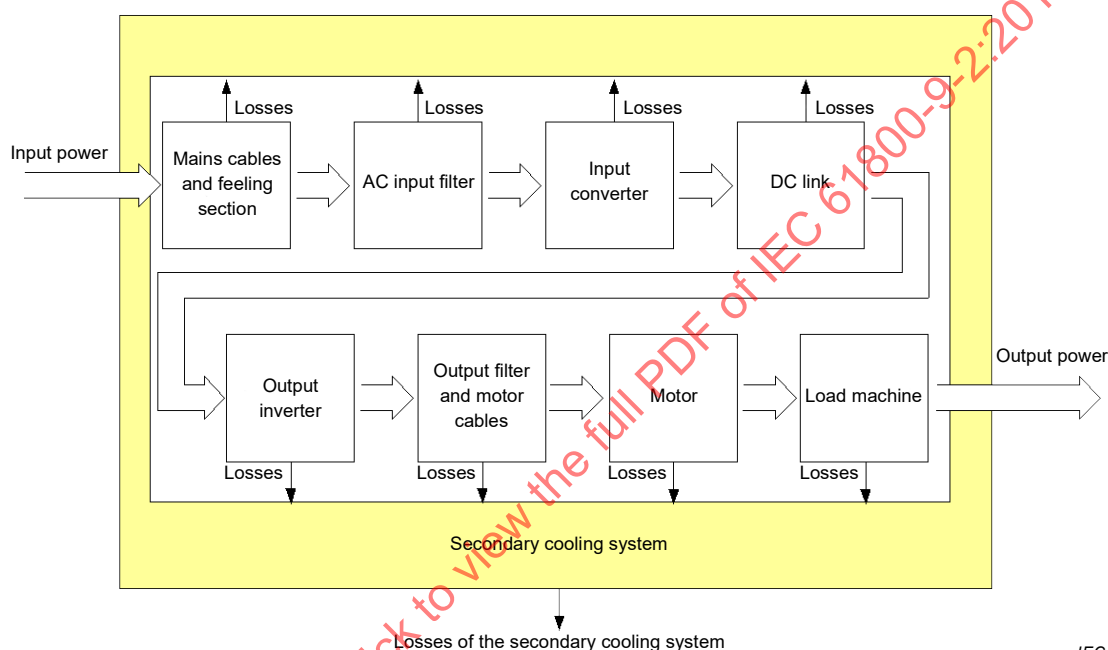
$$P_{L,PDS(50;50)} = \frac{1,60 \cdot 483 + 2,3 \cdot 400}{400} = 4,23 \quad (\text{A.2})$$

Annex B (informative)

Description of the elements of an extended product using PDS with regard to their impact on losses

B.1 General

A PDS is used to supply power from the mains to the motor in applications that require varying the speed of a motor. The PDS can control the speed and/or the torque as required by the application and its control.



IEC

Figure B.1 – Overview of the extended product and energy flow

In Figure B.1, the complete system transferring energy from the mains to the load is illustrated. Mains cabling and the load machine are not a part of the PDS, though their losses might be important to evaluate an energy efficient extended product, see Annex A. In order to determine the overall energy efficiency, the complete system has to be evaluated. In particular, optimizing the energy efficiency of single subsystems is not a favourable solution, as these local optimizations might reduce the overall energy efficiency. In Annex B, the major dependencies are described.

B.2 Losses in the mains cabling and feeding section

The basic equivalent circuit for a three phase mains supply at the point of common coupling is shown in Figure B.2:

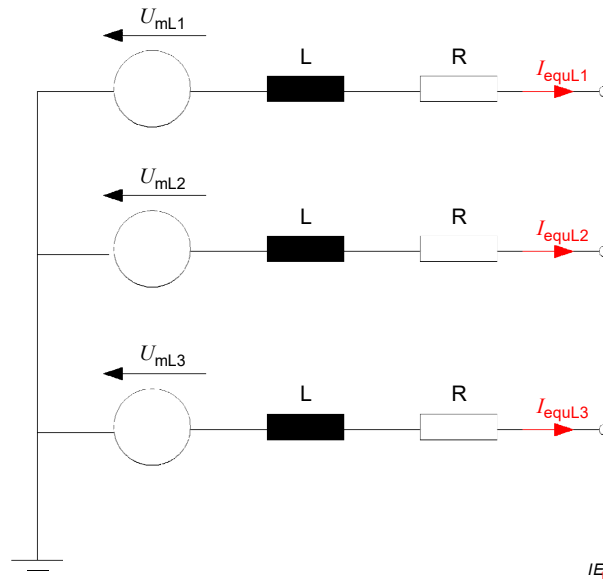


Figure B.2 – Equivalent circuit of the mains and mains cabling

In Figure B.2, a three phase power supply system with star point grounding is illustrated. As far as energy losses are concerned, the behaviour of other types of mains configurations such as delta grounding or single phase supply is identical. In a first approximation, the mains can be regarded as an ideal 50Hz or 60Hz power source. This power source has a series impedance, which is dominated by an inductive and an ohmic component. The ohmic component consists of the resistive part of mains cables, switches and fuses.

Energy losses are created in the ohmic part of the equivalent circuit. These losses increase with the square of the amount of current flowing in the mains. Assuming that all currents are identical in amplitude and shifted by 120°, the mains losses are:

$$P_{L,mains} = 3 \cdot R \cdot I_{L1}^2 \quad (B.1)$$

Assuming a PDS connected to the mains in Figure B.2, the mains losses depend on the input current of the PDS. As a minimum, the PDS has to consume the active power required by the load and the losses generated by the PDS itself. However, the PDS might require additional apparent power due to reactive power and harmonic currents. The ratio between active power and apparent power (power factor) is defined:

$$\lambda = \frac{P_{equ}}{S_{equ}} = \frac{3 \cdot U_{mL1} \cdot I_{1,equ} \cdot \cos \varphi_{equ}}{3 \cdot U_{mL1} \cdot I_{equ}} = \frac{I_{1,equ} \cdot \cos \varphi_{equ}}{I_{equ}} \quad (B.2)$$

A PDS with λ close to 1 will lead to minimum losses in the mains. The value of λ is determined mainly by the input filter and the input converter of the PDS.

B.3 Input filter

B.3.1 High frequency EMI filter

High frequency EMI filters are used to limit high frequency emissions of the PDS according to IEC 61800-3 in order not to disturb radio services. Maximum permitted emissions of a PDS depend on the environment in which the PDS is used.

In general the design of high frequency EMI-filters is influenced by applicable compliance parameters. Consideration is typically given to compliance with

- low leakage current according to IEC 61800-5-1, (e.g. compliance with residual current devices or compliance with the 3,5/10mA limit with respect to the requirement for the dimension of the protective earth connection.),
- support of shielded motor cable length, and
- requirement in different environment according to IEC 61800-3.

This will require different designs of the EMI filter including the EMI coil and therefore have a significant influence on the losses in the EMI coil.

The losses in RFI-filter may have a perceivable impact on the losses of a PDS, especially at low rated power.

B.3.2 Low frequency line harmonics filter

Low frequency line harmonics filters are used in some cases to reduce the voltage distortion of the mains voltage and therefore to ensure compatibility to other loads connected to the mains. See Figure B.3.

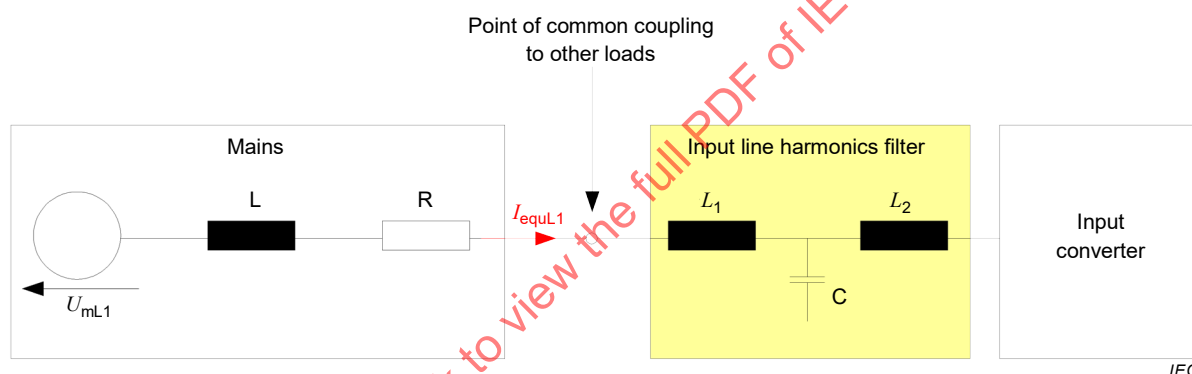


Figure B.3 – Illustration of a single phase line harmonics filter

An input line harmonic filter usually contains at least one series choke L_2 . More sophisticated filter topologies contain additional components such as a parallel capacitor or an additional line side choke L_1 .

As described in Clause B.2, reducing harmonics leads to lower losses in the mains. On the other hand, inductive components in the filter increase the reactive power of the PDS, increasing mains losses. Additional losses are created in the filter components themselves. These positive and negative effects increase with larger filters.

B.4 Input converter

B.4.1 General

The input converter transfers energy from the three phase AC mains to the DC link. For the input converter, mainly two topologies can be found in PDS today: the diode rectifier and the active infeed converter.

B.4.2 Diode rectifier

Diode rectifiers are the most cost effective solution for input converters. At positive energy flow from the mains to the load, this topology has low losses, as the forward voltage drop of the diodes is relatively low and their switching frequency is the fundamental frequency of the power supply system only. See Figure B.4.

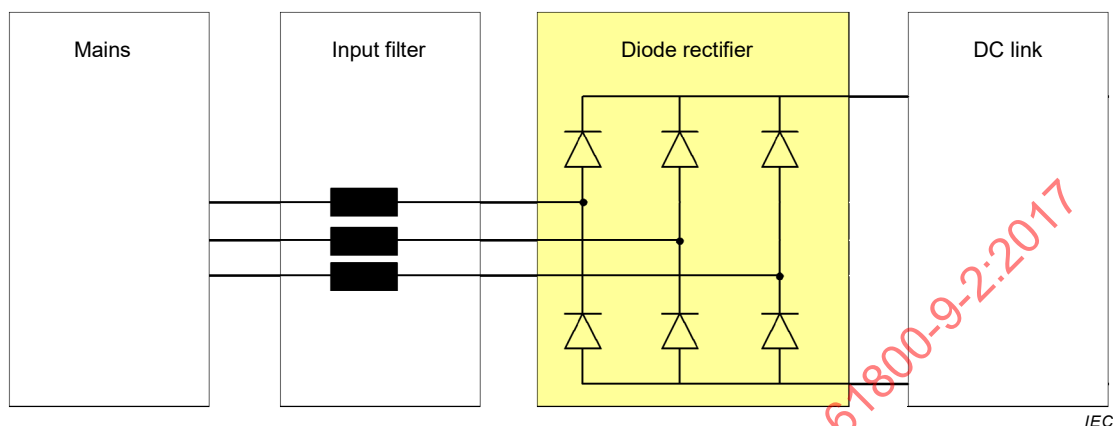


Figure B.4 – PDS with a diode rectifier input converter

On the other hand, diode rectifiers create relatively large harmonics in the mains current. These harmonic currents create losses in the mains. As described in B.3.2, these harmonic currents can be reduced by line chokes, DC link coils or line harmonic filters, which themselves create losses.

At negative energy flow, diode rectifiers are not able to regenerate energy from the load to the mains. The energy generated in the load, for example during braking, has to be dissipated in resistors. For applications with a significant regeneration, this reduces the overall energy efficiency performance of the system significantly, see 5.5. If the DC links of several CDMs are connected together, the regenerative energy can be distributed via a common DC-link to supply other CDMs/PDSs.

As a special variant of diode rectifiers, some or all diodes can be replaced by thyristors. As these thyristors are mainly used for the precharge of the DC link capacitor, the behaviour of this type of converter is nearly identical to the diode rectifier during normal operating conditions. As the forward voltage drop of thyristors is slightly higher than the forward voltage drop of diodes, losses are slightly increased.

B.4.3 Active infeed converter

B.4.3.1 Active infeed converter with high switching frequency

The behaviour of active infeed converters (AIC) is described in detail in IEC TS 62578. In contrast to the diode rectifier, this type of inverter is able to regenerate energy from the load to the mains. In regenerative applications, this feature can lead to a significant improvement of energy efficiency. Besides regeneration, this technology offers further advantages like the possibility of mains harmonics compensation, reactive power compensation and stabilized DC link voltage. See Figure B.5.

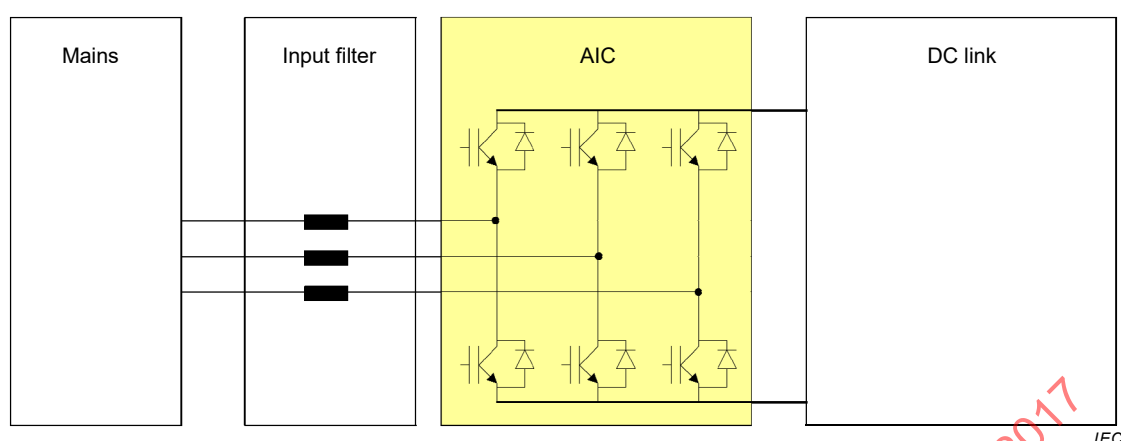


Figure B.5 – PDS with a standard AIC input converter

Standard active infeed converters operate with an IGBT bridge at their line infeed. The semiconductor switches operate at high switching frequency, enabling the converter to consume nearly sinusoidal current from the mains, with a controllable phase angle between line voltage and line current. Reactive power and harmonic currents are reduced to a minimum, minimising losses in the mains as a consequence.

However, the semiconductors create additional switching losses due to their high switching frequency, and the topology also requires the use of a choke or higher order filter, which also create losses. Furthermore, the DC link voltage in AIC converters with high switching frequency is higher than the DC link voltage in passive infeed converters, leading to increased DC link and standby losses.

Single phase power factor correction (PFC) circuits show a very similar behaviour to standard active infeed converters. They are as well able to produce a nearly sinusoidal input current with an optimum phase angle, while requiring a line choke and creating additional switching losses. Main difference is their missing capability to regenerate energy to the mains.

B.4.3.2 Active infeed converter with fundamental switching frequency

In a special type of three phase active infeed converters, the line side IGBTs are operated with the switching frequency of the mains only. Due to this operating mode, the fundamental frequency front end AIC (F3E-AIC) reduces its losses to the value of the diode rectifier, while maintaining the feature to feed back energy from the load to the mains. Furthermore, the topology does not generate an increased DC link voltage. Like a diode rectifier described in B.4.2, this topology can be operated with or without line choke. See Figure B.6.

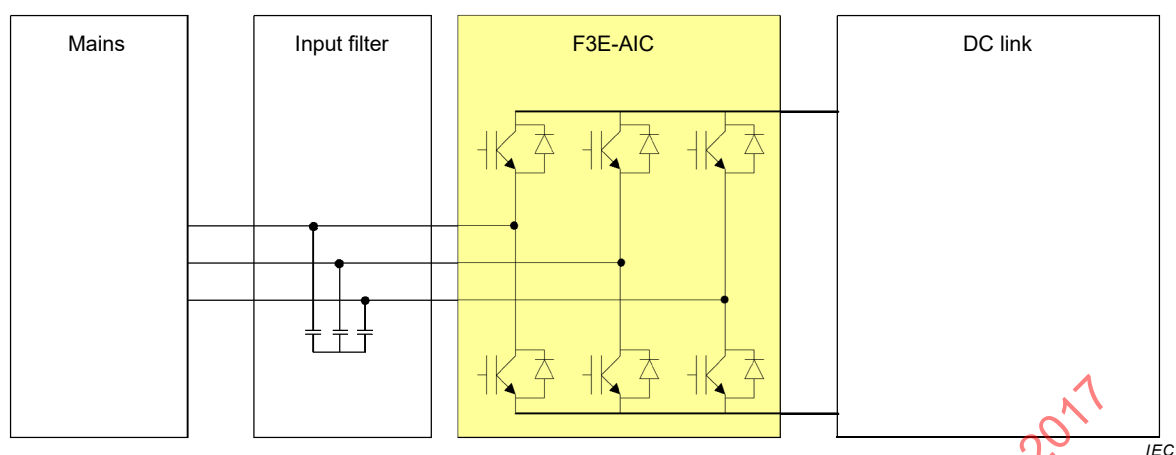


Figure B.6 – PDS with a F3E-AIC input converter without line choke

Due to these features, the energy efficiency of a PDS with this type of input converter is very high.

B.4.4 Power factor of the input converter

The power factor λ of the input current is defined as the ratio of the active input power to the apparent input power of the CDM. At sinusoidal input voltage, it depends on the current waveshape.

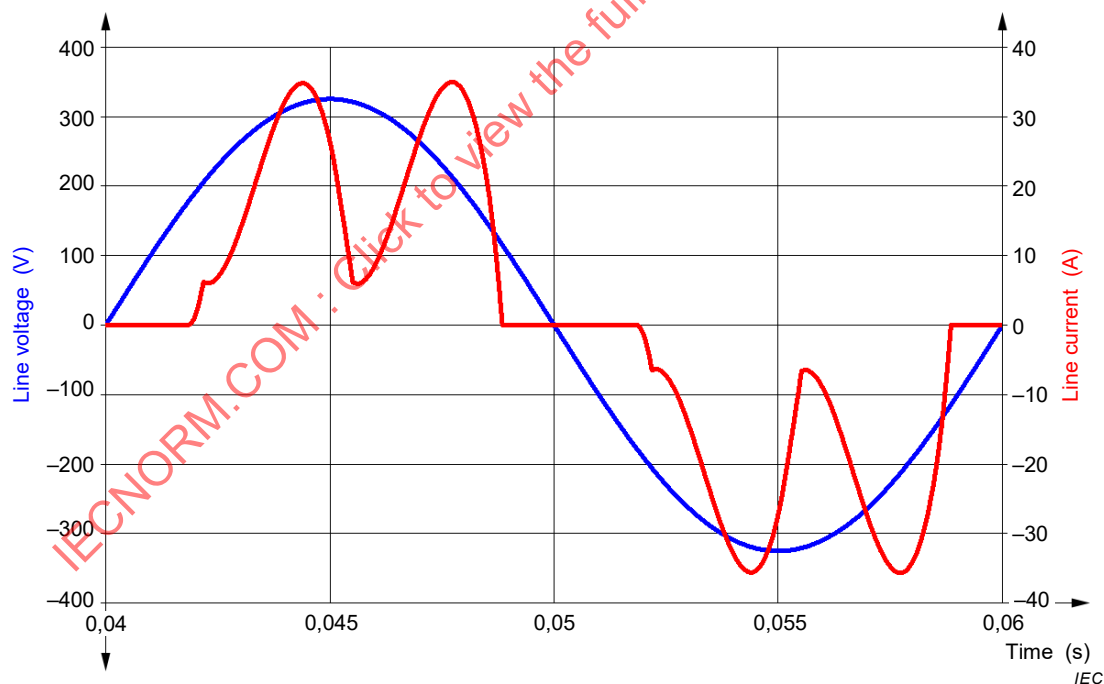


Figure B.7 – Typical waveform of a diode rectifier line current

If the CDM is equipped with a large DC link capacitor, decreasing the size of the input chokes will lead to a more peaky waveform of the input current. Consequently, the value of λ will decrease.

If the DC link capacitor is reduced to a very small value, the current current tends to a block shape waveform.

More information on input converter topologies is given in IEC TS 62578. For the different topologies, the typical values of λ given in Table B.1 apply:

Table B.1 – Typical values of λ for different input converter topologies

Input converter topology	Value of λ
Large DC link capacitor with 0,5 % input choke	0,6
Large DC link capacitor with 4 % input choke	0,7
Small DC link capacitor according to IEC TS 62578	0,9
Active infeed converter with high switching frequency	1,0

B.5 DC link

The DC link of voltage source PDS consists of a DC link capacitor. This capacitor usually contains a large number of electrolytic capacitors. For a 400V three phase power supply system, the voltage in the DC link is usually higher than the voltage capability of a single commercially available electrolytic capacitor. For this reason, capacitors have to be connected in series in the DC link.

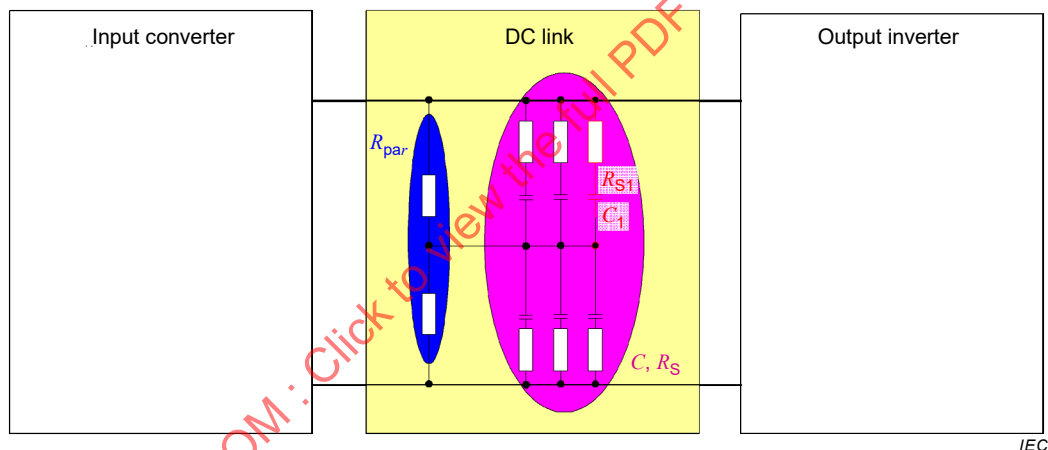


Figure B.8 – DC link circuit

In order to ensure proper voltage sharing of the electrolytic capacitors, resistors are required in parallel to the capacitors. The resulting equivalent resistor R generates one part of the energy losses in the DC link. In the mathematical model, those are taken into account in the first term of Formula (12). As each DC link capacitor requires a certain amount of parallel resistance for symmetrising, this part of the DC link losses is proportional to the rated CDM output current. Furthermore, it is proportional to the square of the actual DC link voltage. The parameter $k1_{DC_link}$ can be calculated by

$$k1_{DC_link} = \frac{1}{R_{par} \cdot I_{r,out}} \quad (B.3)$$

The second part of the losses in the DC link is generated by the (equivalent) series resistance R_{s1} inside the capacitors. The losses appear mainly with six times the fundamental frequency of the mains and are proportional to the square of the input current of the rectifier. The parameter $k2_{DC_link}$ can be calculated with the following steps:

- 1) The losses of a capacitor are usually specified in the datasheet with the loss factor $\tan\delta$ at line frequency $\omega/2\pi$ (50Hz or 60Hz). The equivalent series resistor R_{s1} of one capacitor can be calculated by

$$R_{s1} = \frac{\tan\delta}{\omega \cdot C_1} \quad (\text{B.4})$$

- 2) The overall resulting resistor R_s of the complete DC link capacitor array C can be calculated according the series and parallel connection of individual capacitors C_1 .
- 3) The parameter $k2_{\text{DC_link}}$ can be calculated by

$$k2_{\text{DC_link}} = R_s \cdot I_{r,\text{out}} \quad (\text{B.5})$$

DC chokes may be used in the DC link. If these chokes are used, they usually replace AC line harmonics chokes in the input filter. As far as energy efficiency of the system and investment cost are concerned, DC chokes and AC chokes are in the same order of magnitude.

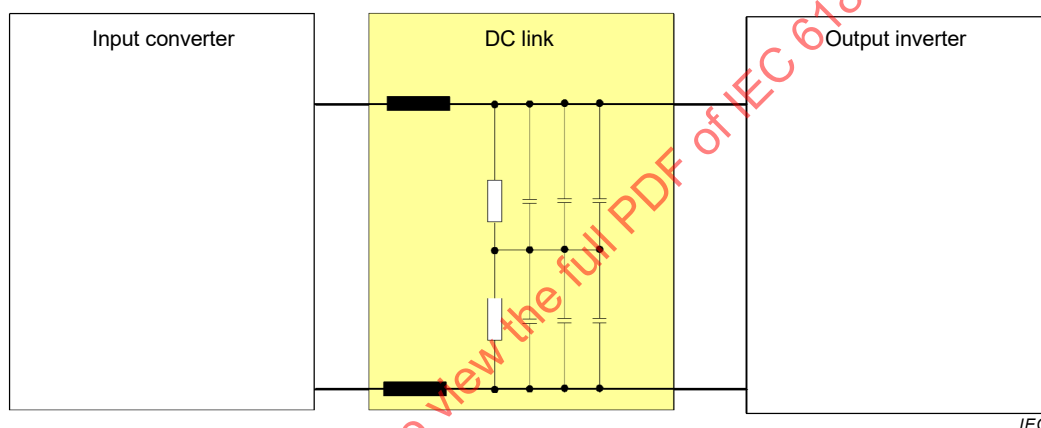


Figure B.9 – DC link circuit with additional DC chokes

In some BDM types, the amount of capacitance in the DC link is rather small. In this case, it is possible to use capacitors with a higher voltage withstand capability, parallel resistors are not required in that case, improving the overall energy efficiency of the system.

B.6 Output inverter

Output inverters in voltage source PDS usually consist of a three phase inverter bridge. By switching the semiconductors with a high frequency according to a pulse width modulated (PWM) control scheme, the speed of the motor at the output can be controlled to the desired value. See Figure B.10.

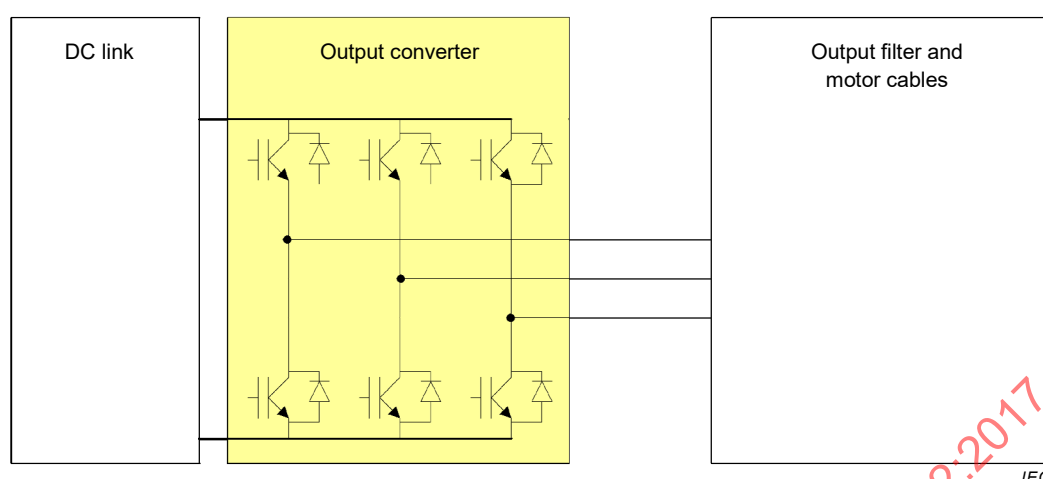


Figure B.10 – Output inverter of the PDS

Losses in the output inverter are generated by the on-state losses and the switching losses of the semiconductors. Both types of losses are reduced by continuous technological improvements in semiconductor development, either by improving the device structure or by using new semiconductor materials.

From the user's point of view, losses in the output inverter can be influenced by the switching frequency. Reduced switching frequency leads to lower losses in the output inverter. A lower switching frequency, however, increases losses in the motor and in optional output filter circuits. For an optimized energy efficient solution, the combination of all those subsystems has to be investigated, see Figure 14.

B.7 Output filter and motor cables

B.7.1 General

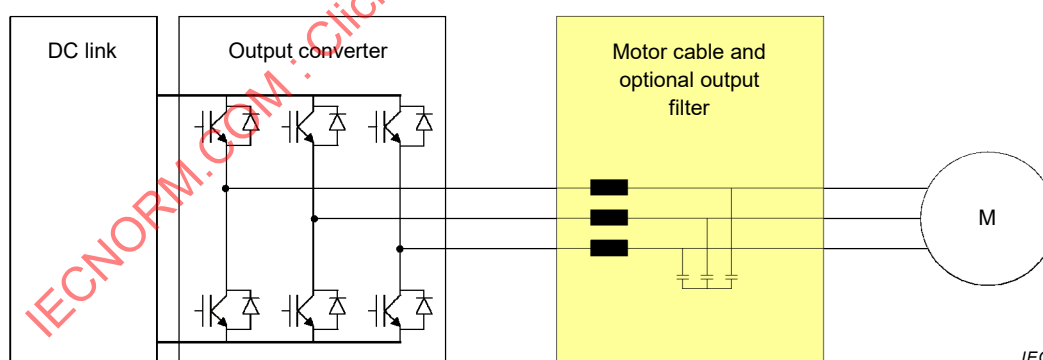


Figure B.11 – Motor cable and optional output filter of the PDS

The output inverter usually operates its semiconductor switches with high switching speed to minimise switching losses. If no output filters are used (see Figure B.11 for optional location), overvoltage spikes due to reflexion of the voltage waveform can be observed at the motor terminals, stressing the motor insulation with twice the DC link voltage. This phenomenon can be observed if the length of the motor cable is longer than the critical length, which can be calculated as follows:

$$l_{\text{crit}} \geq \frac{v \cdot t_r}{2} \quad (\text{B.6})$$

For a typical rise time of $t_r = 200 \text{ ns}$ and a typical speed of the voltage wave of $v = 150 \text{ m}/\mu\text{s}$ the critical length of the motor cable is $l_{\text{crit}} = 15 \text{ m}$.

These voltage spikes lead to an increased stress of the motor insulation. However, their effect on losses is negligible.

In some cases, output filters are used, mainly to reduce the stress on the insulation of the motor and to increase the motor cable length. Different kinds of output filters are known, their effect on efficiency will be described.

B.7.2 Sine wave filters

Sine wave filters are designed to filter out the switching frequency of the inverter. They usually include at least one inductor and one capacitor, forming a second order filter for the output voltage of the inverter. The resonance frequency of a sine wave filter is chosen to be lower than the switching frequency of the inverter.

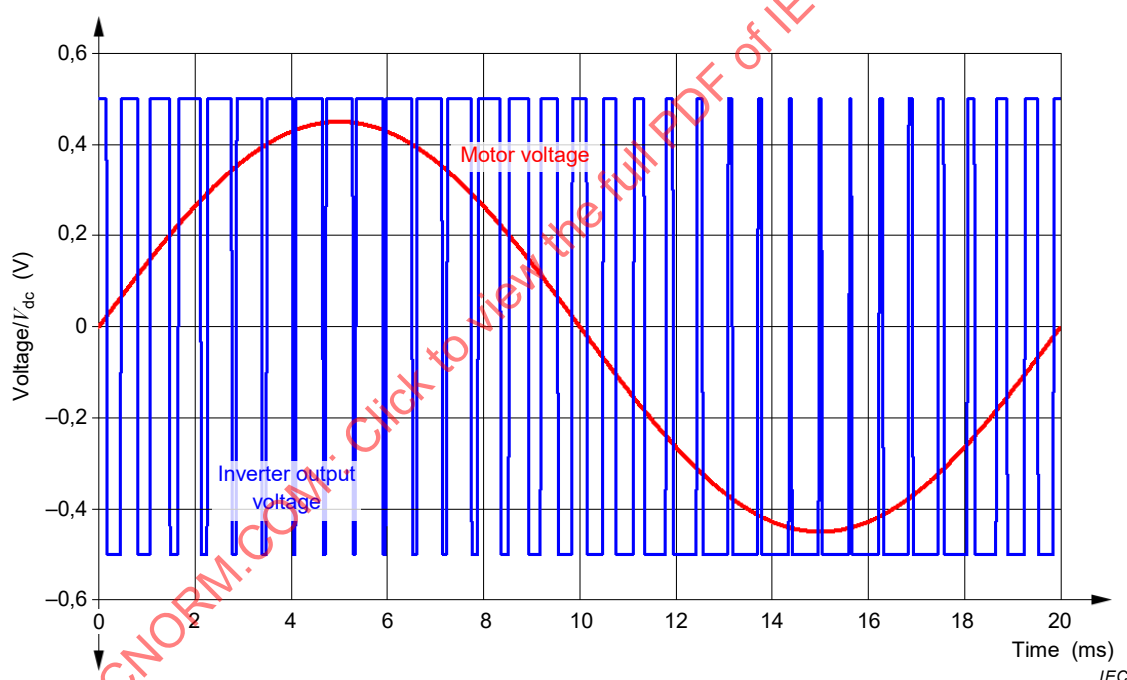


Figure B.12 – Typical waveform of inverter output voltage and motor voltage when using a sine wave output filter

When operating at an inverter without sine wave filter, the motor will show additional losses due to high frequency ripple currents. These additional losses are described in IEC TS 60034-25. With a sine wave filter, these additional losses can be largely reduced.

However, the sine wave filter itself will show some losses, mainly due to the copper and iron losses in the filter inductor. These losses are known to be less than 0,5 % of the rated inverter power for high power sizes and may be up to 8 % of the rated inverter power for low power sizes at rated motor speed. At lower motor speed, these losses are even lower.

However, this type of filter produces a small volt-drop at power frequency and there may be a reduction in the available control bandwidth, particularly if the PWM frequency is low. Therefore, it is sometimes not possible to use this type of filter.

B.7.3 dV/dt filters and motor chokes

dV/dt filters are used to increase the rise time of the motor voltage in order to reduce the stress on the motor insulation. They show basically the same topology as sine wave filters. In contrast to those, their resonance frequency is chosen far higher than the switching frequency, resulting in considerably smaller components. However, the motor voltage remains similar to the waveform of the inverter output voltage shown in Figure B.12. Losses in the motor are not affected by the dV/dt filter.

Losses in the dV/dt filter itself are proportional to the switching frequency of the inverter. The losses in the dV/dt filter might be up to 1 % of the rated PDS power. At a switching frequency of 500 Hz, the losses in the dV/dt filter are typically less than 0,25 % of the rated PDS power. Exact losses have to be determined at the applied switching frequency.

For PDS with higher switching frequency, motor chokes may be used instead of dV/dt filters to reduce the stress on the motor insulation. Losses generated by these chokes are comparable to losses of a sine wave filter. However, the reduction of the stress on the insulation is not as effective as with filter solutions. Motor losses are not affected either.

B.7.4 High frequency EMI motor filters

High frequency EMI motor filters, similar but not identical to those described in B.3.1, may be used at the inverter output terminals as well. Their influence is similar to the line side EMI filters.

B.7.5 Motor cables

Motor cables connect the CDM with the motor. The resistive behaviour of the motor cables causes losses that should be considered for long motor cables. As the length of the motor cables is different for each installation, these losses cannot be given as an attribute of a PDS, but have to be assessed in every individual installation. As a rule of thumb, motor cable losses can be neglected as long as their length is below 25 m. Most of the losses are due to the fundamental motor current, the influence of the high frequency current can be neglected. If single wire cables with individual shielding are used instead of three wire cables, current will cause additionally losses in the cable shields.

B.8 Motor

A method to evaluate losses generated in the motor, when operated either with a sinusoidal waveform or with a pulsed waveform from an inverter, is described in IEC 60034-2-1 and IEC TS 60034-2-3. Auxiliary fans and brakes are a part of the motor system.

B.9 Mechanical load

Losses in the load strongly depend on the kind of application the PDS is used for. The loss saving potential by running the load in an energetically optimized way is far greater than the losses of the PDS and should therefore be the major issue when designing an application to minimum losses. This issue is addressed in Annex A.

B.10 Control and standby losses

Control losses usually do not depend significantly on the rated CDM power. For this type of losses, it is more important to evaluate the automation system as a whole and the control functions of the PDS, such as bus communication and driving additional equipment like for example relays, position sensors or motor brakes. For very low power PDS (< 500W), this

portion of the losses might be in the same order of magnitude as the power losses, whereas it is getting less and less important for higher rated PDS power.

Besides the losses in the control part of the CDM itself, there are also losses created in the switch mode power supplies of the CDM, supplying for example a fan as a major consumer, in case of forced air cooling. These losses are mainly independent of the CDM and are therefore regarded like control losses as well.

The control and standby losses $P_{L,control}$ are generated when the PDS is powered up, but the motor is not energized. They are typically one to three orders of magnitude lower than the losses during operation. Their influence on the overall losses strongly depends on the duty profile of the extended product. Besides this, they also depend on the requirements of the application in terms of wake-up time and communication.

B.11 Cooling losses

B.11.1 Primary cooling losses

The primary cooling of the components illustrated in Figure 11 is mainly done by the primary cooling (fan or liquid cooling) integrated in the BDM/CDM/PDS. The cooling might be temperature dependant (ON/OFF or PWM controlled) or might be an uncontrolled cooling system.

B.11.2 Secondary cooling losses

Besides the fact that the all components shown in Figure B.1 create losses, these losses have to be cooled by a secondary cooling system in many applications. It is depending on the application itself which losses have to be cooled by a secondary cooling system.

A typical secondary cooling system is an air conditioning system, keeping the temperature of targeted room below a certain value. All losses generated in this room have to be actively cooled by the secondary system, including for example losses of a control system. As a minimum, the secondary cooling system has to cover the losses of the CDM itself. In this case, the power consumption of a typical secondary cooling system is in the range of 20 % of the CDM losses.

However, in some applications, the motor and the load machine require cooling as well. These losses have to be taken into account by the overall system designer and are not in the scope of this document.

Annex C (informative)

Converter topology

C.1 General

In the vast majority of applications, CDM topologies described in Annex B can be found. This is especially true for operation of the CDM at a line voltage up to 1 000 V AC. In this case, the mathematical models described in Clause 5 describe the losses of a CDM or a PDS with sufficient accuracy.

However, in some cases, different converter topologies can be found. Their impact on losses is described in a qualitative manner in this informative annex.

C.2 Voltage source output inverter topologies different from those mathematically described in 5.2.2

The mathematical model in 5.2.2 describes the losses of a 2 level voltage source inverter. In some applications, higher level topologies are used, mainly in medium voltage CDMs. The simplest solution in this case is a three level inverter, but also multilevel topologies are used in rare cases.

Depending on the switching frequency and the voltage rating, multilevel topologies offer the possibility to reduce the losses of a CDM. Furthermore, they offer the possibility to reduce the losses in the motor, because the harmonics in the motor current are lower for the same switching frequency of the semiconductor devices. Consequently, calculating the inverter losses with the mathematical model given in 5.2.2 will result in higher losses than in a practical application and will therefore deliver results on the safe side, as far as the evaluation of the IE class is concerned.

As the mathematical calculation of inverter losses is significantly more complex than for a 2 level topology, it is not included in this document.

C.3 Voltage source input converter topologies different from those mathematically described in 5.2.3

If the input converter is a multilevel active infeed converter, the same considerations as in Clause C.2 apply.

For passive input converters, Figure B.4 shows a six pulse infeed converter and Figure B.7 shows a typical waveform for this topology. In some applications, which are designed for very low harmonic input currents, 12-pulse, 18-pulse or 24-pulse infeed converters are used. In this case, the input converter current stays very similar to the waveform shown in Figure B.7, consequently, the mathematical model described in 5.2.3 can be used for all passive infeed topologies.

Other infeed converter topologies, for example non-regenerative PFC topologies, are rarely to be found and will be described in a future edition of this document.

C.4 CDM topologies different from voltage source type

CDM topologies different from voltage source type, like current source inverters or direct converters, can be found in a small number of applications, mainly in the high power range above 1 MW and in the high voltage range above 1 000 V AC. The calculation of losses for these topologies is quite different from the mathematical model given in 5.1. A mathematical model for these topologies will be given in a future edition of this document, if this is assumed to be required. In this edition, a qualitative statement will be given only.

Current source CDMs usually show higher losses compared to a voltage source CDM due to the following reasons:

- Current source inverters require power semiconductor devices with reverse blocking capability. These power semiconductors usually show a higher forward voltage drop compared to asymmetrically blocking power semiconductors. Consequently, their conduction losses are usually higher.
- In the DC link, the parallel capacitor shown in Figure B.8 is replaced by a series inductor. The losses in this series DC link inductor are usually higher than the losses of a parallel DC link capacitor.

Besides higher losses in the CDM, however, current source CDMs produce a voltage waveform at their output terminals which is much closer to a sinusoidal waveform than the voltage output waveform of a voltage source CDM. Consequently, the harmonic losses in the motor are expected to be lower. In the overall PDS, the losses are expected to be similar.

Direct converters offer the possibility to directly connect each input phase to each output phase of the CDM. For this type of CDM, two topologies are known:

- 1) Matrix converters use power semiconductor devices similar to voltage source output inverters, operating at similar switching frequency. Losses in this type of CDM are reported to be similar to voltage source CDMs, though their mathematical model is quite different. Matrix converters can only be found very rarely in applications due to several reasons, there are no indications that this situation will change in the near future.
- 2) Thyristor cyclo converters are used for very high power ratings in the range above 10 MW, mainly in applications with a low output frequency of the CDM. The thyristors are operated with a very low switching frequency which is similar to the line frequency, and the thyristors show a comparatively low forward voltage drop. Consequently, the losses of this type of CDMs are comparatively low. On the other hand, the losses in the motor and the mains are higher than for standard voltage source CDMs, as the voltage waveform shows high harmonics.

Annex D (informative)

Motor model and loss interpolation

D.1 Overview

Annex D provides technical details on motor losses and an interpolation formula for determining losses and efficiencies over the entire torque/speed range based on a limited number of measured load points.

NOTE It is envisaged to incorporate this information into the first edition of IEC TS 60034-30-2 and remove it from the next edition of this document.

Additionally, efficiency interpolation data of typical 2- and 4-pole induction motors is provided.

In this annex, the fundamental supply frequency f and the torque T are used as relative values (within the range 0 ... 1) in reference to their rated values. The relative rated output power P_N is therefore given as $P_N = f \times T = 1$.

D.2 Losses of AC motors

D.2.1 General

Clause D.2 gives detailed information on the physical effects that create losses in electrical machines. It can be used as a basis for the calculation of losses at various speeds and loads (torque) when the individual loss components are known from calculation or measurements.

D.2.2 Stator and rotor winding I^2R losses ($P_{LS} + P_{LR}$ (for induction or wound rotor motors))

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

Hence, winding losses at any load-point $P_{LSR}(f, T)$ can be interpolated from the winding losses P_{LSR} at rated frequency f_N and rated torque T_N by:

$$P_{LS}(f, T) = P_{LS}(f_N, T_N) \cdot \left[\left(\frac{I_0}{I_N} \right)^2 + \left(1 - \left(\frac{I_0}{I_N} \right)^2 \right) \cdot T^2 \right] \quad (D.1)$$

D.2.3 Additional losses (P_{LL})

Additional 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 losses can be separated in two parts:

- additional load losses $R_{LL} \cdot K_{LL}$, which consist of losses in proportion to frequency and the square of torque;
- additional load losses $R_{LL} \cdot (1 - K_{LL})$, which are based on eddy current effects and therefore proportional to the square of frequency and torque.

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

NOTE 1 The interpolation formula given in Clause D.3 makes no use of the exact distribution between additional no-load and load losses, i.e. the formula is applicable to any distribution between the two loss components.

NOTE 2 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 in proportion to the square of the frequency.

$$P_{Lfw}(f, T) = c_{fw} \cdot P_{Lfw}(f_N, T_N) \cdot n + (1 - c_{fw}) \cdot P_{Lfw}(f_N, T_N) \cdot n^2 \quad (D.2)$$

D.2.4 Iron losses (P_{Lfe})

Iron losses can be separated in two parts:

- hysteresis losses $P_{Lfe} \cdot K_{fe}$, which are proportional to frequency;
- eddy-current losses $P_{Lfe} \cdot (1 - K_{fe})$, which are proportional to the square of the frequency.

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

NOTE The interpolation formula given in Clause D.3 makes no use of the exact loss distribution of hysteresis and eddy current losses, i.e. the formula is applicable to any distribution between the two loss components.

In induction machines, there is no dependency of iron losses on magnetic flux (B -field) in the constant flux (base-frequency) range.

In synchronous machines, the magnetic flux is strongly dependent on torque, especially when the synchronous reactance is rather large (motors with internal magnets for example).

A general interpolation can therefore be obtained by:

$$P_{Lfe}(f, T) = K_{fe} \cdot P_{Lfe}(f_N, T_N) \cdot T^2 \cdot f + (1 - K_{fe}) \cdot P_{Lfe}(f_N, T_N) \cdot T^2 \cdot f^2 \quad (D.3)$$

It is also known that motors fed by inverters increase iron losses mainly due to the value of the modulation index. Some theories exist to deal with this phenomenon. However, these additional losses are disregarded in this interpolation, as they are not predominant in most situations. This may lead to some loss of accuracy for high speed motors.

D.2.5 Friction and windage losses (P_{Lfw})

Friction and windage losses can be split in two parts:

- friction losses $P_{Lfw} \cdot K_{fw}$, which are proportional to frequency;
- windage losses $P_{Lfw} \cdot (1 - K_{fw})$, which are proportional to the third power of speed (frequency).

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

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

Number of poles	K_{fw}	$(1 - K_{fw})$
2	0,7	0,3
4	0,5	0,5
6	0,3	0,7
> 6	0,2	0,8

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

NOTE The interpolation formula given in Clause D.3 makes no use of the exact distribution between friction and windage losses, i.e. the formula is applicable to any distribution between the two loss components. It also contains a constant term that covers losses in auxiliary fans.

$$P_{Lfw}(f, T) = c_{fw} \cdot P_{Lfw}(f_N, T_N) \cdot n + (1 - c_{fw}) \cdot P_{Lfw}(f_N, T_N) \cdot n^2 \quad (D.4)$$

D.2.6 Additional harmonic losses (P_{LHL})

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

Additional harmonic losses can be considered constant over the whole frequency and torque range as long as the converter switching frequency remains unchanged.

$$P_{LHL}(f, T) = P_{LHL}(f_N, T_N) \quad (D.5)$$

D.3 Interpolation formula

Based on the formulas given in Clause D.2, the total loss at any operating point (relative supply frequency f and torque T from 0 ... 1) is given by:

$$P_L(f, T) = P_{LSR}(f, T) + P_{Lfe}(f, T) + P_{LL}(f, T) + P_{Lfw}(f, T) + P_{LHL} \quad (D.6)$$

The efficiency at any operating point can be calculated from:

$$\eta(f, T) = \frac{f \cdot T}{f \cdot T + P_L(f, T)} \quad (D.7)$$

Likewise, the losses at any operating point can be determined from the efficiency by:

$$P_L(f, T) = f \cdot T \cdot \left(\frac{1}{\eta(f, T)} - 1 \right) \quad (D.8)$$

The relative losses at any operating point shall be obtained by applying the following interpolation formula:

$$R_L(f, T) = A + B \cdot f + C \cdot f^2 + D \cdot f \cdot T^2 + E \cdot f^2 \cdot T^2 + F \cdot T + G \cdot T^2 \quad (D.9)$$

NOTE 1 Windage losses (Formula (D.4)) stipulate an additional interpolation term in Formula (D.9) that is in dependent of speed to the third power. However, numerous tests have shown that such a term is of little practical use. To the contrary, slight measurement errors can lead to significant fluctuations. Therefore, this term was disregarded in the interpolation formula.

NOTE 2 The seven constants $A \dots G$ have no direct physical meaning. They provide a complete and mathematically correct transformation of the physical equations given in Formulae (D.1) to (D.5). The interpolation Formula (9) is mathematically identical to Formula (6) (disregarding windage losses, see Note 1).

NOTE 3 The interpolation formula can be used to extrapolate losses in the full base-speed ($f = 0 \dots 1$) and torque ($T = 0 \dots 1$) range. Extrapolation in the overload ($T > 1,0$) range is also possible albeit with increasing error. Extrapolation in the field-weakening (constant power) frequency range ($f > 1,0$) is not possible.

In the case of synchronous machines, the relative speed n may be used as a replacement of the relative supply frequency f without any loss of precision.

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

However, the relative speed n may also be used for the interpolation instead of the relative supply frequency f , thereby disregarding the slip. This will result in a slight reduction of interpolation precision, which is usually acceptable in practical applications.

D.4 Analytical determination of the interpolation coefficients

D.4.1 General

The operating points given in Table D.2, and illustrated in Figure D.1, are normative for the analytical determination of the interpolation constants $A \dots G$ of Clause D.3.

Table D.2 – Normative operating points with graphical representation

	f	T	P
P_1	0,9	1	0,9
P_2	0,5	1	0,5
P_3	0,9	0,5	0,45
P_4	0,5	0,5	0,25
P_5	0,25	1	0,25
P_6	0,5	0,25	0,125
P_7	0,25	0,25	0,062 5

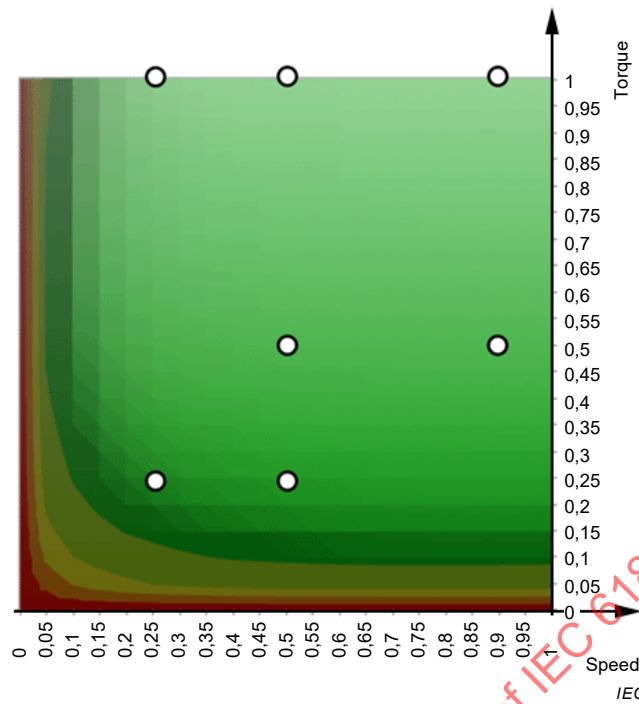


Figure D.1 – Normative operating points

Frequencies f , torques T and powers P are given as relative values related to rated frequency, rated torque and rated output power.

These points are intentionally different than the points in Clause 4 and Clause 7.

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

$$\begin{aligned}
 A &= -\frac{25}{156} \cdot P_1 + \frac{529}{780} \cdot P_2 + \frac{25}{39} \cdot P_3 - \frac{103}{39} \cdot P_4 - \frac{12}{65} \cdot P_5 - \frac{56}{195} \cdot P_6 + \frac{192}{65} \cdot P_7 \\
 B &= \frac{25}{26} \cdot P_1 - \frac{599}{390} \cdot P_2 - \frac{50}{13} \cdot P_3 + \frac{50}{13} \cdot P_4 + \frac{112}{195} \cdot P_5 + \frac{1792}{195} \cdot P_6 - \frac{1792}{195} \cdot P_7 \\
 C &= -\frac{50}{39} \cdot P_1 + \frac{22}{13} \cdot P_2 + \frac{200}{39} \cdot P_3 - \frac{200}{39} \cdot P_4 - \frac{16}{39} \cdot P_5 - \frac{256}{39} \cdot P_6 + \frac{256}{39} \cdot P_7 \\
 D &= -\frac{50}{13} \cdot P_1 + \frac{2542}{195} \cdot P_2 + \frac{50}{13} \cdot P_3 - \frac{50}{13} \cdot P_4 - \frac{1792}{195} \cdot P_5 - \frac{1792}{195} \cdot P_6 + \frac{1792}{195} \cdot P_7 \\
 E &= \frac{200}{39} \cdot P_1 - \frac{152}{13} \cdot P_2 - \frac{200}{39} \cdot P_3 + \frac{200}{39} \cdot P_4 + \frac{256}{39} \cdot P_5 + \frac{256}{39} \cdot P_6 - \frac{256}{39} \cdot P_7 \\
 F &= -2 \cdot P_2 + 10 \cdot P_4 - 8 \cdot P_6 \\
 G &= \frac{25}{39} \cdot P_1 - \frac{181}{195} \cdot P_2 - \frac{25}{39} \cdot P_3 - \frac{287}{39} \cdot P_4 + \frac{192}{65} \cdot P_5 + \frac{1616}{195} \cdot P_6 - \frac{192}{65} \cdot P_7
 \end{aligned} \tag{D.10}$$

D.4.2 Additional losses due to frequency converter voltage drop

Often, frequency converters (CDM) cannot provide full (rated) fundamental motor voltage, which is required to maintain full flux at rated speed. In this case, the losses in the motor will be higher due to an increased motor current.

The normative operating points (Table D.2) avoid this problem by requiring tests at a maximum of 90 % of rated speed.

The increase in losses at 100 % of rated speed in relation to the interpolated losses can be calculated linear with the loss of voltage: $U_{r, \text{Motor}} / U_{\text{fundamental, CDM}}$.

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

D.4.3 Alternate operating points to determine interpolation coefficients

The operating points of Table D.3 can be used as a non-normative alternative for the analytical determination of the interpolation constants $A \dots G$ of Clause D.3.

Table D.3 – Non-normative alternate operating points

	f	T	P
P_1^*	1	1	1
P_2	0,5	1	0,5
P_3^*	1	0,5	0,5
P_4	0,5	0,5	0,25
P_5	0,25	1	0,25
P_6	0,5	0,25	0,125
P_7	0,25	0,25	0,0 625
NOTE The asterisk with operating points P_1^* and P_3^* are only to indicate that these points have different values for f , T , and/or P than P_1 and P_3 in Table D.2.			

Frequencies f , torques T and powers P are given as relative values related to rated frequency, rated torque and rated output power.

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

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

$$\begin{aligned}
A &= -\frac{1}{9} \cdot P_1^* + \frac{28}{45} \cdot P_2 + \frac{4}{9} \cdot P_3 - \frac{22}{9} \cdot P_4 - \frac{8}{45} \cdot P_5 - \frac{8}{45} \cdot P_6 + \frac{128}{45} \cdot P_7 \\
B &= \frac{2}{3} \cdot P_1^* - \frac{6}{5} \cdot P_2 - \frac{8}{3} \cdot P_3 + \frac{8}{3} \cdot P_4 + \frac{8}{15} \cdot P_5 + \frac{128}{15} \cdot P_6 - \frac{128}{15} \cdot P_7 \\
C &= -\frac{8}{9} \cdot P_1^* + \frac{56}{45} \cdot P_2 + \frac{32}{9} \cdot P_3 - \frac{32}{9} \cdot P_4 - \frac{16}{45} \cdot P_5 - \frac{256}{45} \cdot P_6 + \frac{256}{45} \cdot P_7 \\
D &= -\frac{8}{3} \cdot P_1^* + \frac{56}{5} \cdot P_2 + \frac{8}{3} \cdot P_3 - \frac{8}{3} \cdot P_4 - \frac{128}{15} \cdot P_5 - \frac{128}{15} \cdot P_6 + \frac{128}{15} \cdot P_7 \\
E &= \frac{32}{9} \cdot P_1^* - \frac{416}{45} \cdot P_2 - \frac{32}{9} \cdot P_3 + \frac{32}{9} \cdot P_4 + \frac{256}{45} \cdot P_5 + \frac{256}{45} \cdot P_6 - \frac{256}{45} \cdot P_7 \\
F &= -2 \cdot P_2 + 10 \cdot P_4 - 8 \cdot P_6 \\
G &= \frac{4}{9} \cdot P_1^* - \frac{28}{45} \cdot P_2 - \frac{4}{9} \cdot P_3 - \frac{68}{9} \cdot P_4 + \frac{128}{45} \cdot P_5 + \frac{368}{45} \cdot P_6 - \frac{128}{45} \cdot P_7
\end{aligned} \tag{D.11}$$

D.4.4 Motors for square-torque applications

For special purpose motors designed solely for square-torque applications (for example pumps, fans and compressors) only three load points P_1^* , P_3^* and P_6 need to be determined.

In this case, the interpolation coefficients cannot be determined and the interpolation Formula (D.11) cannot be applied. However, this information is sufficient for the extended product approach as detailed in IEC 61800-9-1.

NOTE IEC 61800-9-1 has not been published yet.

D.5 Determination of interpolation error

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

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

The interpolation error Q_{ISI} (interpolation stability index) is then given by Formula (D.12):

$$Q_{\text{ISI}} = \sqrt{\frac{1}{16} \sum_f \sum_T \left(\frac{P_{L(f,T)}^{\text{measured}} - P_{L(f,T)}^{\text{interpolated}}}{P_{L(f,T)}^{\text{measured}}} \right)^2} \tag{D.12}$$

D.6 Numerical determination of the interpolation coefficients

Optionally, the interpolation coefficients obtained in Clause D.3 can be improved when losses in more than the 7 normative operating points have been tested.

In this case, Formula (D.12) can be used as a minimum target value in a numerical search algorithm. Such algorithms are available in standard mathematical software and also in advanced spreadsheet software.

Regardless of how the 7 interpolation coefficients are obtained (Clauses D.3, D.6), the application of the interpolation Formula (9) is always the same.

D.7 Typical IE2 induction motor efficiency

Table D.4 and Table D.5 give coefficients for the interpolation formula according to Clause D.3 for typical induction machines of efficiency class IE2.

These values were derived from measurements on actual machines and are not identical to the values of the reference motor (RM) provided in 5.3 and Annex A.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61800-9-2:2017

Table D.4 – Interpolation coefficients of typical 4-pole reference IE2 induction machines

Rated power kW	Coeff. A	Coeff. B	Coeff. C	Coeff. D	Coeff. E	Coeff. F	Coeff. G
0,12	0,324 316	0,116 588	0,076 506	0,002 987	0,003 914	-0,292 825	0,551 857
0,18	0,250 225	0,094 236	0,061 948	0,002 082	0,002 949	-0,119 516	0,316 624
0,25	0,195 658	0,083 798	0,060 563	0,005 959	0,006 785	-0,100 213	0,249 350
0,37	0,137 100	0,062 496	0,042 114	0,004 064	0,004 561	-0,042 812	0,204 367
0,55	0,111 483	0,047 330	0,031 814	0,000 010	0,000 416	-0,026 457	0,161 360
0,75	0,085 781	0,041 660	0,026 726	0,001 532	0,001 856	-0,020 927	0,152 402
1,1	0,069 172	0,038 244	0,027 240	0,000 872	0,001 317	-0,016 191	0,140 765
1,5	0,059 580	0,034 760	0,022 242	0,001 155	0,001 639	-0,018 775	0,138 279
2,2	0,036 978	0,031 347	0,021 183	0,009 877	0,008 447	0,016 190	0,091 365
3	0,038 845	0,026 351	0,015 957	0,004 417	0,004 606	-0,008 363	0,110 668
4	0,034 853	0,027 515	0,019 177	0,004 163	0,004 691	-0,012 966	0,098 248
5,5	0,029 206	0,024 540	0,018 285	0,007 272	0,007 664	-0,009 436	0,084 946
7,5	0,023 744	0,022 127	0,015 244	0,006 753	0,007 196	-0,016 095	0,091 724
11	0,019 974	0,020 315	0,014 864	0,005 763	0,005 965	-0,009 032	0,072 826
15	0,016 536	0,018 496	0,013 898	0,006 173	0,006 388	-0,007 766	0,064 775
18,5	0,014 915	0,017 047	0,012 419	0,005 559	0,005 729	-0,005 309	0,063 114
22	0,014 521	0,016 611	0,012 614	0,002 568	0,002 826	-0,005 610	0,060 415
30	0,010 356	0,013 976	0,008 611	0,006 561	0,009 284	0,000 337	0,048 029
37	0,022 059	0,003 052	0,014 537	0,009 029	-0,002 562	-0,008 081	0,053 231
45	0,010 470	0,013 126	0,011 908	0,004 668	0,004 768	-0,002 944	0,045 438
55	0,007 953	0,013 335	0,012 556	0,004 899	0,005 128	0,001 053	0,033 639
75	0,008 147	0,012 746	0,012 559	0,006 868	0,007 747	-0,006 249	0,030 899
90	0,007 422	0,012 923	0,011 440	0,006 342	0,006 353	-0,002 174	0,027 528
110	0,009 988	0,015 774	0,012 799	0,006 196	0,006 242	-0,002 418	0,023 835
132	0,009 150	0,012 524	0,008 713	0,007 001	0,007 230	-0,004 418	0,029 462
160	0,008 685	0,013 137	0,008 347	0,007 411	0,007 595	-0,003 358	0,025 062
200	0,008 253	0,012 361	0,009 287	0,006 432	0,006 646	-0,003310	0,024 648
250	0,007 973	0,011 493	0,008 782	0,005 903	0,006 134	-0,002 659	0,022 575
315	0,007 726	0,010 630	0,008 266	0,005 373	0,005 622	-0,002 170	0,020 633
355	0,007 304	0,010 197	0,008 104	0,005 290	0,005 473	-0,001 981	0,019 849
400	0,006 549	0,009 745	0,007 804	0,005 259	0,005 507	-0,000 335	0,018 033
500	0,006 472	0,009 322	0,007 784	0,005 142	0,005 156	-0,001 640	0,018 292
560	0,006 368	0,009 195	0,008 457	0,005 010	0,004 850	-0,001 882	0,016 170
630	0,005 987	0,008 960	0,009 242	0,005 104	0,005 158	-0,000 826	0,012 893
710	0,006 027	0,008 993	0,009 864	0,005 123	0,005 155	-0,000 825	0,012 505
800	0,006 070	0,009 023	0,010 484	0,005 128	0,005 150	-0,000 833	0,012 126
900	0,005 714	0,008 565	0,009 440	0,005 122	0,005 144	-0,000 887	0,011 977
1 000	0,005 341	0,008 110	0,008 397	0,005 107	0,005 132	-0,000 872	0,011 765

Table D.5 – Interpolation coefficients of typical 2-pole reference IE2 induction machines

Rated power kW	Coeff. A	Coeff. B	Coeff. C	Coeff. D	Coeff. E	Coeff. F	Coeff. G
0,12	0,309 215	0,111 623	0,110 781	-0,001 322	0,002 960	-0,383 548	0,721 923
0,18	0,273 998	0,083 806	0,115 291	0,002 587	0,004 709	-0,348 918	0,561 115
0,25	0,167 541	0,073 171	0,088 958	0,003 867	0,007 011	-0,189 190	0,440 915
0,37	0,110 359	0,055 126	0,073 582	0,009 097	0,011 939	-0,121 045	0,311 147
0,55	0,078 950	0,048 581	0,063 063	0,010 411	0,013 178	-0,090 696	0,259 010
0,75	0,070 365	0,034 987	0,032 732	0,008 746	0,013 292	-0,049 085	0,238 701
1,1	0,056 385	0,031 303	0,030 860	0,005 793	0,007 114	-0,035 794	0,180 159
1,5	0,060 191	0,030 829	0,040 748	0,000 904	0,001 593	-0,022 733	0,136 693
2,2	0,059 162	0,031 190	0,033 312	0,001 914	0,002 587	-0,028 384	0,137 223
3	0,043 406	0,026 104	0,028 245	0,005 760	0,006 097	-0,011 705	0,111 514
4	0,031 784	0,023 241	0,027 211	0,012 913	0,013 211	-0,012 423	0,095 823
5,5	0,028 954	0,021 007	0,030 026	0,002 759	0,003 151	-0,010 740	0,088 128
7,5	0,024 566	0,016 511	0,089 141	0,001 612	0,016 584	0,016 383	0,019 202
11	0,016 563	0,013 228	0,014 879	0,006 138	0,006 295	-0,007 512	0,067 897
15	0,016 368	0,013 568	0,025 610	0,005 575	0,005 848	-0,004 907	0,059 672
18,5	0,014 745	0,011 859	0,024 222	0,005 110	0,005 264	-0,005 436	0,052 023
22	0,011 104	0,011 228	0,019 121	0,006 070	0,006 207	-0,004 175	0,047 999
30	0,010 892	0,010 729	0,023 913	0,006 792	0,006 959	-0,001 668	0,040 827
37	0,009 844	0,009 115	0,020 941	0,006 641	0,006 957	-0,006 646	0,044 980
45	0,007 975	0,011 238	0,019 297	0,004 000	0,004 373	-0,002 912	0,031 165
55	0,008 080	0,009 476	0,021 905	0,004 978	0,004 839	-0,000 467	0,030 347
75	0,008 174	0,009 524	0,026 133	0,002 245	0,002 546	-0,001 471	0,025 651
90	0,010 468	0,012 436	0,020 174	0,004 593	0,004 592	-0,000 849	0,024 230
110	0,008 463	0,010 116	0,019 400	0,004 050	0,004 079	-0,001 251	0,019 566
132	0,007 975	0,008 928	0,017 852	0,004 602	0,004 641	-0,001 160	0,019 363
160	0,007 489	0,007 738	0,016 304	0,005 148	0,005 203	-0,001 081	0,019 173
200	0,007 513	0,008 009	0,013 136	0,005 785	0,006 285	-0,003 641	0,020 405
250	0,007 336	0,007 431	0,015 691	0,005 161	0,005 183	-0,001 111	0,016 732
315	0,006 501	0,006 990	0,012 831	0,005 141	0,005 161	-0,001 165	0,016 420
355	0,006 197	0,006 633	0,012 262	0,005 128	0,005 149	-0,001 157	0,015 445
400	0,005 887	0,006 273	0,011 683	0,005 127	0,005 153	-0,001 124	0,014 452
500	0,005 571	0,005 915	0,011 114	0,005 114	0,005 140	-0,001 054	0,013 422
560	0,005 426	0,005 839	0,011 092	0,005 071	0,005 185	-0,001 009	0,012 458
630	0,005 222	0,005 734	0,011 155	0,005 072	0,005 145	-0,000 678	0,011 237
710	0,005 226	0,005 655	0,012 328	0,005 095	0,005 142	-0,000 577	0,009 848
800	0,005 216	0,005 593	0,013 485	0,005 074	0,005 162	-0,000 435	0,008 439
900	0,005 054	0,005 307	0,012 116	0,005 090	0,005 136	-0,000 653	0,009 444
1000	0,004 875	0,005 040	0,010 724	0,005 098	0,005 121	-0,000 814	0,010 403

Annex E (informative)

Application example for loss calculations of a CDM and a PDS

E.1 General

In this annex, an example is given how to calculate the losses of a real CDM and a real PDS at a defined operation point. The operating point of the PDS is chosen to be at 80 % rated torque and 75 % rated speed of a 7,5 kW example PDS.

For this purpose, the losses of the CDM are calculated first. In the next step, the motor losses are determined. In the third step, the PDS losses are calculated.

E.2 CDM loss determination

E.2.1 General

In order to determine the relative losses of a CDM at an arbitrary operating point, one of the following calculation models can be used:

- a) maximum losses in neighbouring predefined loss points;
- b) two-dimensional linear inter- or extrapolation from neighbouring loss points;
- c) loss calculation according to the mathematical model described in 5.2.

For the models a) and b), it is necessary to divide the operating area shown in Figure 6 into four segments, as shown in Figure E.1.

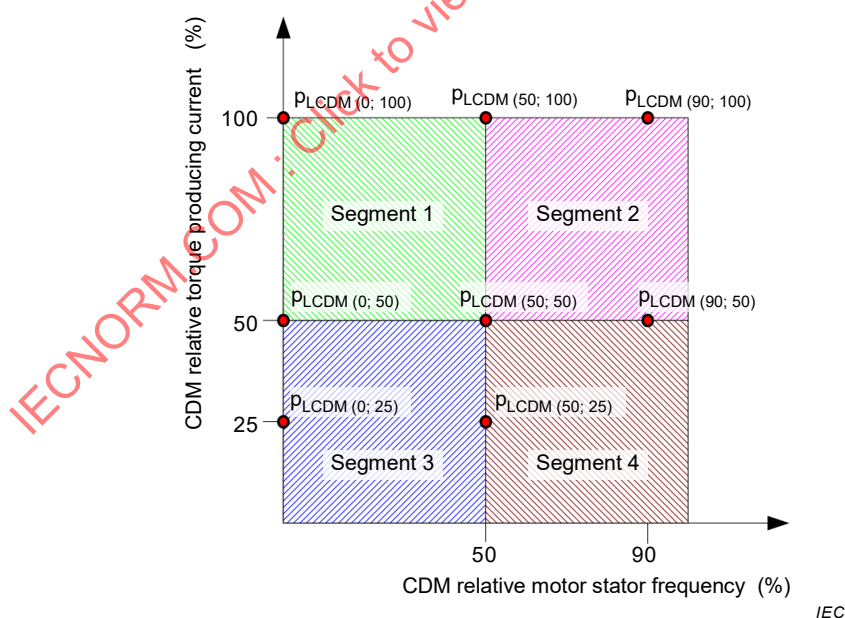


Figure E.1 – Segments of operating points

Segment 1 covers the operating points up to 50 % relative motor stator frequency f and above 50 % relative torque producing current i_q .

Segment 2 covers the operating points above 50 % relative motor stator frequency f and above 50 % relative torque producing current i_q .

Segment 3 covers the operating points up to 50 % relative motor stator frequency f and up to 50 % relative torque producing current i_q .

Segment 4 covers the operating points above 50 % relative motor stator frequency f and up to 50 % relative torque producing current i_q .

In the following subclauses, it is demonstrated how to determine the losses at the operating point of 75 % relative motor stator frequency and 80 % relative torque producing current. The example CDM which is used in the example PDS has a rated apparent power of 9,9 kVA. The losses in the predefined operating points are assumed to be as given in Table E.1:

Table E.1 – Relative losses of a 400 V/9,95 kVA example CDM at the predefined operating points

P_{rM} kW	$S_{r,eq}$ kVA	$P_{L,CDM}$ (0;25)	$P_{L,CDM}$ (0;50)	$P_{L,CDM}$ (0;100)	$P_{L,CDM}$ (50;25)	$P_{L,CDM}$ (50;50)	$P_{L,CDM}$ (50;100)	$P_{L,CDM}$ (90;50)	$P_{L,CDM}$ (90;100)
7,5	9,95	2,56	2,88	3,89	2,64	3,09	4,58	3,45	5,91

E.2.2 Loss determination by maximum losses of neighbouring loss points

This way to determine the losses is very simple. However, it provides a higher deviation from the correct result than the other methods.

The evaluated operating point at 75 % relative motor stator frequency and 80 % of torque producing current belongs to segment 2 according to Figure E.1. Consequently, the neighbouring operating points are $P_{L,CDM}$ (50;50), $P_{L,CDM}$ (50;100), $P_{L,CDM}$ (90;50) and $P_{L,CDM}$ (90;100). The predefined operating point with maximum losses is $P_{L,CDM}$ (90;100). Consequently, the losses at 75 % relative motor stator frequency and 80 % torque producing current are determined to 5,91 %.

E.2.3 Loss determination by two-dimensional interpolation of losses of neighbouring loss points

E.2.3.1 General two-dimensional interpolation model

Interpolation between four defined points A, B, C and D at an operating point Z is calculated in three steps. See Figure E.2.

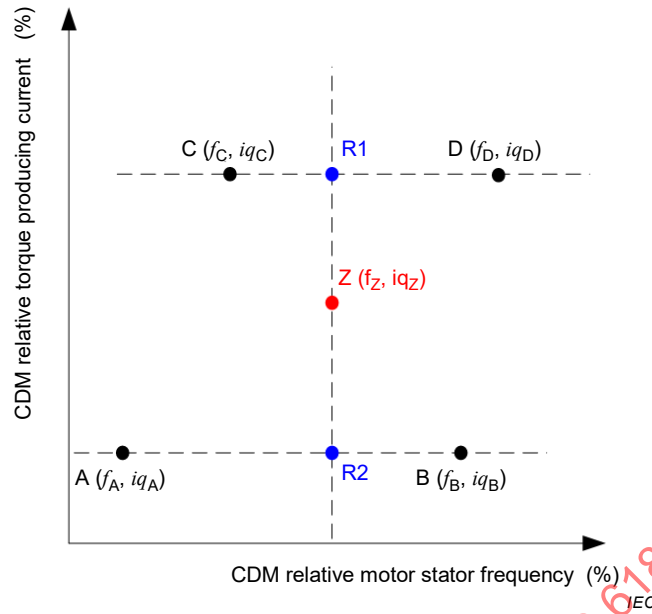


Figure E.2 – Two-dimensional interpolation

In the first step, a linear interpolation between points C and D is calculated for the point R1. The horizontal component f of R1 is chosen equivalent to the horizontal component f_Z of the required operating point Z. If the vertical component of the points C and D is identical ($i_{qC} = i_{qD}$), the losses at the point R1 are a function of the horizontal component f_Z only and can be calculated by:

$$p_{L,R1}(f_Z) = p_{L,C} + \frac{p_{L,D} - p_{L,C}}{f_D - f_C} \cdot (f_Z - f_C) \quad (\text{E.1})$$

In the second step, the losses are interpolated in the same way for the point R2:

$$p_{L,R2}(f_Z) = p_{L,A} + \frac{p_{L,B} - p_{L,A}}{f_B - f_A} \cdot (f_Z - f_A) \quad (\text{E.2})$$

In the third step, the losses in the operating point Z are finally calculated by interpolation between R1 and R2. As R1 and R2 have the same horizontal component f_Z by definition, this interpolation is a function of the vertical component i_{qZ} only:

$$p_{L,Z}(i_{qZ}) = p_{L,R2} + \frac{p_{L,R1} - p_{L,R2}}{i_{qR1} - i_{qR2}} \cdot (i_{qZ} - i_{qR2}) \quad (\text{E.3})$$

Inserting the Formulae (E.1) and (E.2) into (E.3) give a final calculation of the losses at the operating point Z in one step:

$$\begin{aligned}
 p_{L,Z}(f_Z, iq_Z) = & \\
 & p_{L,A} + \frac{p_{L,B} - p_{L,A}}{f_B - f_A} \cdot (f_Z - f_A) + \\
 & \frac{\left(p_{L,C} + \frac{p_{L,D} - p_{L,C}}{f_D - f_C} \cdot (f_Z - f_C) \right) - \left(p_{L,A} + \frac{p_{L,B} - p_{L,A}}{f_B - f_A} \cdot (f_Z - f_A) \right)}{iq_C - iq_A} \cdot (iq_Z - iq_A)
 \end{aligned} \quad (E.4)$$

Taking into account the predefined loss points in Figure 6, the calculation for the segments in Figure E.1 results for segment 1 in:

$$\begin{aligned}
 p_{L,Z}(f_Z, iq_Z) = & \\
 & p_{L,CDM(0,50)} + \frac{p_{L,CDM(50,50)} - p_{L,CDM(0,50)}}{50} \cdot f_Z + \\
 & \left(\frac{\left(p_{L,CDM(0,100)} + \frac{p_{L,CDM(50,100)} - p_{L,CDM(0,100)}}{50} \cdot f_Z \right)}{50} - \frac{\left(p_{L,CDM(0,50)} + \frac{p_{L,CDM(50,50)} - p_{L,CDM(0,50)}}{50} \cdot f_Z \right)}{50} \right) \cdot (iq_Z - 50)
 \end{aligned} \quad (E.5)$$

For segment 2, the calculation results in:

$$\begin{aligned}
 p_{L,Z}(f_Z, iq_Z) = & \\
 & p_{L,CDM(50,50)} + \frac{p_{L,CDM(90,50)} - p_{L,CDM(50,50)}}{40} \cdot (f_Z - 50) + \\
 & \left(\frac{\left(p_{L,CDM(50,100)} + \frac{p_{L,CDM(90,100)} - p_{L,CDM(50,100)}}{40} \cdot (f_Z - 50) \right)}{50} - \frac{\left(p_{L,CDM(50,50)} + \frac{p_{L,CDM(90,50)} - p_{L,CDM(50,50)}}{40} \cdot (f_Z - 50) \right)}{50} \right) \cdot (iq_Z - 50)
 \end{aligned} \quad (E.6)$$

For segment 3, the calculation results in:

$$\begin{aligned}
 p_{L,Z}(f_Z, iq_Z) = & \\
 & p_{L,CDM(0,25)} + \frac{p_{L,CDM(50,25)} - p_{L,CDM(0,25)}}{50} \cdot f_Z + \\
 & \left(\frac{\left(p_{L,CDM(0,50)} + \frac{p_{L,CDM(50,50)} - p_{L,CDM(0,50)}}{50} \cdot f_Z \right)}{25} - \frac{\left(p_{L,CDM(0,25)} + \frac{p_{L,CDM(50,25)} - p_{L,CDM(0,25)}}{50} \cdot f_Z \right)}{25} \right) \cdot (iq_Z - 25)
 \end{aligned} \quad (E.7)$$

For segment 4, the calculation results in:

$$p_{L,Z}(f_Z, iq_Z) = p_{L,CDM(0,25)} + \frac{p_{L,CDM(50,25)} - p_{L,CDM(0,25)}}{50} \cdot f_Z + \left(\frac{\left(p_{L,CDM(50,50)} + \frac{p_{L,CDM(90,50)} - p_{L,CDM(50,50)}}{40} \cdot (f_Z - 50) \right)}{25} - \frac{\left(p_{L,CDM(0,25)} + \frac{p_{L,CDM(50,25)} - p_{L,CDM(0,25)}}{50} \cdot f_Z \right)}{25} \right) \cdot (iq_Z - 25) \quad (E.8)$$

E.2.3.2 Numerical calculation for the requested operating point

The requested operating point at 75 % relative motor stator frequency and 80 % torque producing current is in segment 2. Consequently, Formula (E.6) applies. The resulting losses for this operating point are:

$$p_{L,Z}(75,80) = 3,09 + \frac{3,45 - 3,09}{40} \cdot (75 - 50) + \left(\frac{\left(4,58 + \frac{5,91 - 4,58}{40} \cdot (75 - 50) \right)}{50} - \frac{\left(3,09 + \frac{3,45 - 3,09}{40} \cdot (75 - 50) \right)}{50} \right) \cdot (80 - 50) \quad (E.9)$$

$$= 4,57$$

The relative losses at 75 % relative motor stator frequency and 80 % relative torque are 4,57 %.

E.2.4 Loss determination by the mathematical model described in 5.2

This way to determine the losses gives the best accuracy. However, it requires all technical parameters for the Formulae (5) to (16). As this data is usually not available in the documentation of a CDM, this calculation method is mainly applicable for CDM manufacturers.

In this calculation example, the parameter values of the evaluated CDM are as given in Table E.2:

Table E.2 – Parameters of the example CDM

Abbreviation	Description	Example CDM parameter values	Unit
$U_{T,th}$	Threshold voltage of the power transistor (IGBT)	1,0	V
$U_{T,r}$	On state voltage of the power transistor (IGBT) at rated CDM output current	2,6	V
$U_{D,th}$	Threshold voltage of the power diode	1,1	V
$U_{D,r}$	On state voltage of the power diode at rated CDM output current	2,7	V
$U_{D,th,rectifier}$	Threshold voltage of the rectifier power diode	0,9	V
$U_{D,r,rectifier}$	On state voltage of the rectifier power diode at rated CDM input current	2,0	V
E_T	Switching loss energy of the power transistor (IGBT) per volt and per ampere	$6,5 \cdot 10^{-7}$	$\frac{J}{V \cdot A}$
E_D	Switching loss energy of the power diode per volt and per ampere	$3,5 \cdot 10^{-7}$	$\frac{J}{V \cdot A}$
U_{DC}	inverter DC link voltage	540	V
f_{sw}	inverter switching frequency	4000	Hz
I_{cable}	motor cable current, relevant for increased switching losses	10	A
$k1_{choke}$	choke impedance, relative to the nominal inverter impedance	0,03	
$k2_{choke}$	relative voltage drop on the resistive part of the choke	0,25	
λ	input power factor	0,7	
$k1_{DC_link}$	load independent DC link losses per rated ampere and volt square	$7 \cdot 10^{-7}$	$\frac{1}{\Omega \cdot A}$
$k2_{DC_link}$	load dependent DC link losses per ampere	1,7	$\Omega \cdot A$
U_{rails}	voltage drop at ohmic conductor elements at rated CDM current	0,7	V
$k_{L,cooling}$	factor for cooling losses	0,15	
$P_{L,control}$	standby and control losses	45	W

The rated phase to phase input voltage of the example CDM is 400 V, its rated output current is 14 A. Linear interpolation in Table 1 at 80 % torque producing current calculates to a CDM output current of 83,2 % of the rated output current, resulting in 11,65 A. Linear interpolation at the same torque producing current in Table 2 gives a power factor of 0,81 at the inverter output.

With this data, the mathematical model described in 5.25.1 can be calculated and gives the results in Table E.3:

Table E.3 – Results of the CDM calculation according to the mathematical model

Term	Formula	Losses	Unit
On state losses of one inverter transistor	(5)	10,8	W
On state losses of one inverter diode	(6)	2,72	W
Switching losses of one inverter transistor	(7)	13,9	W
Switching losses of one inverter diode	(8)	7,48	W
Output inverter total losses	(9)	209	W
Rectifier losses	(10)	46,8	W
Input choke losses	(11)	45,9	W
DC link losses	(12)	4,59	W
Current rail losses	(13)	6,98	W
Cooling losses	(14)	76,7	W
Overall absolute CDM losses	(15)	435	W
Overall relative CDM losses	(16)	4,37	%

As a conclusion, the relative losses of the example CDM will be determined with the three different evaluation methods to the values given in Table E.4:

Table E.4 – Comparison of different loss evaluation methods

Evaluation method	relative losses
Maximum losses at neighbouring points	5,91 %
Two-dimensional interpolation at neighbouring points	4,57 %
Mathematical model	4,37 %

E.3 Loss determination of the motor

For the example PDS, the losses of a real motor could be measured. In this example, no real motor is assumed to be available, and consequently the reference motor data from Table A.2 for 7,5kW is used.

Table E.5 – Loss data of the 7,5kW reference motor

P_{rM} kW	$P_{L,RM}$, relative (0;25)	$P_{L,RM}$, relative (0;50)	$P_{L,RM}$, relative (0;100)	$P_{L,RM}$, relative (50;25)	$P_{L,RM}$, relative (50;50)	$P_{L,RM}$, relative (50;100)	$P_{L,RM}$, relative (100;50)	$P_{L,RM}$, relative (100;100)
7,5	2,5	3,7	9,3	4,0	5,3	11,2	7,8	14,7

For the loss calculation, the two-dimensional interpolation model in Formula (E.4) is used. Using the data from the predefined loss points in Table E.5, the motor losses are:

$$\begin{aligned}
 p_{L,M}(75,80) &= 5,3 + \frac{7,8 - 5,3}{50} \cdot (75 - 50) + \\
 &\left(\frac{\left(11,2 + \frac{14,7 - 11,2}{50} \cdot (75 - 50) \right)}{50} - \frac{\left(5,3 + \frac{7,8 - 5,3}{50} \cdot (75 - 50) \right)}{50} \right) \cdot (80 - 50) \\
 &= 10,39\%
 \end{aligned} \tag{E.10}$$

E.4 Loss determination of the PDS

For the loss determination of the PDS, the absolute losses of the CDM and the motor are calculated:

$$P_{L,CDM}(75\%,80\%) = p_{L,CDM(75;80)} \cdot S_{r,eq} = 0,0437 \cdot 9,95 \text{ kVA} = 435 \text{ W} \tag{E.11}$$

$$P_{L,Mot}(75\%,80\%) = p_{L,M(75;80)} \cdot P_{r,M} = 0,1083 \cdot 7,5 \text{ kW} = 812 \text{ W} \tag{E.12}$$

The evaluated operating point is not at rated speed and torque of the PDS. Consequently, the factor $\times$ does not apply. For the loss determination of the PDS, the losses of the PDS are calculated according to Formula (18):

$$P_{L,PDS}(75\%,80\%) = 435 \text{ W} + 812 \text{ W} = 1247 \text{ W} \tag{E.13}$$

$$p_{L,PDS}(75\%,80\%) = \frac{1247 \text{ W}}{7500 \text{ W}} = 16,63\% \tag{E.14}$$

Annex F (informative)

Uncertainty of loss determination method

F.1 General

The uncertainty of loss determination method can be specified with a fault tolerance power losses ΔP_L . The intention is to denote the power loss as $P_L = P_{L,\text{determined}} + \Delta P_L$. To calculate the uncertainty, knowledge of all tolerances of the utilized determination method is mandatory. Tolerances can be specified percental in dependence on the measured value or absolute. During calculation of losses, several factors influence the result. Thus, error propagation has to be considered.

F.2 Calculation of uncertainty at randomly occurring errors

For uncertainty calculation under a randomly occurring error assumption, the standard deviation is demanded. Here function y represents power loss of CDM or PDS and function y is depending on factors x_i . For the standard deviation s_y under randomly occurring errors and independent factors x_i with standard deviations s_i , it is:

$$s_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} s_i \right)^2} \quad (\text{F.1})$$

Here it is considered, that both positive and negative deviations can occur. Thus for the relative standard deviation it is

$$\frac{\Delta p_L}{P_L} = \frac{\Delta P_L}{P_L} = \frac{s_y}{y} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} s_i \right)^2}}{y} \quad (\text{F.2})$$

F.3 Comparison of uncertainties for different loss determination methods

With lower losses, the uncertainty of the input output loss determination method increases, because a small number (losses) is calculated by subtraction of two much larger numbers (input and output power). In this case, measurement equipment has to be selected very carefully.

For relative losses below for example 3 %, calculations can achieve the same or even better accuracy than input output measurements.

Calorimetric measurements allow a high accuracy even at low losses. However, the effort for this loss determination method is highest.

Annex G (informative)

Calorimetric measurement for CDM losses

G.1 General

The calorimetric determination method of the power losses is based on the calorimetric measurement of the dissipated power losses. Measurements must be done at thermal equilibrium and the component to be measured has to be thermally isolated to guarantee conduction of the dissipated power losses by the cooling medium (air or water). In the following clauses, three different types of methods are explained.

G.2 Calorimeter with two chambers with air as a cooling medium

With the first method, the loss measurement can be carried out in one-phase measurement procedure. Overview of calorimetric test setup is described in Figure G.1. Setup consists of thermally insulated cabinet with two chambers, chamber one is for CDM to be measured and chamber two for the heating resistor. This method requires CDM to be measured and the heating resistor for the calibration to be in the same airflow, and the flow resistance in all test sections must be equal. Under these conditions, and due to the simultaneity of the measurements, the physical conditions are equal.

From the temperature at the inlet and outlet of the cooling medium to be measured, and between CDM and heating resistor for calibration of its absorbing power loss, the power dissipation can be determined. Power dissipation of measured CDM can be determined by measuring three temperatures and the power of the heating resistor. Heating resistor is supplied by power source with power measurements. All measurements must be done when thermal equilibrium has been achieved.

$$P_{L,CDM,determined} = P_{L,resistor} \frac{\theta_{inside} - \theta_{in}}{\theta_{out} - \theta_{inside}} \quad (G.1)$$

A variance in air speed, air pressure and air temperature as well as ambient temperature might have an effect on accuracy of the results. It is obvious that the mains voltage is not a constant during measurements. Due to that, some variations will happen in CDM losses. This effect is one of the error sources in this method as well as in other measurements where system is supplied from the uncontrolled mains.

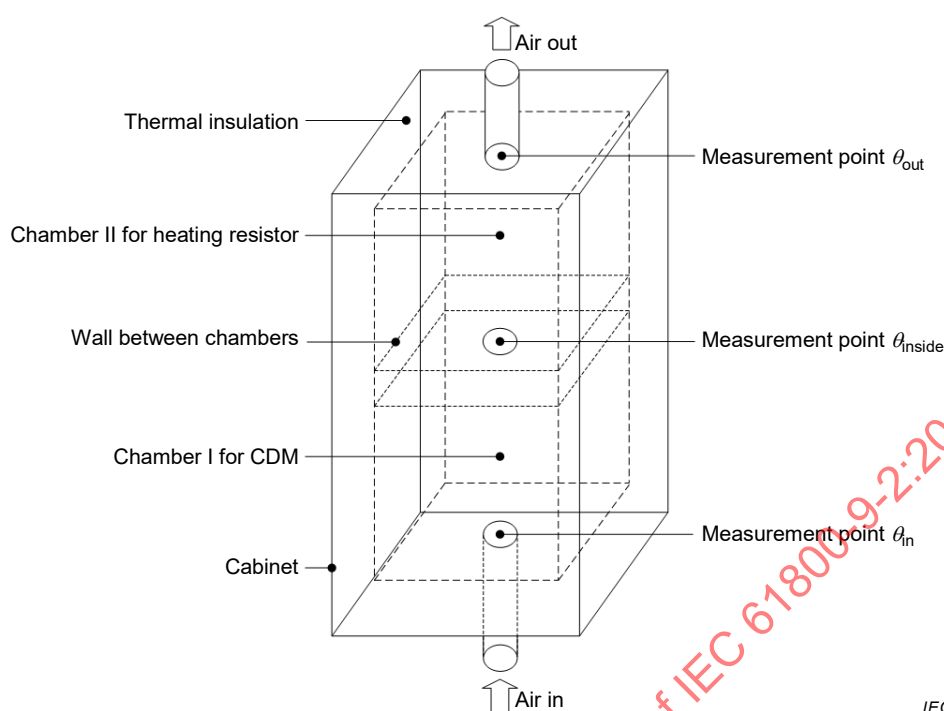


Figure G.1 – One-step calorimetric measurement setup for comparative loss measurement (CDM and heating resistor are loaded simultaneously)

G.3 Calorimeter with one chamber with air as a cooling medium

An alternative calorimetric measurement setup is described in Figure G.2. This setup consists of a thermally insulated cabinet with only one chamber. Both CDM to be measured and the heating resistor for the calibration are located in the same chamber. CDM and resistor are in the same air flow. Two-step setup means that in first step the CDM to be measured is loaded, and the speed of airflow and temperatures are recorded in thermal equilibrium. In second step the recorded speed of airflow is applied and the heating resistor is loaded so that exactly the same thermal equilibrium as in first step can be achieved. Power dissipation of CDM can be determined from the measured power of heating resistor. Next power loss formula assumes that speed of air flow and temperatures in inlet and outlet are exactly the same in both measuring steps.

$$P_{L,CDM,determined} = P_{L,resistor} \quad (G.2)$$

A variance in air speed, air pressure and air temperature as well as ambient temperature might have an effect on accuracy of the results. It is obvious that the mains voltage is not a constant during measurements. Due to that, some variations will happen in CDM losses. This effect is one of the error sources in this method as well as in other measurements where system is supplied from the uncontrolled mains.

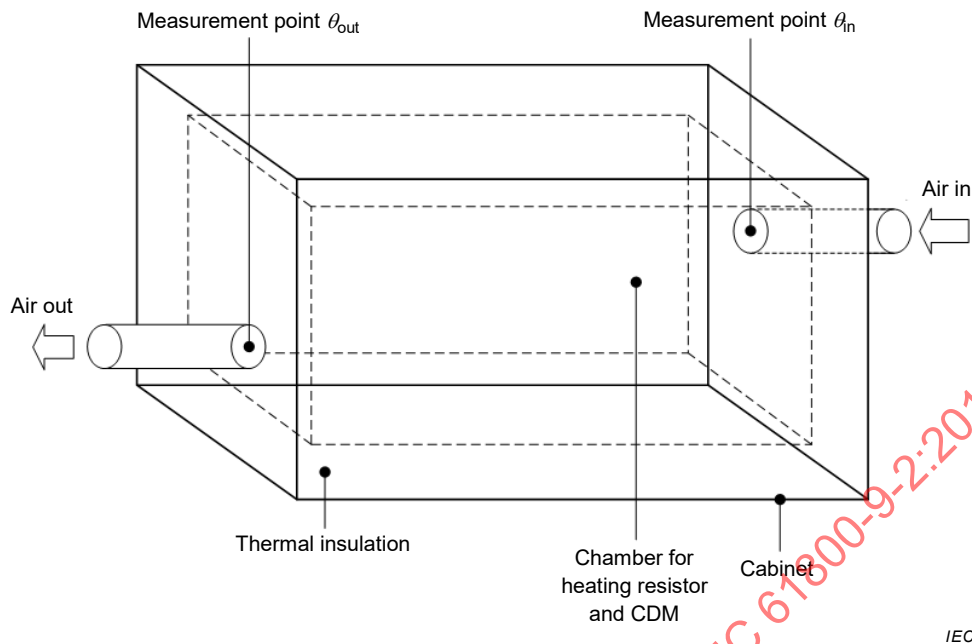


Figure G.2 – Two-step calorimetric measurement setup for comparative loss measurement (CDM and heating resistor are not loaded simultaneously)

G.4 Calorimeter with liquid as a cooling medium

A calorimetric measurement setup with liquid as a cooling medium is described in Figure G.3. This setup consists of a thermally insulated cabinet with one chamber. Inside the chamber there is a cooler which is used to transfer heat power generated by CDM. In the measurement, the CDM to be measured is loaded, and the volumetric flow rate of liquid and temperatures are recorded in thermal equilibrium. Power dissipation of CDM can be determined according to the following formula

$$P_{L,CDM,determined} = Q_{cooler} \cdot \rho_{liquid} \cdot c_{liquid} \cdot (\theta_{out} - \theta_{in}) \quad (G.3)$$

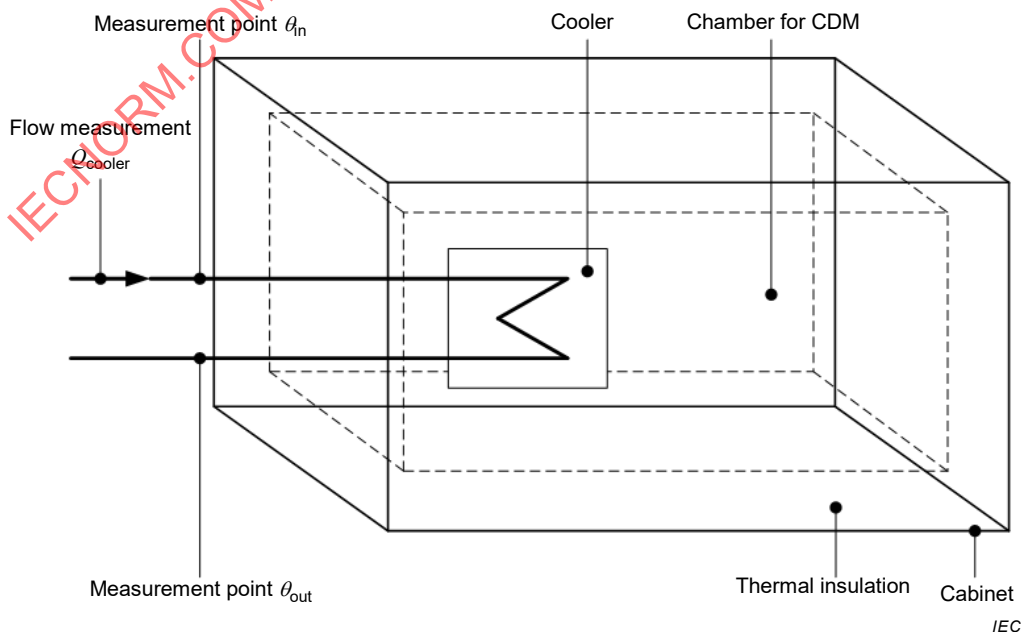


Figure G.3 – Liquid cooled calorimetric measurement setup for CDM loss measurement

Bibliography

IEC 60034 (all parts), *Rotating electrical machines*

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

IEC 60034-30 (all parts), *Rotating electrical machines*

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

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

IEC 60072-1, *Dimensions and output series for rotating electrical machines – Part 1: Frame numbers 56 to 400 and flange numbers 55 to 1080*

IEC 60146-1-1, *Semiconductor converters – General requirements and line commutated converters – Part 1-1: Specification of basic requirements*

IEC 60947-4-2, *Low voltage switchgear and controlgear – Part 4-2: Contactors and motor-starters – AC semiconductor motor controllers and starters*

IEC 61000-3-12, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-12: Limits – Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage systems with input current $>16\text{ A}$ and $\leq 75\text{ A}$ per phase*

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

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

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

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

IEC 61800-9 (all parts), *Adjustable speed electrical power drive systems – Part 9: Ecodesign for power drive systems, motor starters, power electronics and their driven applications*

IEC 61800-9-1, *Adjustable speed electrical power drive systems – Part 9-1: Energy efficiency of power drive systems, motor starters, power electronics and their driven applications – General requirements for setting energy efficiency standards for power drive equipment using the extended product approach (EPA) and semi analytic model (SAM)*

IEEE 112, *Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*

CSA 838-13, *Energy efficiency test methods for three-phase variable frequency drive systems*

EN 50598-2, *Ecodesign for power drive systems, motor starters, power electronics & their driven applications – Part 2: Energy efficiency indicators for power drive systems and motor starters*

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61800-9-2:2017

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61800-9-2:2017

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	114
INTRODUCTION.....	116
1 Domaine d'application	118
2 Références normatives	119
3 Termes, définitions, symboles et termes abrégés	120
3.1 Termes et définitions	120
3.2 Symboles et termes abrégés.....	125
4 PDS de référence (RPDS), CDM de référence (RCDM) et moteur de référence (RM).....	132
4.1 Généralités	132
4.2 Points de fonctionnement de référence du RPDS, du RCDM, du RM et pertes associées.....	133
4.3 Combinaison des pertes du PDS avec l'équipement entraîné – Workflow pour le modèle semi-analytique (SAM).....	136
4.4 Classes IE des moteurs alimentés par réseau.....	139
4.5 Classes IE des moteurs alimentés par convertisseur.....	139
4.6 Classes IE des convertisseurs de fréquence (modules d'entraînement complets, CDM)	139
4.7 Classes IES d'un PDS	140
4.8 Cohérence des classes IE et IES	140
4.9 Détermination de la classe IES d'un PDS à l'aide de dispositifs "de référence" et "d'essai" et de préconisations pour les fabricants.....	142
5 Modèle mathématique du CDM, du moteur et du PDS	143
5.1 Généralités	143
5.2 Pertes de CDM	143
5.2.1 Procédure générale et définition du CDM et de la charge d'essai.....	143
5.2.2 Pertes de l'onduleur de sortie	146
5.2.3 Pertes du convertisseur d'entrée	149
5.2.4 Pertes de la bobine d'arrêt d'entrée	150
5.2.5 Pertes de la liaison à courant continu	151
5.2.6 Pertes des conducteurs de courant.....	152
5.2.7 Pertes de commande et de veille	152
5.2.8 Facteur de perte de refroidissement	152
5.2.9 Autres pertes du CDM	153
5.2.10 Pertes globales du CDM	153
5.3 Pertes du moteur	154
5.3.1 Généralités	154
5.3.2 Pertes supplémentaires dues aux fréquences harmoniques des moteurs asynchrones triphasés alimentés par un CDM	154
5.3.3 Données du moteur de référence (RM)	155
5.4 PDS de référence (RPDS).....	155
5.4.1 Pertes du PDS de référence	155
5.4.2 Pertes du PDS à différentes fréquences de commutation.....	157
5.5 Pertes du PDS pour un fonctionnement en récupération	158
5.6 Pertes des démarreurs de moteurs	159
6 Limites des classes IE et IES.....	159
6.1 Généralités	159

6.2	CDM	160
6.3	Moteur	162
6.4	PDS	162
7	Détermination des pertes	164
7.1	Généralités	164
7.2	Essais de type du CDM pour le classement IE	164
7.3	Essais de type du PDS pour le classement IES	166
7.4	Procédures de détermination des pertes du CDM et du PDS dans un fonctionnement de charge partielle	166
7.5	Calcul des pertes du CDM	166
7.6	Calcul des pertes des PDS	167
7.7	Méthode de mesure d'entrée-sortie	167
7.7.1	Mesurage d'entrée-sortie des pertes du CDM	167
7.7.2	Mesurage d'entrée-sortie des pertes du PDS	168
7.7.3	Exigences relatives aux méthodes de mesure d'entrée-sortie	169
7.8	Mesurage calorimétrique des pertes du CDM	172
7.9	Conditions d'essai pour les essais du CDM	173
7.10	Conditions d'essai pour les essais du PDS	174
7.11	Organigrammes des procédures d'essai	174
8	Exigences relatives à la documentation de l'utilisateur	178
8.1	Généralités	178
8.2	Informations destinées à la sélection	179
8.3	Informations pour la détermination du classement de l'efficacité énergétique	180
8.4	Informations pour la détermination des pertes d'énergie supplémentaires et des conditions de charge partielle	180
8.4.1	Généralités	180
8.4.2	Pertes dans des conditions de charge partielle	180
8.4.3	Pertes des dispositifs auxiliaires et options	180
8.4.4	Pertes en mode de veille	181
8.4.5	Pertes en mode régénérateur	181
Annexe A (normative)	Pertes du RCDM, RM et du RPDS	182
A.1	Tableaux des pertes relatives	182
Annexe B (informative)	Description des éléments d'un produit étendu utilisant un PDS par rapport à leur effet sur les pertes	186
B.1	Généralités	186
B.2	Pertes dans les câbles de réseau et dans l'alimentation	187
B.3	Filtre d'entrée	188
B.3.1	Filtre EMI haute fréquence	188
B.3.2	Filtres anti harmoniques de ligne basse fréquence	188
B.4	Convertisseur d'entrée	189
B.4.1	Généralités	189
B.4.2	Redresseur à diodes	189
B.4.3	Convertisseur à alimentation active	190
B.4.4	Facteur de puissance du convertisseur d'entrée	191
B.5	Liaison à courant continu	192
B.6	Onduleur de sortie	194
B.7	Filtre de sortie et câbles de moteur	196
B.7.1	Généralités	196

B.7.2	Filtres à onde sinusoïdale	196
B.7.3	Filtres dI/dt et bobines d'arrêt de moteur	197
B.7.4	Filtres de moteur EMI haute fréquence	198
B.7.5	Câbles de moteur	198
B.8	Moteur	198
B.9	Charge mécanique	198
B.10	Pertes de commande et de veille	198
B.11	Pertes de refroidissement	199
B.11.1	Pertes de refroidissement principal	199
B.11.2	Pertes de refroidissement secondaire	199
Annexe C (informative) Topologie de convertisseur		200
C.1	Généralités	200
C.2	Topologies d'onduleurs de sortie de source de tension, différentes de celles décrites mathématiquement en 5.2.2.....	200
C.3	Topologies de convertisseurs d'entrée de source de tension, différentes de celles décrites mathématiquement en 5.2.3.....	200
C.4	Topologies de CDM autres que le type source de tension	201
Annexe D (informative) Modèle de moteur et interpolation des pertes		202
D.1	Aperçu	202
D.2	Pertes des moteurs à courant alternatif.....	202
D.2.1	Généralités	202
D.2.2	Pertes I^2R dans l'enroulement du stator et du rotor ($P_{LS} + P_{LR}$ (pour les moteurs à induction ou à rotor bobiné))	202
D.2.3	Pertes supplémentaires (P_{LL})	202
D.2.4	Pertes dans le fer (P_{Lfe})	203
D.2.5	Pertes par frottement et par ventilation (P_{Lfw})	203
D.2.6	Pertes supplémentaires dues aux fréquences harmoniques (P_{LHL})	204
D.3	Formule d'interpolation	204
D.4	Détermination analytique des coefficients d'interpolation	205
D.4.1	Généralités	205
D.4.2	Pertes supplémentaires dues à la chute de tension du convertisseur de fréquence	207
D.4.3	Autres points de fonctionnement permettant de déterminer les coefficients d'interpolation	207
D.4.4	Moteurs pour les applications à couple quadratique.....	208
D.5	Détermination de l'erreur d'interpolation.....	209
D.6	Détermination numérique des coefficients d'interpolation	209
D.7	Efficacité des moteurs à induction IE2 typiques	209
Annexe E (informative) Exemple d'application pour le calcul des pertes d'un CDM et d'un PDS		212
E.1	Généralités	212
E.2	Détermination des pertes du CDM	212
E.2.1	Généralités	212
E.2.2	Détermination des pertes d'après les pertes maximales aux points de perte voisins	213
E.2.3	Détermination des pertes par interpolation bidimensionnelle des pertes aux points de perte voisins	213
E.2.4	Détermination des pertes à l'aide du modèle mathématique décrit en 5.2.....	216
E.3	Détermination des pertes du moteur	218

E.4	Détermination des pertes du PDS	219
Annexe F (informative)	Incertitude de la méthode de détermination des pertes	220
F.1	Généralités	220
F.2	Calcul de l'incertitude dans des erreurs aléatoires	220
F.3	Comparaison des incertitudes pour différentes méthodes de détermination des pertes	220
Annexe G (informative)	Mesurage calorimétrique pour les pertes du CDM	221
G.1	Généralités	221
G.2	Calorimètre avec deux chambres avec de l'air comme milieu de refroidissement	221
G.3	Calorimètre avec une chambre avec de l'air comme milieu de refroidissement	222
G.4	Calorimètre avec du liquide comme milieu de refroidissement	223
Bibliographie		225
Figure 1	– Représentation des exigences de base relatives dans la normalisation de l'efficacité énergétique	116
Figure 2	– Représentation du produit étendu intégrant un système moteur	122
Figure 3	– Caractéristique couple-vitesse du PDS à servomoteur	124
Figure 4	– Représentation des points de fonctionnement (vitesse de l'arbre, couple) pour la détermination des pertes relatives de l'entraînement électrique de puissance (RPDS)	134
Figure 5	– Représentation des points de fonctionnement (vitesse de l'arbre, couple) pour la détermination des pertes relatives du moteur de référence (RM)	135
Figure 6	– Représentation des points de fonctionnement (fréquence relative du stator du moteur, courant relatif produisant le couple) pour la détermination des pertes du module d'entraînement complet de référence (RCDM)	135
Figure 7	– Représentation du workflow pour la détermination de l'indice d'efficacité énergétique (EEI) d'un produit étendu	137
Figure 8	– Représentation de la façon de combiner différentes sources de données pour la détermination de l'indice d'efficacité énergétique (EEI) d'un produit étendu	139
Figure 9	– Relation métrique des classes IE et IES	141
Figure 10	– Préconisations destinées aux fabricants de CDM et de moteurs concernant l'utilisation des dispositifs "d'essai" et "de référence" pour la détermination des classes IE/IES	143
Figure 11	– Représentation du CDM et de la charge d'essai	144
Figure 12	– Pertes relatives $p_{L,CDM}$ du RCDM de 9,95 kVA	153
Figure 13	– Exemple de pertes relatives de puissance d'un PDS en fonction de la vitesse et du couple	157
Figure 14	– Exemple de pertes relatives de puissance par rapport à la fréquence de commutation	158
Figure 15	– Exemple de CDM comportant une résistance pour dissiper la puissance produite	159
Figure 16	– Représentation des classes IE pour un CDM	162
Figure 17	– Représentation des classes IES d'un PDS	163
Figure 18	– Pertes du CDM correspondant à la somme des pertes déterminées et de l'incertitude de la méthode de détermination	165

Figure 19 – Installation de mesure d'entrée-sortie pour la détermination des pertes du CDM	168
Figure 20 – Installation de mesure d'entrée-sortie des pertes du PDS.....	169
Figure 21 – Ordre des mesurages du CDM de [1] à [8]	170
Figure 22 – Ordre des mesurages du PDS de [1] à [8]	171
Figure 23 – Installation de mesure calorimétrique pour la détermination des pertes du CDM	173
Figure 24 – Détermination du classement IE pour le CDM et détermination des pertes aux points de fonctionnement de charge partielle.....	176
Figure 25 – Détermination du classement IES pour le PDS et détermination des pertes aux points de fonctionnement de charge partielle.....	178
Figure B.1 – Vue d'ensemble du produit étendu et du flux d'énergie	186
Figure B.2 – Circuit équivalent du réseau et des câbles de réseau.....	187
Figure B.3 – Représentation d'un filtre anti harmoniques de ligne monophasée	188
Figure B.4 – PDS dont le convertisseur d'entrée est un redresseur à diodes.....	189
Figure B.5 – PDS dont le convertisseur d'entrée est un AIC normalisé.....	190
Figure B.6 – PDS à convertisseur d'entrée F3E-AIC sans bobine d'arrêt de ligne.....	191
Figure B.7 – Forme d'onde typique d'un courant de ligne de redresseur à diodes	192
Figure B.8 – Circuit à liaison à courant continu	193
Figure B.9 – Circuit à liaison à courant continu comportant des bobines d'arrêt à courant continu supplémentaires.....	194
Figure B.10 – Onduleur de sortie du PDS	195
Figure B.11 – Câble de moteur et filtre de sortie optionnel du PDS	196
Figure B.12 – Forme d'onde typique de la tension de sortie de l'onduleur et de la tension du moteur lors de l'utilisation d'un filtre de sortie à onde sinusoïdale	197
Figure D.1 – Points de fonctionnement normatifs	206
Figure E.1 – Segments des points de fonctionnement.....	212
Figure E.2 – Interpolation bidimensionnelle.....	214
Figure G.1 – Installation de mesure calorimétrique en une étape pour le mesurage comparatif des pertes (CDM et résistance chauffante chargés simultanément)	222
Figure G.2 – Installation de mesure calorimétrique en deux étapes pour le mesurage comparatif des pertes (CDM et résistance chauffante non chargés simultanément).....	223
Figure G.3 – Installation de mesure calorimétrique refroidie par liquide pour le mesurage des pertes du CDM.....	224
Tableau 1 – Courants minimums de charge d'essai à différents points de fonctionnement	145
Tableau 2 – Facteur de déplacement de la charge d'essai entre le courant fondamental de sortie et la tension fondamentale de sortie à différents points de fonctionnement.....	145
Tableau 3 – Paramètres de référence de la Formule (5)	147
Tableau 4 – Variables de la Formule (5)	147
Tableau 5 – Paramètres de référence de la Formule (6)	147
Tableau 6 – Paramètres de référence de la Formule (7)	148
Tableau 7 – Paramètres de référence de la Formule (8)	149
Tableau 8 – Paramètres de référence de la Formule (10).....	150
Tableau 9 – Variables de la Formule (10)	150

Tableau 10 – Paramètres de référence de la Formule (11):.....	151
Tableau 11 – Paramètres de référence de la Formule (12).....	151
Tableau 12 – Paramètres de référence de la Formule (13).....	152
Tableau 13 – Paramètre de référence de la Formule (15)	152
Tableau 14 – Paramètre de référence de la Formule (14)	152
Tableau 15 – Pertes relatives du CDM de référence de 400 V/9,95 kVA aux points de fonctionnement décrits à la Figure 6	154
Tableau 16 – Paramètre de référence de la Formule (19)	156
Tableau 17 – Pertes relatives du RPDS 400 V/7,5 kW	156
Tableau 18 – Pertes du CDM de référence pour la définition de la classe IE1	160
Tableau 19 – Pertes du PDS de référence pour la définition de la classe IES 1	163
Tableau 20 – Exigences relatives aux informations	179
Tableau A.1 – Pertes relatives (%) des CDM de référence à des puissances assignées différentes aux points de fonctionnement décrits à la Figure 6	182
Tableau A.2 – Pertes relatives (%) des moteurs de référence à des puissances assignées différentes aux points de fonctionnement décrits à la Figure 5	183
Tableau A.3 – Pertes relatives (%) d'un PDS de référence à des puissances assignées différentes aux points de fonctionnement décrits à la Figure 4	184
Tableau B.1 – Valeurs typiques de λ pour différentes topologies de convertisseurs d'entrée	192
Tableau D.1 – Répartition recommandée des pertes par frottement et par ventilation pour les moteurs autoventilés IC 411	204
Tableau D.2 – Points de fonctionnement normatifs avec représentation graphique	206
Tableau D.3 – Autres points de fonctionnement non normatifs	208
Tableau D.4 – Coefficients d'interpolation des machines typiques à induction IE2 de référence et à quatre pôles	210
Tableau D.5 – Coefficients d'interpolation des machines typiques à induction IE2 de référence et à quatre pôles	211
Tableau E.1 – Pertes relatives d'un exemple de CDM de 400 V/9,95 kVA aux points de fonctionnement prédéfinis	213
Tableau E.2 – Paramètres de l'exemple de CDM	217
Tableau E.3 – Résultats du calcul pour le CDM d'après le modèle mathématique	218
Tableau E.4 – Comparaison des différentes méthodes d'évaluation des pertes	218
Tableau E.5 – Données de perte pour le moteur de référence de 7,5 kW	218

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

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

AVANT-PROPOS

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

La Norme internationale IEC 61800-9-1 a été établie par le sous-comité 22G: Systèmes d'entraînement électrique à vitesse variable comprenant des convertisseurs à semiconducteurs, du comité d'études 22 de l'IEC: Systèmes et équipements électroniques de puissance.

Le texte de ce document est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
22G/349/FDIS	22G/352/RVD

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

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

Une liste de toutes les parties de la série IEC 61800, publiées sous le titre général *Entraînements électriques de puissance à vitesse variable*, peut être consultée sur le site web de l'IEC.

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

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

IMPORTANT – Le logo "*colour inside*" qui se trouve sur la page de couverture de cette publication indique qu'elle contient des couleurs qui sont considérées comme utiles à une bonne compréhension de son contenu. Les utilisateurs devraient, par conséquent, imprimer cette publication en utilisant une imprimante couleur.

INTRODUCTION

La présente partie de l'IEC 61800 a été élaborée pour pouvoir évaluer les pertes de puissance des CDM (modules d'entraînement complets) et des PDS (entraînements électriques de puissance).

Les exigences relatives au mesurage de l'efficacité énergétique des moteurs à alimentation non sinusoïdale relèvent de la responsabilité du CE 2 de l'IEC et seront publiées dans la série IEC 60034.

Le sous-comité 22G de l'IEC comprend le groupe d'étude de normalisation chargé du présent sujet. Il a établi une étroite collaboration avec plusieurs autres comités d'études (par exemple, le CE 2 et le SC 121A de l'IEC).

Le sous-comité 22G de l'IEC demeure responsable de tous les aspects pertinents relevant des exigences sur l'efficacité énergétique et l'écoconception pour l'électronique de puissance, l'appareillage de connexion, l'appareillage de commande et les entraînements électriques de puissance, ainsi que leurs applications industrielles.

Les exigences de base relatives à la normalisation de l'efficacité énergétique sont représentées à la Figure 1. Il a été convenu de fournir une solution raisonnable qui présente le meilleur compromis.

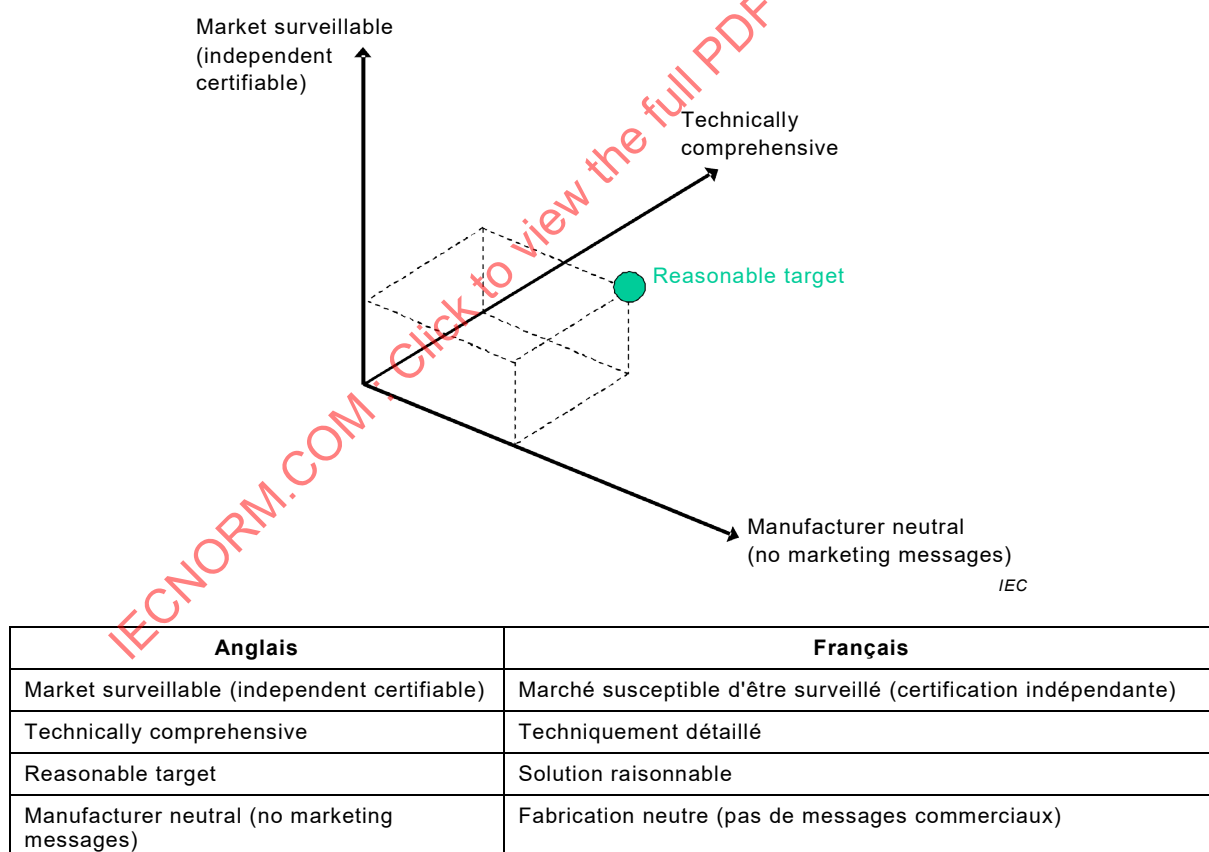


Figure 1 – Représentation des exigences de base relatives dans la normalisation de l'efficacité énergétique

L'IEC 61800 (toutes les parties) ne traite pas des composants techniques mécaniques.

NOTE Les moteurs à réducteur (moteurs avec boîtes à engrenages directement adaptées) sont traités comme des entraînements électriques de puissance (convertisseur et moteur). Voir l'IEC 60034-30-1 pour le classement des pertes d'un moteur à réducteur. Les classes d'efficacité des boîtes à engrenages en tant que composants individuels sont à l'étude.

L'IEC 61800-9-2 est une sous-partie de la série IEC 61800, dont la structure est la suivante:

- *Partie 1: Exigences générales – Spécifications de dimensionnement pour systèmes d'entraînement de puissance à vitesse variable en courant continu et basse tension*
- *Partie 2: Exigences générales – Spécifications de dimensionnement pour systèmes d'entraînement de puissance à vitesse variable en courant alternatif et basse tension*
- *Partie 3: Exigences de CEM et méthodes d'essais spécifiques*
- *Partie 4: Exigences générales – Spécifications de dimensionnement pour systèmes d'entraînements de puissance en courant alternatif de tension supérieure à 1 000 V alternatif et ne dépassant pas 35 kV*
- *Partie 5: Exigences de sécurité*
- *Partie 6: Guide de détermination du type de régime de charge et de dimensionnement en courant correspondant*
- *Partie 7: Interface générique et utilisation de profils pour les entraînements électriques de puissance*
- *Partie 8: Specification of voltage on the power interface* (disponible en anglais seulement)
- *Partie 9: Écoconception des entraînements électriques de puissance, des démarreurs de moteurs, de l'électronique de puissance et de leurs applications entraînées*

Chaque partie est subdivisée en plusieurs sous-parties, publiées en tant que Normes internationales, Spécifications techniques ou Rapports techniques. Certaines d'entre elles ont déjà été publiées. D'autres seront publiées avec leur numéro de partie suivi d'un tiret et d'un deuxième numéro afin d'identifier la subdivision (par exemple: IEC 61800-9-2).

La présente partie prend en considération les exigences de base de la norme CENELEC EN 50598-2 parue le 19-12-2014 et prend également en considération les points clés suivants en collaboration avec les comités d'études compétents.

Elle a été élaborée en étroite collaboration avec d'autres comités d'études (CE 2 et SC 121A de l'IEC) et avec un comité partenaire CEN/TC 197 du côté clients afin de fournir une norme détaillée pour les exigences relatives à l'efficacité énergétique et l'écoconception.

Points clés:

- Exigences relatives à une conception écoénergétique des systèmes d'entraînement électrique conformément à la charge entraînée
- Exigences et classement IE des modules d'entraînement complets (CDM)
- Exigences et classement IES des entraînements électriques de puissance (PDS)
- Détermination des pertes du PDS et exigences pour la liaison à l'équipement entraîné afin de déterminer le classement/l'évaluation en termes d'efficacité énergétique du produit étendu
- Exigences relatives à une conception système respectueuse de l'environnement et la déclaration environnementale d'un système moteur

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

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 61800 spécifie les indicateurs d'efficacité énergétique pour l'électronique de puissance (modules d'entraînement complets, CDM), les entraînements électriques de puissance (PDS) et les démarreurs de moteurs, utilisés avec les équipements entraînés par moteur.

Elle spécifie la méthodologie de détermination des pertes du module d'entraînement complet (CDM), de l'entraînement électrique de puissance (PDS) et du système moteur.

Elle définit les classes IE et IES et établit leurs valeurs limites, ainsi que les procédures d'essai pour le classement des pertes globales du système moteur.

Le présent document propose également une méthodologie pour la mise en œuvre de la meilleure solution écoénergétique des entraînements électriques. Cela dépend de l'architecture du système entraîné par moteur, du profil vitesse/charge et des points de fonctionnement dans le temps de l'équipement entraîné.

La méthodologie de l'approche produit étendu et les modèles semi-analytiques sont définis dans l'IEC 61800-9-1.

La structure du présent document est la suivante:

- définition et classement des pertes d'un PDS de référence (RPDS) normalisé et d'un CDM de référence (RCDM) normalisé, ainsi que du modèle mathématique de calcul;
- définition du moteur de référence (RM) et du CDM de référence (RCDM) qui peuvent être utilisés pour déterminer la classe d'efficacité d'un système moteur lorsque l'un de ses composants est inconnu;
- définition et comparaison des exigences relatives à la détermination des pertes d'un PDS réel et d'un CDM réel, avec le RPDS et le RCDM de référence;
- définition des exigences pour les essais de type et la documentation de l'utilisateur;
- mise en annexe de quelques exemples de cas de pertes dans un système global;
- mise en annexe des informations relatives aux topologies de systèmes et d'entraînements.

Des données spécifiques sur les pertes de puissance des classes RCDM, RM, RPDS et IE/IES sont fournies pour les entraînements électriques de puissance alternative/alternative à axe unique et basse tension (de 100 V à 1 000 V inclus) avec des moteurs triphasés. Les moteurs à réducteur sont traités comme des moteurs normalisés lorsque moteur et boîte à engrenages peuvent être séparés.

Toutes les données de référence fournies sont dérivées de PDS équipés de moteurs à induction. Elles peuvent toutefois être utilisées pour tous les types de PDS également avec d'autres types de moteurs.

L'application du présent document aux équipements suivants peut être possible d'un point de vue technique, mais n'est pas obligatoire:

- CDM et PDS à haute tension avec une tension assignée supérieure à 1 000 V en courant alternatif;
- CDM et PDS à basse tension avec une tension assignée inférieure à 100 V en courant alternatif;
- PDS à puissance élevée supérieure à une puissance assignée de 1 000 kW;
- CDM à puissance élevée supérieure à une puissance de sortie apparente assignée de 1 209 kVA;
- PDS à puissance faible inférieure à une puissance assignée de 0,12 kW;
- CDM à puissance faible inférieure à une puissance assignée de 0,278 kVA;
- CDM autres que ceux qui convertissent la puissance alternative électrique en une puissance de sortie alternative unique;
- PDS autres que ceux qui convertissent la puissance alternative électrique en un arbre tournant mécanique unique;
- PDS et CDM capables de retransformer l'énergie en alimentation en courant alternatif,
- PDS et CDM dont le courant d'entrée comporte un courant harmonique total (THC) (selon la définition donnée dans l'IEC 61000-3-12) inférieur à 10 %;
- PDS avec moteur à réducteur dont le moteur et la boîte à engrenages ne peuvent pas être séparés, en raison, par exemple, d'un carter commun;
- PDS à servomoteur (composé d'un convertisseur de fréquence, d'un moteur et d'un capteur de réaction de mise en position);
- PDS non commercialisés en tant que produit unique.

NOTE L'IEC 61800-9 (toutes les parties) n'aborde pas le classement de l'efficacité énergétique de l'équipement entraîné, mais fournit des entrées pour l'évaluation selon l'approche produit étendu.

2 Références normatives

Les documents ci-après, dans leur intégralité ou non, sont des références normatives indispensables à l'application 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 60038:2009, *Tensions normales de la CEI*

IEC 60050-161, *Vocabulaire Électrotechnique International – Partie 161: Compatibilité électromagnétique*

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

IEC 60034-2-1:2014, *Machines électriques tournantes – Partie 2-1: Méthodes normalisées pour la détermination des pertes et du rendement à partir d'essais (à l'exclusion des machines pour véhicules de traction)*

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

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

IEC 60947-4-1, *Appareillage à basse tension – Partie 4-1: Contacteurs et démarreurs de moteurs – Contacteurs et démarreurs électromécaniques*

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

IEC TS 62578, *Systèmes et équipements électroniques de puissance – Conditions de fonctionnement et caractéristiques des convertisseurs à alimentation active (AIC), y compris les recommandations de conception pour leurs valeurs d'émission inférieures à 150 kHz*

3 Termes, définitions, symboles et termes abrégés

3.1 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions donnés dans l'IEC 60050-161, ainsi que les suivants s'appliquent.

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

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

3.1.1

convertisseur à alimentation active

AIC

convertisseurs de puissance électronique autocommutés de toutes les technologies, topologies, tensions et dimensions, raccordés entre le réseau (les phases) d'alimentation en courant alternatif et, en général, une source côté courant continu (source de courant ou de tension) et pouvant convertir la puissance électrique dans les deux sens (génératrice et régénératrice) et commander la puissance réactive ou le facteur de puissance

Note 1 à l'article: Voir IEC TS 62578.

Note 2 à l'article: Dans le VEl, ces termes (VSC et CSC) sont définis comme un convertisseur alternatif/continu imposant la tension [551-12-03] et un convertisseur alternatif/continu imposant le courant [551-12-04]. La plupart des AIC sont des convertisseurs bidirectionnels et comportent des sources du côté courant continu. Ils sont par conséquent appelés convertisseurs de source de tension et convertisseurs de source de courant.

Note 3 à l'article: L'abréviation "AIC" est dérivée du terme anglais développé correspondant "active infeed converter".

3.1.2

AEDM

autre méthode de détermination de l'efficacité

modèle analytique utilisé par les constructeurs de moteurs pour calculer les pertes qui peuvent être utilisées pour déterminer l'indice d'efficacité énergétique d'un produit étendu

Note 1 à l'article: L'abréviation "AEDM" est dérivée du terme anglais développé correspondant "Alternate Efficiency Determination Method".

3.1.3**CDM****module d'entraînement complet**

entraînement

dispositif de commande d'entraînement

module d'entraînement comprenant un convertisseur électronique de puissance connecté entre l'alimentation électrique et un moteur, et des composants associés tels que des dispositifs de protection, des transformateurs et des dispositifs auxiliaires

Note 1 à l'article: Ce terme désigne le convertisseur de fréquence alternatif/alternatif qui alimente le moteur. Certains pays utilisent le terme «entraînement» à la place de CDM.

Note 2 à l'article: L'abréviation "CDM" est dérivée du terme anglais développé correspondant "complete drive module".

3.1.4**facteur de crête**

rapport de la valeur absolue de crête à la valeur efficace de la forme d'onde

3.1.5**équipement entraîné**

équipement relié mécaniquement à l'arbre d'un moteur

3.1.6**EEl**

valeur qui représente l'efficacité énergétique d'une application, résultant de l'approche produit étendu (EPA)

Note 1 à l'article: Si le produit étendu est un système de pompe, l'EEl est le rapport de l'énergie demandée (réelle et pertes) à l'énergie théorique exigée pour l'application.

Note 2 à l'article: L'abréviation "EEl" est dérivée du terme anglais développé correspondant "Energy Efficiency Index".

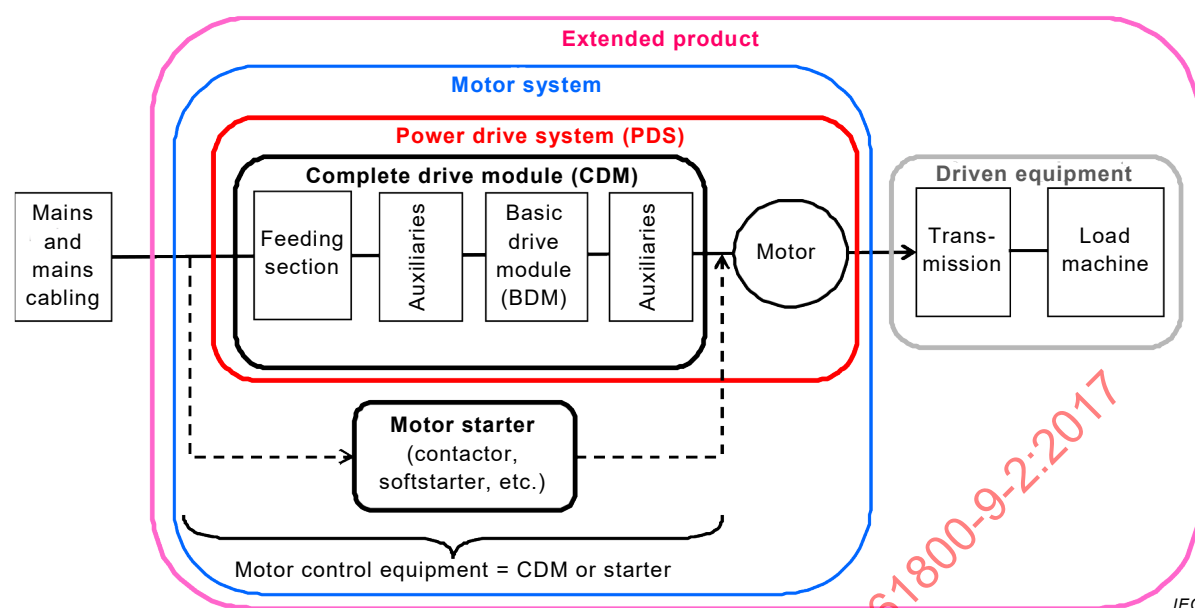
Note 3 à l'article: L'abréviation "EPA" est dérivée du terme anglais développé correspondant "Extended Product Approach".

3.1.7**produit étendu****EP**

équipement entraîné avec son système moteur intégré (par exemple: un PDS)

Note 1 à l'article: Voir Figure 2.

Note 2 à l'article: L'abréviation "EP" est dérivée du terme anglais développé correspondant "extended product".



Anglais	Français
Extended Product	Produit étendu
Motor System	Système moteur
Power Drive System (PDS)	Entraînement électrique de puissance (PDS)
Complete Drive Module (CDM)	Module d'entraînement complet (CDM)
Mains & mains cabling	Réseau et câble de réseau
Feeding section	Section d'alimentation
Auxiliaries	Auxiliaires
Basic Drive Module (BDM)	Module d'entraînement principal (BDM)
Motor	Moteur
Driven Equipment	Équipement entraîné
Transmission	Transmission
Load Machine	Machine de charge
Motor Starter contactor, softstarter, etc.	Contacteur du démarreur de moteur, démarreur à variation de fréquence, etc.)
Motor Control equipment = CDM or Starter	Équipement de commande du moteur = CDM ou démarreur

Figure 2 – Représentation du produit étendu intégrant un système moteur

3.1.8

classe IE

classement des composants d'un système moteur en fonction de l'efficacité (3.1.10)

Note 1 à l'article: IE est l'abréviation anglaise de "efficacité internationale".

Note 2 à l'article: L'abréviation "IE" est dérivée du terme anglais développé correspondant "International Efficiency".

3.1.9**classe IES**

classement d'un système moteur (par exemple, PDS ou moteur entraîné à réducteur) en fonction de l'efficacité

Note 1 à l'article: IES est l'abréviation anglaise de "efficacité internationale des systèmes".

Note 2 à l'article: L'abréviation "IES" est dérivée du terme anglais développé correspondant "International Efficiency of Systems".

3.1.10**système moteur**

entraînement électrique de puissance (PDS) ou moteur raccordé au réseau par un démarreur de moteur conformément à l'IEC 60947-4-1

3.1.11**PDS****entraînement électrique de puissance**

système constitué d'un CDM et d'un moteur

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

3.1.12**modèle d'impulsions**

modèle de la tension entre phases ou du courant de phase commuté(e), aux bornes de sortie non filtrée du convertisseur, en fonction des schémas de fréquence et de modulation d'impulsion

3.1.13**module d'entraînement complet de référence****RCDM**

module d'entraînement complet défini par des équations mathématiques et/ou des pertes de puissance

Note 1 à l'article: Il est utilisé comme base de détermination de la classe IE d'un CDM individuel.

Note 2 à l'article: L'abréviation "RCDM" est dérivée du terme anglais développé correspondant "reference complete drive module".

3.1.14**moteur de référence****RM**

moteur défini par des équations mathématiques et/ou des pertes de puissance

Note 1 à l'article: Il est utilisé comme base de comparaison d'autres moteurs.

Note 2 à l'article: L'abréviation "RM" est dérivée du terme anglais développé correspondant "reference motor".

3.1.15**entraînement électrique de puissance de référence****RPDS**

combinaison du moteur de référence et du PDS de référence

Note 1 à l'article: L'abréviation «RPDS» est dérivée du terme anglais développé correspondant «reference power drive system».

3.1.16

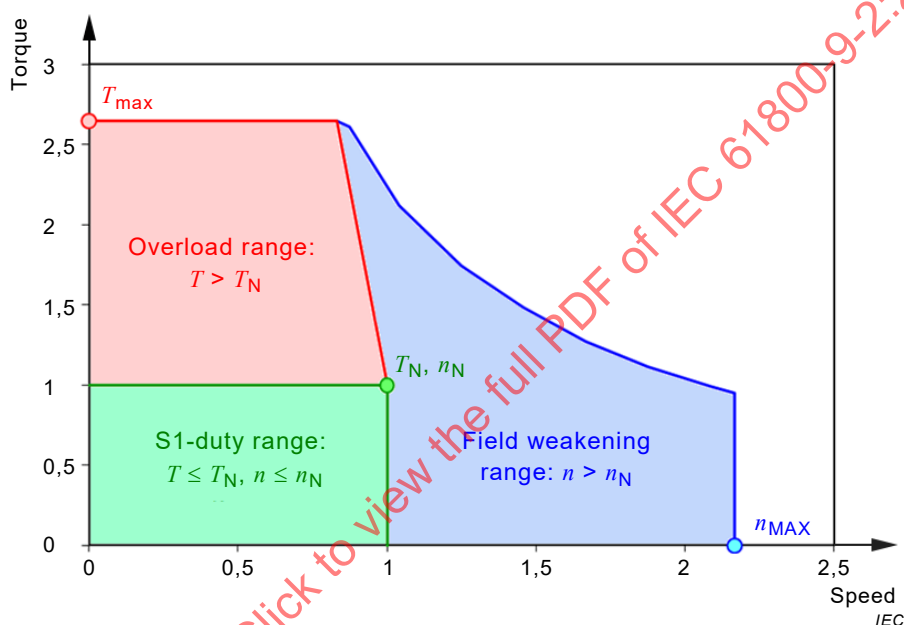
PDS à servomoteur

entraînement électrique commandé à une boucle fermée pour une commande précise et dynamique de la position angulaire ou linéaire, de la vitesse et de l'accélération du servomécanisme entraîné, dans des applications typiques telles que les machines CNC, la fabrication automatisée ou la robotique

Note 1 à l'article: Voir Figure 3.

Note 2 à l'article: Il est composé d'un convertisseur de fréquence, d'un moteur et d'un capteur de réaction de mise en position.

Note 3 à l'article: Ces applications asservies sont caractérisées par des charges et vitesses non périodiquement (type de service S9) ou périodiquement variables dans la plage admissible de fonctionnement à 4 quadrants ($\pm T_{MAX}$, $\pm n_{MAX}$), ainsi que par un fonctionnement fréquemment en surcharge ($T > T_N$) et/ou une plage d'affaiblissement du champ ($n > n_N$) du moteur (voir schéma ci-dessous).



Anglais	Français
Torque-speed-characteristic of servo PDS	Caractéristique couple-vitesse du PDS à servomoteur
Torque	Couple
Speed	Vitesse
Overload range	Plage de surcharge
S1-duty range	Plage de service S1
Field weakening range	Plage d'affaiblissement du champ

Figure 3 – Caractéristique couple-vitesse du PDS à servomoteur

3.1.17

axe unique

arbre mécanique unique de sortie d'un moteur individuel

Note 1 à l'article: S'applique aux CDM pour alimenter un moteur ou des PDS qui ne comprennent qu'un seul moteur.

3.1.18

charge d'essai

dispositif électrique qui détermine le courant de sortie I_{out} et le facteur fondamental de déplacement de sortie $\cos \phi$ d'un CDM à des fins d'essai ou de calcul

Note 1 à l'article: La charge d'essai peut être un moteur d'essai ou un type de charge différent.

3.1.19**courant de charge d'essai**

courant apparent total appliqué à la charge d'essai afin de générer un certain couple (voir Tableau 1)

3.1.20**courant produisant le couple**

partie du courant de charge d'essai (voir 3.1.19) qui produit un certain couple (voir Figure 6, Tableau 1)

Note 1 à l'article: Pour un moteur asynchrone, le courant produisant le couple est le courant du rotor.

3.2 Symboles et termes abrégés**3.2.1** c_{liquid}

capacité thermique massique du liquide

3.2.2 E_D

énergie de perte de commutation, par volt et par ampère, d'une diode de puissance

3.2.3 E_T

énergie de perte de commutation, par volt et par ampère, d'un transistor de puissance

3.2.4 f_{sw}

nombre de commutations d'un semiconducteur en une seconde

Note 1 à l'article: Il détermine avec le modèle d'impulsions sélectionné et la topologie du convertisseur, la fréquence minimale des harmoniques non contrôlables ou interharmoniques sur le point de couplage interne (PCI) ou sur le moteur,

Note 2 à l'article: La mise en marche et la mise à l'arrêt du commutateur d'un semiconducteur sont des actions de commutation séparées. La fréquence de commutation d'un convertisseur à deux niveaux est donc égale à deux fois la fréquence d'impulsion (également dénommée fréquence porteuse) de la tension entre phases pour une modulation qui utilise la commutation en continu, et d'environ 1,33 fois la fréquence d'impulsion de la tension entre phases pour une modulation qui utilise la commutation discontinue.

3.2.5 $I_{\text{motor cable}}$

courant dans le câble de moteur d'un accès de puissance (voir IEC 61800-2) du PDS utilisé pour calculer les pertes de commutation

Note 1 à l'article: Il représente généralement un courant de fuite capacitif, qui est normalement destiné aux câbles blindés du moteur.

3.2.6 $I_{1,r \text{ CDM}}$

composante fondamentale de la forme d'onde du courant d'entrée assigné du CDM ou du PDS

3.2.7 I_r

courant d'entrée assigné du CDM ou du PDS

3.2.8 I_{out}

courant de sortie

3.2.9

$I_{r,out}$

courant de sortie assigné du CDM

3.2.10

I_{rM}

courant assigné du moteur

3.2.11

kI_{DC_link}

paramètre de perte de liaison à courant continu indépendant de la charge ($\frac{1}{\Omega \cdot A}$)

3.2.12

kI_{choke}

impédance de la bobine d'arrêt, relative à l'impédance assignée du CDM

3.2.13

$k^2_{DC_link}$

paramètre de perte de liaison à courant continu dépendant de la charge ($\Omega \cdot A$)

3.2.14

k^2_{choke}

chute de tension relative sur la partie résistive de la bobine d'arrêt

3.2.15

K_{fe}

pertes dans le fer supplémentaires/réparties dans un moteur

3.2.16

K_{fw}

pertes par frottement et par ventilation supplémentaires/réparties dans un moteur

3.2.17

K_{LL}

répartition des pertes de charge

3.2.18

k_{VD}

rapport de la tension assignée du moteur sur la tension de sortie maximale du CDM

3.2.19

$P_{L,cooling}$

pertes de puissance dues à l'équipement de refroidissement d'un CDM (par exemple, pertes du ventilateur) par rapport aux pertes du BDM (voir l'IEC 61800-2) s'il est nécessaire de refroidir le CDM séparément

3.2.20

m

indice de modulation, relation de la fréquence de sortie du CDM à la fréquence nominale du stator du moteur

3.2.21

n_i

vitesse [r/min] au point de charge i

3.2.22 n_r

vitesse assignée [rpm]

3.2.23 P_i puissance consommée [kW] au point de charge i **3.2.24** $P_{in,CDM}$

puissance d'entrée du CDM obtenue en mesurant les pertes de puissance

3.2.25 $P_{in,PDS}$

puissance d'entrée du PDS obtenue en mesurant les pertes de puissance

3.2.26 P_{Lfe}

pertes dans le fer d'un moteur

Note 1 à l'article: Voir également l'IEC 60034-2-1.

3.2.27 P_{Lfw}

pertes par frottement et par ventilation d'un moteur

Note 1 à l'article: Voir également l'IEC 60034-2-1.

3.2.28 P_{LHL}

pertes d'harmonique supplémentaires d'un moteur causées par une alimentation non sinusoïdale

Note 1 à l'article: Voir également l'IEC 60034-2-3.

3.2.29 P_{LL}

pertes de charge supplémentaires d'un moteur

Note 1 à l'article: Voir également l'IEC 60034-2-1.

3.2.30 $p_{L RM}$

pertes relatives du moteur de référence

3.2.31 $P_{L RM}$

pertes du moteur de référence

3.2.32 P_{LR}

pertes du rotor d'un moteur

Note 1 à l'article: Voir également l'IEC 60034-2-1.

3.2.33 P_{LS}

pertes dans l'enroulement du stator d'un moteur

Note 1 à l'article: Voir également l'IEC 60034-2-1.

3.2.34

P_{LTsin}

pertes totales d'un moteur lorsque l'alimentation est de type sinusoïdal

Note 1 à l'article: Conformément à l'IEC 60034-2-1:2014, méthode 2-1-1B.

3.2.35

$P_{LT,Mot}$

pertes totales d'un moteur lorsque l'alimentation est assurée par un convertisseur (alimentation non sinusoïdale)

Note 1 à l'article: Conformément à l'IEC 60034-2-1:2014, méthode 2-1-1B.

3.2.36

$P_{out,CDM}$

puissance de sortie du CDM obtenue en mesurant les pertes de puissance

3.2.37

$P_{out,PDS}$

puissance de sortie du PDS obtenue en mesurant les pertes de puissance

3.2.38

P_r

puissance assignée de l'équipement attribuée par son fabricant

3.2.39

P_{proc}

puissance appelée par le processus mécanique ou fluide-mécanique

3.2.40

P_L

pertes de puissance électrique

Note 1 à l'article: Dans $P_{L,CDM}$, $P_{L,Mot}$, $P_{L,PDS}$ and $P_{L,Aux}$, les indices CDM, Mot, PDS et Aux désignent respectivement le module d'entraînement complet, le moteur, l'entraînement électrique de puissance et les dispositifs auxiliaires (câbles, transformateurs ou filtres)

3.2.41

p_L

pertes relatives de puissance exprimées en pertes unitaires par rapport à la puissance nominale du dispositif

3.2.42

$P_{L,CDM}$

pertes de puissance d'un CDM

3.2.43

$P_{L,CDM, determined}$

pertes de puissance d'un CDM calculées à partir de la méthode de détermination des pertes de puissance

3.2.44

$p_{L,CDM}$

pertes relatives de puissance du CDM, par rapport à sa puissance apparente assignée

3.2.45

$P_{L,choke}$

pertes de puissance dans la section bobine d'arrêt d'un CDM

3.2.46 $P_{L,control}$

pertes de puissance dans la section commande d'un CDM

3.2.47 P_{L,DC_link}

pertes de puissance dans la section liaison à courant continu du CDM

3.2.48 $P_{L,inverter}$

pertes de puissance dans la section onduleur d'un CDM

3.2.49 $P_{L,PDS, determined}$

pertes de puissance d'un PDS calculées à partir de la méthode de détermination des pertes de puissance

3.2.50 $P_{L,rectifier}$

pertes de puissance dans la section redresseur d'un CDM

3.2.51 $P_{L,resistor}$

pertes de puissance mesurées de la résistance selon un mesurage calorimétrique comparatif

3.2.52 $P_{L,on,D}$

pertes de puissance à l'état passant d'une diode de puissance

3.2.53 $P_{L,on,D, rectifier}$

pertes de puissance à l'état passant d'une diode de redresseur

3.2.54 $P_{L,on,T}$

pertes de puissance à l'état passant d'un transistor de puissance

3.2.55 P_{LSR}

pertes dans l'enroulement du stator et du rotor d'un moteur

3.2.56 $P_{L,sw,D}$

pertes de puissance de commutation d'une diode de puissance

3.2.57 $P_{L,sw,T}$

pertes de puissance de commutation d'un transistor de puissance

3.2.58 $P_{r,M}$

puissance assignée d'un moteur

Note 1 à l'article: Dans l'IEC 60034 (toutes les parties) sur les moteurs, elle est appelée P_N .

3.2.59

$P_{L, \text{stby}}$

pertes de veille d'un PDS

Note 1 à l'article: Des pertes de veille sont produites lorsque le PDS est sous tension, mais ne fournit pas de courant à la charge. Elles sont typiquement inférieures de deux ou trois ordres de grandeur aux pertes en cours de fonctionnement. Leur effet sur les pertes globales dépend essentiellement du profil de service du produit étendu. Outre ce phénomène, elles dépendent également des exigences du produit étendu en termes de temps de réveil et de communication.

3.2.60

P_N

pertes de sortie relatives d'un moteur

3.2.61

Q

débit d'une unité de pompe

3.2.62

Q_{BEP}

débit de la pompe au meilleur point d'efficacité

3.2.63

Q_{cooler}

débit volumétrique du refroidisseur du calorimètre

3.2.64

Q_{ISI}

erreur d'interpolation (indice de stabilité)

3.2.65

r_{HL}

rapport des pertes supplémentaires d'harmonique lorsqu'un moteur est exploité avec un CDM par rapport aux pertes à l'alimentation sinusoïdale d'un moteur

3.2.66

$S_{r, \text{equ}}$

puissance apparente assignée d'un équipement

3.2.67

$S_{r, \text{RCDM}}$

puissance apparente assignée du CDM de référence

3.2.68

T

couple d'un moteur

3.2.69

t_w

durée de fonctionnement d'un équipement

3.2.70

T_i

couple [Nm] au point de fonctionnement i

3.2.71 $U_{1,r,out}$

tension fondamentale de sortie composée assignée d'un CDM

Note 1 à l'article: Pour le CDM de référence, sauf indication contraire, cette valeur est par hypothèse égale à 400 V.

3.2.72 U_{DC}

tension de la liaison à courant continu d'un CDM

3.2.73 $U_{D,r}$

tension à l'état passant d'une diode de puissance au courant assigné du CDM

3.2.74 $U_{D,r,rectifier}$

tension à l'état passant d'une diode de redresseur au courant assigné du CDM

3.2.75 $U_{D,th}$

tension de seuil d'une diode de puissance

3.2.76 $U_{D,th,rectifier}$

tension de seuil d'une diode de redresseur

3.2.77 U_{mL1}

tension conducteur-neutre du système d'alimentation en phase L1

3.2.78 $U_{T,r}$

tension à l'état passant d'un transistor de puissance au courant assigné du CDM

3.2.79 $U_{T,th}$

tension de seuil d'un transistor de puissance

3.2.80 W

demande en énergie électrique du produit étendu pendant la durée de fonctionnement

3.2.81 λ facteur de puissance de la tension et du courant d'entrée d'un équipement: $\lambda = P_{equ} / S_{r,equ}$ **3.2.82** $\Delta p_{L,CDM}$

incertitude [%] de la méthode de détermination des pertes de puissance pour le CDM

3.2.83 $\Delta P_{L,CDM}$

incertitude [W] de la méthode de détermination des pertes de puissance pour le CDM

3.2.84

$\Delta p_{L,PDS}$

incertitude [%] de la méthode de détermination des pertes de puissance pour le PDS

3.2.85

$\Delta P_{L,PDS}$

incertitude [W] de la méthode de détermination des pertes de puissance pour le PDS

3.2.86

θ_{in}

température d'entrée du milieu de refroidissement (air, liquide) pour un mesurage calorimétrique

3.2.87

θ_{inside}

température de l'air de refroidissement entre deux chambres de mesure calorimétrique

3.2.88

θ_{out}

température de sortie du milieu de refroidissement (air, liquide) pour un mesurage calorimétrique

3.2.89

φ

angle de phase entre la tension fondamentale d'entrée du CDM et le courant fondamental d'entrée du CDM

3.2.90

Φ

angle de phase entre la tension fondamentale de sortie du CDM et le courant fondamental de sortie du CDM

3.2.91

Φ_r

angle de phase entre la tension fondamentale de sortie du CDM et le courant fondamental de sortie du CDM au couple et à la vitesse assignés

4 PDS de référence (RPDS), CDM de référence (RCDM) et moteur de référence (RM)

4.1 Généralités

Pour déterminer le produit étendu le plus efficace pour une application donnée, une comparaison directe de plusieurs topologies de systèmes et/ou de plusieurs stratégies de commande est exigée. L'approche produit étendu décrite dans l'IEC 61800-9-1 rend cette comparaison possible.

Cette approche se fonde notamment sur le concept de "PDS de référence (RPDS)". Le RPDS normalisé, composé d'un CDM de référence (RCDM) et d'un moteur alimenté par convertisseur de référence (RM), permet la comparaison de la consommation énergétique du produit étendu conçu avec un PDS de technologie moyenne.

La définition du RPDS est générique et indépendante d'un produit ou fabricant spécifique.

Elle permet

- d'établir les valeurs limites pour les classements,

- de classer le PDS réel par rapport au RPDS,
- de classer le CDM,
- d'appliquer l'IEC TS 60034-30-2,
- classement des moteurs alimentés par convertisseur et des moteurs classés conformément à l'IEC 60034-30-1,
- de limiter l'évaluation à quelques points de charge mesurés ou calculés appropriés, et
- de déterminer la consommation énergétique de plusieurs applications entraînées.

Exemples de valeurs d'entrée appropriées (points de charge) pour le classement des différentes applications entraînées:

Les charges avec caractéristiques de couple-vitesse quadratiques (par exemple, la plupart des unités de pompe) exigent généralement des pertes relatives ou des puissances d'entrée P_1 aux points de charge p_L , PDS (50; 25), p_L , PDS (100; 50) et p_L , PDS (100; 100) pour calculer les pertes du système moteur. La tolérance de perte admissible s'élève à $\pm 10\%$ des pertes à chaque point de fonctionnement.

Dans le cas des charges à couple constant (par exemple, équipement de levage), les points supplémentaires p_L , PDS (0; 25), p_L , PDS (0; 50) et p_L , PDS (0; 100) sont nécessaires pour déterminer les pertes du système moteur.

4.2 Points de fonctionnement de référence du RPDS, du RCDM, du RM et pertes associées

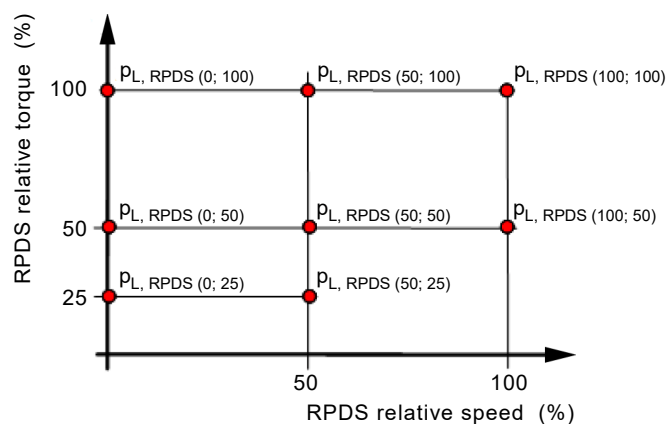
L'ensemble de l'équipement entraîné peut être décrit par la puissance exigée par la machine/l'application. Les exigences de puissance sont le produit du couple et de la vitesse à un point quelconque de fonctionnement. À chaque point de fonctionnement est associée une perte de puissance dans le système moteur.

L'ensemble des points de fonctionnement (couple, vitesse) auxquels le système moteur peut être potentiellement exploité est infini. Théoriquement, il est nécessaire de connaître la quantité des pertes de puissance générées à chaque point. En pratique, il est toutefois suffisant de connaître les pertes de puissance à un nombre limité de points spécifiques (huit) spécifiés pour le RPDS à la Figure 4, le RM à la Figure 5 et le RCDM à la Figure 6.

Pour les points de fonctionnement dont les vitesses sont supérieures à zéro, les pertes sont habituellement données sous forme de pourcentage de la puissance de sortie mécanique. Dans d'autres approches, les efficacités assignées (η) sont définies comme le rapport de la puissance de sortie mécanique assignée par rapport à la puissance d'entrée électrique (pertes comprises).

Dans le présent document, les pertes relatives à la puissance de sortie nominale de l'entraînement électrique de puissance (p en %) sont prises en considération à la place de l'efficacité. Cela est effectué afin de protéger la généralité de l'approche produit étendu.

Il existe des équipements entraînés qui exigent un couple à l'arrêt. Pour ces équipements, l'efficacité ne constitue pas une valeur appropriée pour être utilisée dans l'approche produit étendu.



IEC

Anglais	Français
RPDS relative torque / %	Couple relatif du RPDS / %
RPDS relative speed / %	Vitesse relative du RPDS / %

Figure 4 – Représentation des points de fonctionnement (vitesse de l'arbre, couple) pour la détermination des pertes relatives de l'entraînement électrique de puissance (RPDS)

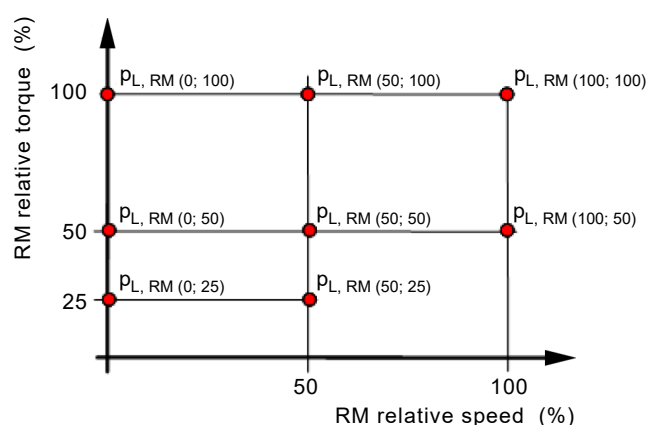
Comme défini, les pertes absolues du RPDS doivent représenter la somme des pertes du RCDM auxquelles s'ajoutent les pertes du RM. Ces pertes doivent donc être calculées point par point aux points de charge représentés à la Figure 5 et à la Figure 6 d'après la formule suivante:

$$P_{L,RPDS} = P_{L,RM} + P_{L,RCDM} \quad (1)$$

Les pertes relatives du RPDS sont calculées à partir des pertes relatives du RCDM et du RM comme suit:

$$P_{L,RPDS} = \frac{P_{L,RM} \cdot P_{r,RM} + P_{L,RCDM} \cdot S_{r,RCDM}}{P_{r,RM}} \quad (2)$$

À la vitesse et au couple assignés, une formule modifiée selon l'Equation (19) doit être utilisée.



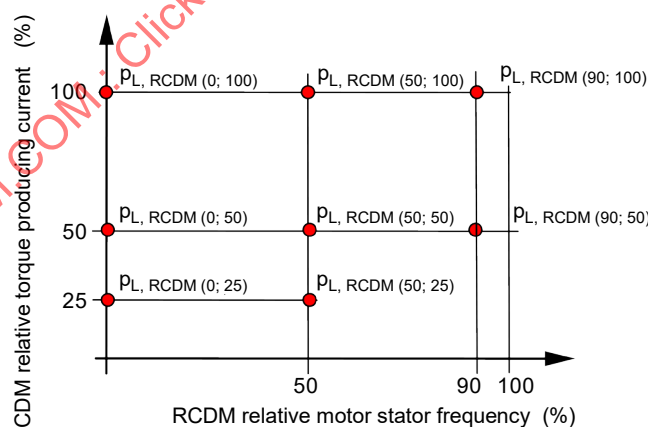
IEC

Anglais	Français
RM relative torque / %	Couple relatif du RM / %
RM relative speed / %	Vitesse relative du RM / %

Figure 5 – Représentation des points de fonctionnement (vitesse de l'arbre, couple) pour la détermination des pertes relatives du moteur de référence (RM)

Les points de charge du CDM de référence (RCDM) ne peuvent pas être donnés sous forme de pourcentage de la vitesse et du couple des valeurs assignées correspondantes, dans la mesure où le CDM ne fournit que des courants et des tensions à la sortie. La tension fondamentale de sortie en courant alternatif doit être limitée à 90 % de la tension d'entrée en courant alternatif afin de permettre une comparaison reproductible et d'éviter toute surmodulation.

NOTE 1 Les pertes du RCDM à la tension de sortie à 90 % sont très similaires aux pertes du RCDM à la tension de sortie à 100 % (les pertes de l'onduleur sont légèrement supérieures alors que les pertes du redresseur sont légèrement inférieures) et peuvent donc être utilisées pour calculer les pertes du RCDM à une vitesse de 100 %.



IEC

Anglais	Français
RCDM relative Torque producing current / %	Courant relatif produisant le couple du RCDM / %
RCDM relative Motor stator frequency / %	Fréquence relative du stator du moteur du RCDM / %

Figure 6 – Représentation des points de fonctionnement (fréquence relative du stator du moteur, courant relatif produisant le couple) pour la détermination des pertes du module d'entraînement complet de référence (RCDM)

NOTE 2 Pour des moteurs asynchrones, le courant produisant le couple est le courant du rotor. La relation entre le courant global du moteur et le courant produisant le couple est donnée dans le Tableau 1.

NOTE 3 Pour des raisons physiques, les points de charge représentés sur l'axe y de la Figure 6 $p_{L, RCDM}(0, n)$ sont réalisés uniquement avec une tension de sortie non nulle pour que le courant puisse traverser la résistance des enroulements du moteur.

La tension fondamentale relative de sortie du CDM (en pourcentage) ne doit pas être inférieure à la fréquence relative de sortie du CDM (en pourcentage).

Lorsque cela est exigé, les pertes relatives aux points de fonctionnement intermédiaires peuvent être déterminées par l'une des méthodes de calcul présentées en E.2.1:

- a) pertes maximales sur des points de charge voisins prédéfinis;
- b) interpolation linéaire bidimensionnelle entre des points de charge voisins;
- c) calcul des pertes du CDM selon le modèle mathématique décrit en 5.2.

Les pertes du moteur sont interpolées selon l'Annexe D.

Un écart de la vitesse relative du rotor par rapport aux points de charge définis (voir Figure 4) jusqu'au glissement assigné maximum est admis. À une fréquence de 0 Hz, un écart maximal de 12 Hz doit être admis.

Pour les pertes à des points de charge supplémentaire et dans des conditions de charge partielle et une réduction des points de fonctionnement, voir 8.4 et D.4.3.

4.3 Combinaison des pertes du PDS avec l'équipement entraîné – Workflow pour le modèle semi-analytique (SAM)

Le modèle de détermination des pertes ou l'indice d'efficacité énergétique d'un produit étendu est appelé "modèle semi-analytique" (SAM – semi-analytical model), ce qui inclut les paramètres physiques et mathématiques, ainsi que les algorithmes de calcul des sous-parties d'un EP.

La Figure 7 représente le workflow pour la détermination du classement d'un produit étendu en termes d'efficacité énergétique.

Elle représente aussi la manière dont le SAM du système moteur (côté gauche) doit être raccordé au SAM de l'équipement entraîné (côté droit). La liaison entre les deux modèles semi-analytiques doit correspondre aux points de perte de charge du PDS et leurs tolérances admissibles. Les points de fonctionnement nécessaires réels doivent être ceux exigés par le modèle semi-analytique de l'équipement entraîné.

Les données de PDS qui contiennent les pertes de PDS selon la Figure 2 (côté gauche de la Figure 5) sont définies dans le présent document, tandis que les modèles de consommation d'énergie semi-analytiques de l'application entraînée par PDS (côté droit de la Figure 5) doivent être élaborés par les comités responsables du produit en utilisant la même approche. Un exemple d'unités de pompe entraînées par PDS est donné dans l'IEC 61800-9-1. La Figure 8 représente la méthode selon laquelle les différentes sources de données doivent être combinées.

La responsabilité des comités d'études pour les applications spécifiques consiste à normaliser les SAM accessibles au public pour leurs applications.

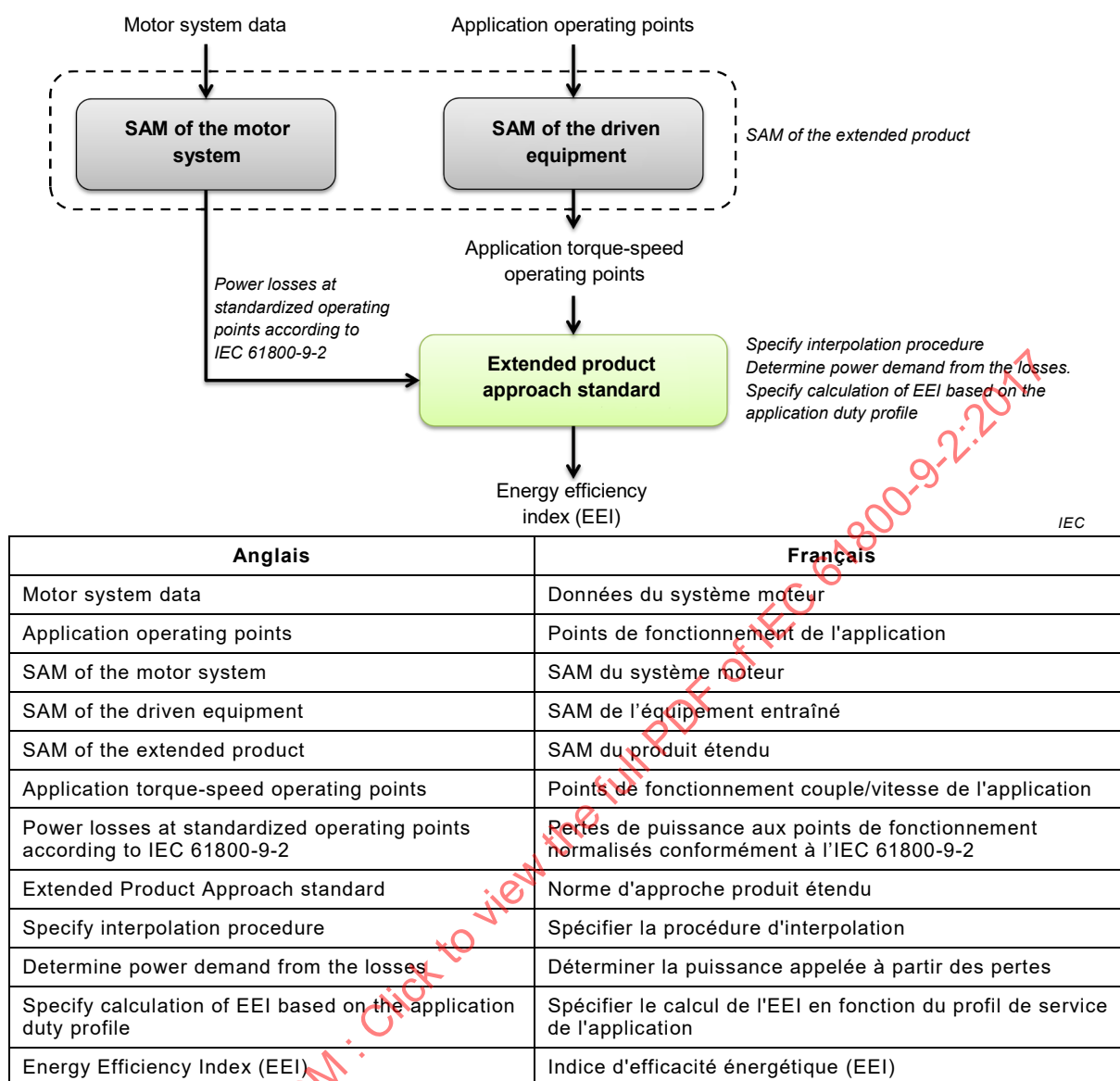
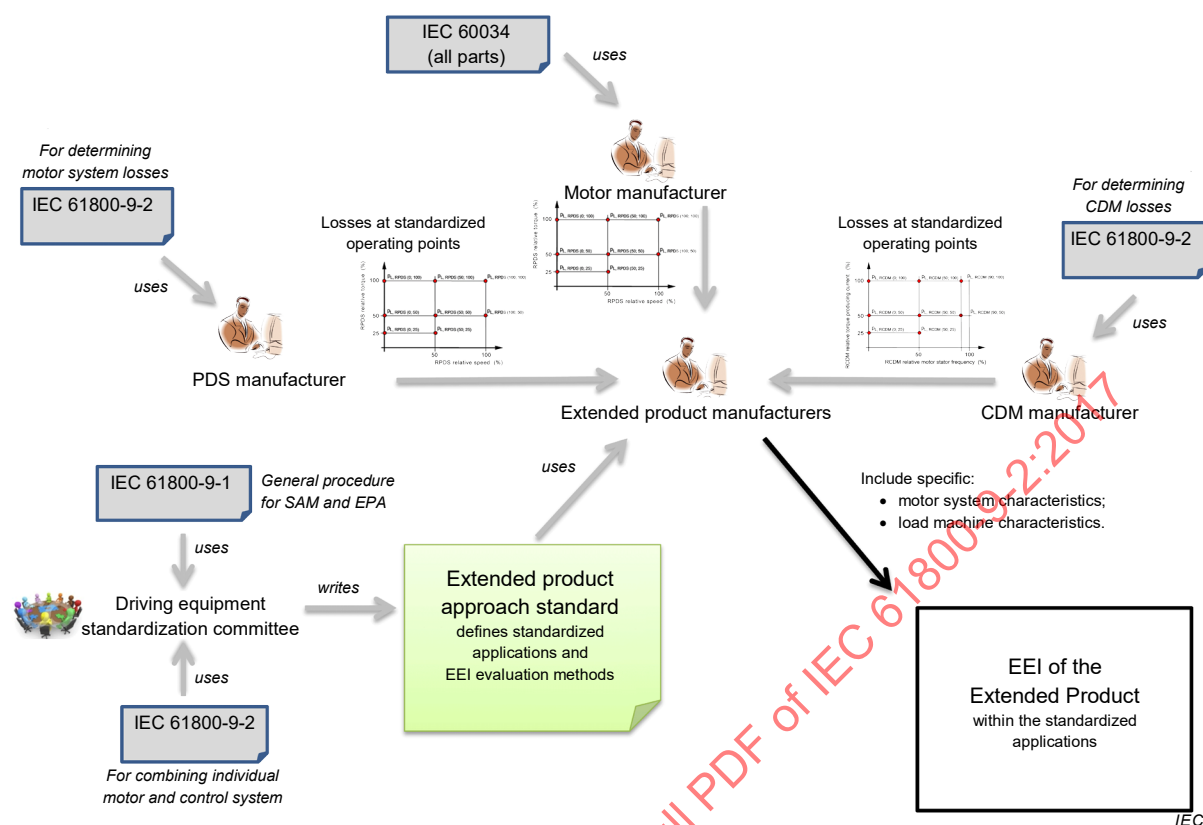


Figure 7 – Représentation du workflow pour la détermination de l'indice d'efficacité énergétique (EEI) d'un produit étendu

Le présent document spécifie comment déterminer les pertes de puissance du système moteur. Le comité chargé du produit étendu doit spécifier les tolérances qui doivent s'appliquer à ce processus.



Les fabricants du moteur et du CDM peuvent fournir les données directement au fabricant du système moteur.

Si le système moteur dépend d'un démarreur, seules les pertes du moteur sont nécessaires comme entrée pour l'EPA.

Anglais	Français
IEC 60034 (all parts)	IEC 60034 (toutes les parties)
uses	Utilise
Motor manufacturer	Fabricant de moteur
For determining motor system losses	Pour déterminer les pertes du système moteur
IEC 61800-9-2	IEC 61800-9-2
For determining CDM losses	Pour déterminer les pertes du CDM
Losses at standardized operating points	Pertes aux points de fonctionnement normalisés
PDS manufacturer	Fabricant de PDS
Extended Product manufacturer	Fabricant de produit étendu
CDM manufacturer	Fabricant de CDM
IEC 61800-9-1	IEC 61800-9-1
General procedure for SAM and EPA	Procédure générale pour SAM et EPA
Include specific: motor system characteristics; load machine characteristics.	Inclut des informations spécifiques: caractéristiques du système moteur; caractéristiques de la machine de charge.
Driving equipment standardisation committee	Comité de normalisation des équipements d'entraînement
writes	Rédige
Extended Product Approach standard	Norme d'approche produit étendu
defines standardized applications and EEI evaluation methods	définit les applications normalisées et les méthodes d'évaluation EEI

Anglais	Français
For combining individual motor and control system	Pour combiner le moteur individuel et le système de commande
EEL of the Extended Product within the standardized applications	EEL du produit étendu dans les applications normalisées
Note 1: Motor and CDM manufacturers can provide data directly to the motor system manufacturer	Note 1: Les fabricants du moteur et du CDM peuvent fournir les données directement au fabricant du système moteur
Note 2: If the motor system is based on a starter, then only the motor losses are needed as input to the EPA	Note 2: Si le système moteur dépend d'un démarreur, seules les pertes du moteur sont nécessaires comme entrée pour l'EPA

Figure 8 – Représentation de la façon de combiner différentes sources de données pour la détermination de l'indice d'efficacité énergétique (EEL) d'un produit étendu

4.4 Classes IE des moteurs alimentés par réseau

L'IEC 60034-30-1 définit les classes IE pour les moteurs exploités directement sur le réseau (classes allant de IE1 à IE4 inclus (ou IE5 respectivement). La plage de classes supérieures à IE5 n'est actuellement pas appliquée.

4.5 Classes IE des moteurs alimentés par convertisseur

Selon l'IEC TS 60034-2-3, la tension harmonique d'un CDM augmente les pertes du moteur d'environ 15 % à 25 %.

Les moteurs non conçus pour être alimentés directement par le réseau (DOL – direct on line) sont classés selon une classe IE selon leurs pertes à une vitesse et un couple assignés (puissance assignée) conformément à l'IEC TS 60034-30-2.

La classe IE pour les moteurs capables de fonctionner directement sur le réseau est définie pour un fonctionnement à vitesse fixe (IEC 60034-30-1) ou pour les moteurs qui peuvent fonctionner lorsqu'ils sont alimentés par CDM tel que défini dans l'IEC TS 60034-30-2. Les pertes pour les 7 points de fonctionnement définis peuvent être extrapolées à partir de l'Annexe D. Il convient que le fabricant du moteur prévienne les pertes pour ces points selon l'autre méthode de détermination de l'efficacité (AEDM) déterminée au moyen de l'IEC 60034-2-3.

4.6 Classes IE des convertisseurs de fréquence (modules d'entraînement complets, CDM)

Le CDM de référence (RCDM) doit être déclaré de classe d'efficacité "IE1".

Pour déclarer la classe d'efficacité du CDM sans prendre en compte tout le PDS qui en résulte et pour faire état de l'effet technologique du paramètre le plus significatif, l'unité définie qui doit être utilisée est appelée la "charge d'essai".

Le point de fonctionnement pour la détermination de la classe IE doit être pris conformément à 4.2.

Les AIC conformément à l'IEC TS 62578, qui sont des CDM capables de retourner l'énergie de freinage de l'inertie de la charge au système d'alimentation électrique, peuvent être exclus du classement IE. Les pertes relatives de ces AIC représentent généralement le double des pertes d'un CDM sans option de retour. La très grande contribution de l'efficacité d'un AIC ne peut donc pas être démontrée simplement via l'affichage de sa classe IE et peut être une option du produit étendu avec un AIC intégré.

Les CDM possédant un THC du courant de réseau inférieur ou égal à 10 % (conformément à l'IEC 61000-3-12), par exemple, CDM alimentés par correction du facteur de puissance (PFC), peuvent être exclus du classement IE. Les pertes relatives d'un redresseur actif représentent généralement le double des pertes d'un CDM avec un redresseur à diodes. Néanmoins, la contribution énergétique d'un redresseur actif peut se traduire par une meilleure utilisation du réseau électrique, ainsi que des pertes et perturbations inférieures au niveau du système (transformateur de puissance, câblage, harmoniques de tension, papillotement).

4.7 Classes IES d'un PDS

Le classement du PDS doit être déclaré sur une plage allant d'IES0 à IES2 inclus.

Les classes IES restent limitées à IES0, 1 et 2 pour le présent document. Les valeurs limites des classes IES3 à IES9 peuvent être données dans les éditions futures du présent document.

Les pertes relatives d'un PDS doivent être déterminées par calcul ou par mesurage. Le calcul doit être la somme arithmétique des pertes absolues du moteur alimenté par convertisseur plus celles du convertisseur et des dispositifs auxiliaires.

Le PDS de référence (RPDS) (voir Figure 4) doit être classé IES1.

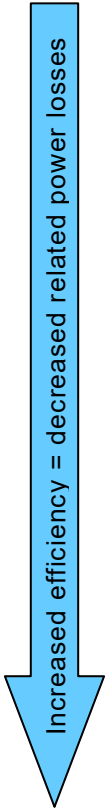
4.8 Cohérence des classes IE et IES

Il est important de comprendre que les classes IE de composants individuels tels que les moteurs alimentés par convertisseur, les moteurs alimentés par réseau ou les CDM ne peuvent être cumulées pour obtenir la classe IES d'un PDS.

Le classement IES des PDS peut être déterminé par les seules procédures établies en 4.9, en connaissant de manière détaillée les pertes de tous les composants.

Des classes IE individuelles sont exigées pour le classement des composants sans connaître l'EP au préalable.

Généralement, des classes IE plus élevées démontrent une efficacité renforcée ou des pertes relatives de puissance réduites.



Line fed motors Efficiency	Converter fed motors Efficiency	Converters (CDM) losses related to rated power	Power drive system (PDS) losses related to rated power
IE0 – not used	IE0 – u.c.	IE0 – more than 25 % higher than reference value	IES0 – more than 20 % higher than reference value
IE1 – can be mostly technically achieved	IE1 – u.c.	IE1 – reference value ± 25 %	IES1 – reference value ± 20 %
IE2 – can be achieved by enhancement	IE2 – u.c.	IE2 – more than 25 % lower than reference value	IES2 – more than 20 % lower than reference value
IE3 – needs significant amount of techniques	IE3 – u.c.	IE3 – u.c.	IES3 – u.c.
IE4 – will require new techniques	IE4 – u.c.	IE4 – u.c.	IES4 – u.c.
IE5 – experimental new technologies	IE5 – u.c.	IE5 – u.c.	IES5 – u.c.
IE6 – not used	IE6 – u.c.	IE6 – u.c.	IES6 – u.c.
IE7 – not used	IE7 – u.c.	IE7 – u.c.	IES7 – u.c.
IE8 – not used	IE8 – u.c.	IE8 – u.c.	IES8 – u.c.
IE9 – not used	IE9 – u.c.	IE9 – u.c.	IES9 – u.c.

Anglais	Français
Line fed motors Efficiency	Moteurs alimentés par réseau Efficacité
Converter fed motors Efficiency	Moteurs alimentés par convertisseur Efficacité
Converters (CDM), losses related to rated power	Convertisseurs (CDM), pertes relatives à la puissance assignée
Power drive systems (PDS), losses related to rated power	Entraînements électriques de puissance (PDS), pertes relatives à la puissance assignée
Not used	Non utilisé
More than 25 % higher than reference value	De plus de 25 % supérieur à la valeur de référence
More than 20 % higher than reference value	De plus de 20 % supérieur à la valeur de référence
u.c. = under consideration	À l'étude
Can be mostly technically achieved	Peut être techniquement réalisé
Reference value	Valeur de référence
Can be achieved by enhancement	Peut être réalisé à l'aide d'améliorations
More than 25 % lower than reference value	De plus de 25 % inférieur à la valeur de référence
More than 20 % lower than reference value	De plus de 20 % inférieur à la valeur de référence
Needs significant amount of techniques	Nécessite un apport technique important
Will require new techniques	Exige de nouvelles techniques
Experimental new technologies	Nouvelles technologies expérimentales
Not used	Non utilisé
Increased efficiency = decreased related power losses	Efficacité plus importante = pertes relatives de puissance moins importantes

NOTE Les classes IE pour les moteurs alimentés par réseau sont définies dans l'IEC 60034-30-1. Les classes IES pour les moteurs alimentés par convertisseur seront définies dans l'IEC TS 60034-30-2.

Figure 9 – Relation métrique des classes IE et IES

4.9 Détermination de la classe IES d'un PDS à l'aide de dispositifs "de référence" et "d'essai" et de préconisations pour les fabricants

Les méthodes de détermination des pertes et des classes IE d'un moteur sont spécifiées dans l'IEC 60034-30 (toutes les parties) – voir également la Figure 9. Les fabricants peuvent également définir une classe IES pour un PDS qui utilise leur moteur. Dans ce cas, le fabricant doit déterminer les pertes relatives pour son moteur combiné à un RCDM.

Le fabricant d'un CDM doit déclarer les pertes de son CDM spécialisé et afficher une classe IE selon la Figure 9. Il peut aussi déclarer une classe IES pour un PDS équipé de son CDM. Dans ce cas, le fabricant doit mesurer ou calculer les pertes pour son CDM. En l'absence de données moteur réelles, les pertes du RM doivent être utilisées.

Le fabricant du CDM peut fournir des informations dans la documentation indiquant les méthodes de détermination décrites dans l'Article 7 ayant été utilisées. Ceci inclut les classes IES attendues pour les différentes combinaisons d'un CDM et de moteurs spécifiques sélectionnés à l'aide des méthodes du présent document.

L'une quelconque des (ou toutes les) fonctions de commande disponibles du CDM peut être utilisée afin de réduire le plus possible les pertes lors de l'évaluation du PDS, et doit être consignée dans le rapport d'essai comme composante de l'enregistrement de l'évaluation.

La Figure 10 représente une feuille de calcul d'application des dispositifs "d'essai" et "de référence" pour déterminer les classes IE et IES. Des préconisations sont également fournies pour les seuls fabricants de CDM ou de moteurs concernant la détermination de la classe IES d'un PDS résultant combiné aux dispositifs "d'essai" ou "de référence".

Le champ en haut à gauche à l'intersection de "moteur" et de "CDM" s'applique aux fabricants de PDS.

Combination of	CDM	Test CDM	Reference CDM (RCDM)	
Motor	Determine the IES class of the resulting PDS	Determine the IE class of the given motor (IEC TS 60034-2-3)	Determine the IES class of the resulting PDS	Guidance for motor manufacturer
Test load	Determine the IE class of the given CDM	Combination not used	Combination not used	
Reference Motor (RM)	Determine the IES class of the resulting PDS	Combination not used	Calculation model of a reference PDS	
	Guidance for CDM manufacturer			

IEC

Anglais	Français
Combination of	Combinaison de
CDM	CDM
Test CDM	CDM d'essai

Anglais	Français
Reference CDM (RCDM)	CDM de référence (RCDM)
Motor	Moteur
Determine the IES class of the resulting PDS	Déterminer la classe IES du PDS résultant
Determine the IE class of the given motor (IEC TS 60034-2-3)	Déterminer la classe IE du moteur donné (IEC TS 60034-2-3)
Guidance for motor manufacturer	Préconisations pour le fabricant du moteur
Test load	Charge d'essai
Determine the IE class of the given CDM	Déterminer la classe IE du CDM donné
Combination not used	Combinaison non utilisée
Reference Motor (RM)	Moteur de référence (RM)
Calculation model of a reference PDS	Modèle de calcul d'un PDS de référence
Guidance for CDM manufacturer	Préconisations pour le fabricant du CDM

Figure 10 – Préconisations destinées aux fabricants de CDM et de moteurs concernant l'utilisation des dispositifs "d'essai" et "de référence" pour la détermination des classes IE/IES

Cette approche permet de déterminer la classe d'efficacité IES d'un PDS final même lorsqu'un seul composant (le moteur ou le CDM) est disponible.

5 Modèle mathématique du CDM, du moteur et du PDS

5.1 Généralités

Les modèles mathématiques donnés dans l'Article 5 décrivent les procédures de détermination des pertes du CDM, du moteur et du PDS. Ils permettent de calculer les pertes d'un produit sans effectuer de mesurages.

Les modèles sont composés de formules, de variables et de paramètres. Les formules décrivent les procédures de calcul d'état des pertes partielles, qui sont généralement acceptées aujourd'hui et qui sont publiées dans les ouvrages de référence. Les variables dépendent du point de fonctionnement du CDM, du moteur ou du PDS évalué. Les paramètres sont des valeurs physiques qui décrivent un produit réel. Afin de déterminer les pertes d'un produit, ces paramètres doivent être définis selon la conception spécifique du produit.

S'il est nécessaire qu'un comité chargé du produit étendu définisse un CDM ou un PDS typique pour leur(s) application(s) dédiée(s), les paramètres du CDM ou PDS typique pour ces applications spécifiques peuvent être utilisés. Ces écarts doivent être prévus dans la norme de produit étendu.

Pour le CDM de référence (RCDM), le moteur de référence (RM) et le PDS de référence (RPDS), les paramètres de référence sont définis respectivement en 5.2, 5.3.3 et 5.4.

La procédure de détermination des pertes est présentée à l'Article 7.

5.2 Pertes de CDM

5.2.1 Procédure générale et définition du CDM et de la charge d'essai

Le CDM et la charge d'essai sont représentés à la Figure 11.

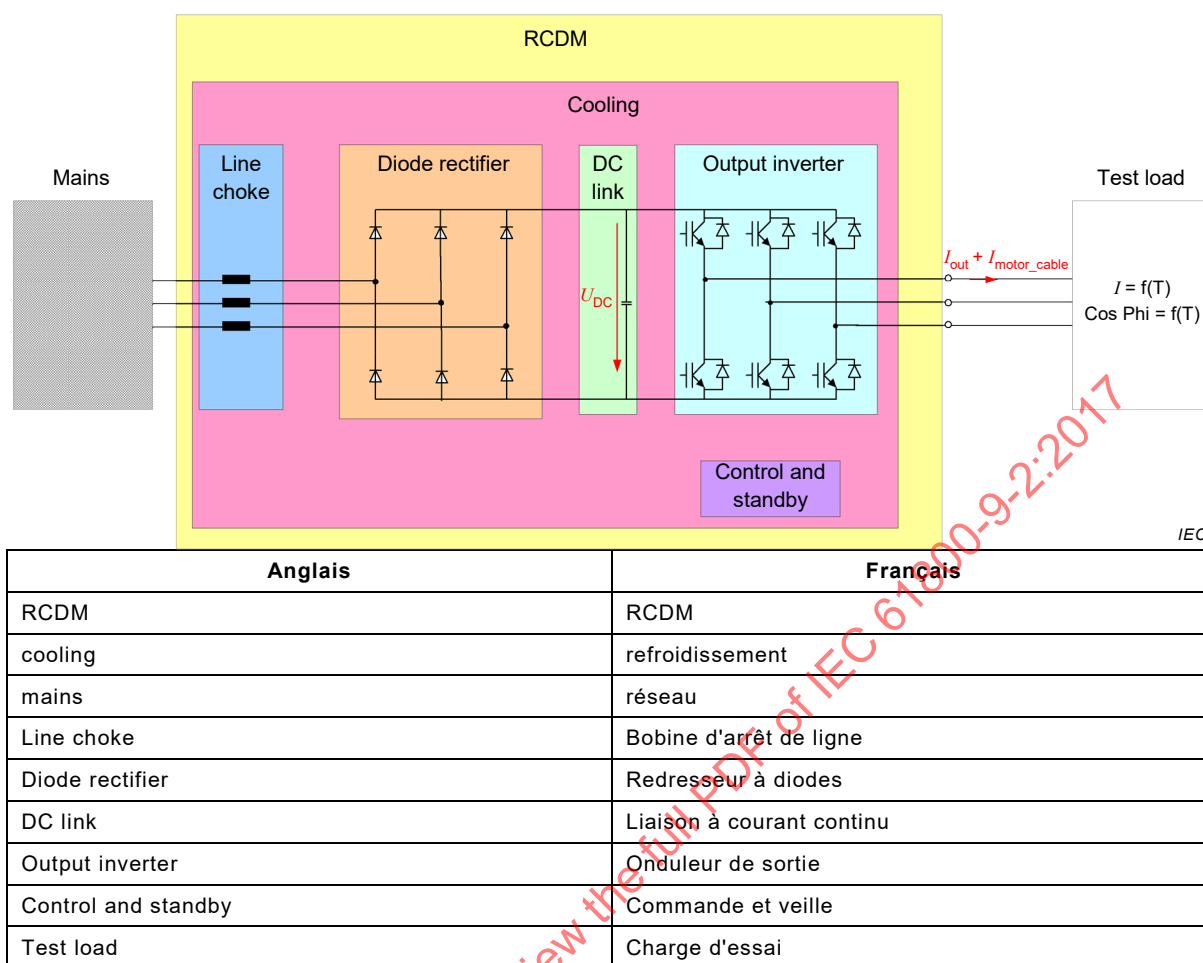


Figure 11 – Représentation du CDM et de la charge d'essai

L'objectif fondamental est de décrire les pertes du CDM en fonction du couple et de la vitesse du PDS. Néanmoins, les pertes du CDM dépendent de sa tension fondamentale relative de sortie, de son courant fondamental relatif de sortie, ainsi que de l'angle de phase entre la tension fondamentale de sortie du CDM et le courant fondamental de sortie du CDM.

La tension relative de sortie est approximativement identique à la fréquence relative de sortie. Ceci est au moins vrai dans le domaine de fonctionnement jusqu'à la vitesse nominale du moteur. Dans la plage d'affaiblissement du champ, la tension relative de sortie du CDM reste égale à 1,00 quelle que soit la vitesse du moteur au-delà de la vitesse nominale du moteur.

Dans une première étape, la vitesse du moteur doit être transformée en fréquence de sortie du CDM, puis le couple du moteur doit être converti en un courant de sortie du CDM et en un angle de phase entre le courant fondamental de sortie et la tension de sortie du CDM.

Dans une approximation de premier ordre, la vitesse relative de sortie du PDS peut être considérée comme identique à la fréquence relative de sortie du CDM.

Pour l'évaluation du CDM, les données suivantes obtenues par des mesurages effectués sur des moteurs réels doivent servir de données pour la charge d'essai pour toutes les fréquences relevant du domaine d'application:

Tableau 1 – Courants minimums de charge d'essai à différents points de fonctionnement

Courant produisant le couple %	Courant de charge d'essai $\frac{I_{out}}{I_{r,out}}$ pour la plage de puissance apparente $S_{r,eq}$ de				
	0,278 kVA (0,12 kW) à < 1,29 kVA (0,75 kW)	1,29 kVA (0,75 kW) à < 7,94 kVA (5,5 kW)	7,94 kVA (5,5 kW) à < 56,9 kVA (45 kW)	56,9 kVA (45 kW) à < 245 kVA (200 kW)	245 kVA (200 kW) à < 1 209 kVA (1 000 kW)
25	0,79	0,58	0,45	0,42	0,39
50	0,81	0,71	0,60	0,58	0,56
75	0,89	0,82	0,79	0,78	0,77
100	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Tableau 2 – Facteur de déplacement de la charge d'essai entre le courant fondamental de sortie et la tension fondamentale de sortie à différents points de fonctionnement

Courant produisant le couple %	Facteur de déplacement de la charge d'essai $\cos \phi$ pour la plage de puissance apparente $S_{r,eq}$ de				
	0,278 kVA (0,12 kW) à < 1,29 kVA (0,75 kW)	1,29 kVA (0,75 kW) à < 7,94 kVA (5,5 kW)	7,94 kVA (5,5 kW) à < 56,9 kVA (45 kW)	56,9 kVA (45 kW) à < 245 kVA (200 kW)	245 kVA (200 kW) à < 1 209 kVA (1 000 kW)
25	0,34	0,38	0,49	0,54	0,57
50	0,51	0,60	0,71	0,75	0,78
75	0,64	0,72	0,80	0,83	0,85
100	0,73	0,79	0,85	0,86	0,87

NOTE Pour les essais du CDM, une tolérance de $\pm 0,08$ (voir 7.9) des facteurs de déplacement de la charge d'essai indiqués dans le Tableau 3 est admise.

Le courant de la charge d'essai donné au Tableau 1 et l'angle de phase de la charge d'essai donné au Tableau 2 pour différentes valeurs relatives de couple dépendent de la puissance assignée. Pour limiter la quantité des données exigées, les moteurs dont la puissance est comprise dans une certaine plage ont été rassemblés en une classe. La proportion d'incertitude sur les pertes de puissance résultantes du CDM qui en résulte est assez faible pour justifier la simplification. Les données pour la charge d'essai qui figurent au Tableau 1 et au Tableau 2 peuvent être utilisées quelle que soit la fréquence relative de sortie du CDM. Pour les courants produisant le couple qui diffèrent des points de fonctionnement définis au Tableau 1 et au Tableau 2, les données doivent être obtenues par interpolation et extrapolation linéaires à partir des valeurs définies.

Le modèle mathématique d'un CDM doit être calculé avec son courant de sortie assigné. Si un CDM n'est pas spécifié avec un courant de sortie assigné, mais seulement avec une puissance réelle assignée $P_{r,M}$, son courant de sortie assigné doit être calculé à partir de la puissance réelle assignée via la formule suivante, qui utilise l'angle de phase du Tableau 2 et l'efficacité IE2 η_{nMotor} définie dans l'IEC 60034-30-1:

$$I_{r,out} = \frac{P_{r,M}}{\sqrt{3} \cdot U_{1,r,out} \cdot \cos \phi \cdot \eta_{nMotor}} \quad (3)$$

La puissance de sortie apparente assignée du CDM doit être calculée comme suit:

$$S_{r, \text{equ}} = \sqrt{3} \cdot U_{1, r, \text{out}} \cdot I_{r, \text{out}} = \frac{P_{r, M}}{\cos \phi \cdot \eta_{\text{Motor}}} \quad (4)$$

Pour calculer les pertes d'un CDM avec les variables d'entrée du Tableau 1 et du Tableau 2, les Formules analytiques (5) à (16) ci-dessous doivent être utilisées. Les valeurs du paramètre CDM réel doivent être utilisées pour calculer les pertes d'un CDM réel.

Le Tableau 18 donne les résultats des calculs du RCDM pour la détermination de la classe IE et le Tableau A.1 donne les résultats pour les huit points de fonctionnement définis à la Figure 6. Le RCDM est basé sur une tension d'alimentation de 400 V.

À la différence de l'Annexe B, qui décrit les sous-ensembles du PDS depuis le réseau jusqu'à la charge, 5.2 commence par les parties du PDS qui créent les pertes les plus importantes et continue par les autres parties qui contribuent dans une moindre mesure aux pertes totales du PDS.

5.2.2 Pertes de l'onduleur de sortie

5.2.2.1 Généralités

La majeure partie des pertes du CDM sont dues à la section onduleur de sortie du CDM. Ses pertes sont décrites par les formules analytiques suivantes, bien connues dans les ouvrages de référence. Dans ces formules, le courant de sortie du CDM est par hypothèse sinusoïdal et les impulsions MLI sont distribuées aléatoirement sur la courbe sinusoïdale fondamentale du courant. La distribution aléatoire est obtenue dès que la fréquence MLI représente au moins 20 fois la fréquence fondamentale du courant du moteur et que l'algorithme normalisé de modulation de vecteur spatial est utilisé. Il n'est pas tenu compte des pertes réduites dues à la surmodulation du CDM. Le calcul du CDM de référence s'effectue par conséquent selon ces hypothèses. Pour le calcul des pertes d'un CDM réel, les valeurs de paramètre des semiconducteurs de puissance doivent être déterminées à température réelle lors de l'exploitation du CDM ou à la température maximale de fonctionnement spécifiée dans la fiche technique.

Pour un CDM réel, les valeurs de paramètre des semiconducteurs de puissance et d'autres dispositifs peuvent être désignées comme des valeurs typiques. De plus, le modèle présenté en 5.2 peut être utilisé pour déterminer les pertes d'un CDM par calcul. Le fabricant est autorisé à utiliser un modèle de calcul différent ou à effectuer des simulations de pertes. Les fabricants sont responsables de l'application des exactitudes correctes dans la Formule (21).

5.2.2.2 Pertes du transistor à l'état passant

Les pertes du transistor à l'état passant doivent être calculées selon la formule suivante:

$$P_{L, \text{on}, T} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{out}} \cdot U_{T, \text{th}} \cdot \left(\left(\frac{1}{2\pi} \right) + \frac{1,22 \cdot m \cdot \cos \phi}{8} \right) + \frac{U_{T, r} - U_{T, \text{th}}}{I_{r, \text{out}}} \cdot 2 \cdot I_{\text{out}}^2 \cdot \left(\frac{1}{8} + \frac{1,22 \cdot m \cdot \cos \phi}{3\pi} \right) \quad (5)$$

Les paramètres RCDM de la Formule (5) sont donnés au Tableau 3:

Tableau 3 – Paramètres de référence de la Formule (5)

Abréviation	Description	Valeur de paramètre RCDM	Unité
$U_{T,th}$	Tension de seuil du transistor de puissance (IGBT)	1,0	V
$U_{T,r}$	Tension à l'état passant du transistor de puissance (IGBT) au courant de sortie assigné du CDM	2,3	V
$I_{r,out}$	Courant de sortie assigné du CDM, valeur efficace		A

Les variables de la Formule (5) sont données au Tableau 4:

Tableau 4 – Variables de la Formule (5)

Abréviation	Description	Unité
I_{out}	Courant de sortie du CDM (valeur efficace) selon le Tableau 1	A
ϕ	Angle de phase entre la tension fondamentale de sortie du CDM et le courant fondamental de sortie du CDM selon le Tableau 2	°
m	Indice de modulation, identique à la fréquence relative de sortie du CDM jusqu'à la fréquence de sortie assignée	

5.2.2.3 Pertes de la diode libre à l'état passant

Les pertes de la diode à l'état passant doivent être calculées selon la formule suivante:

$$P_{L,on,D} = \sqrt{2} \cdot I_{out} \cdot U_{D,th} \cdot \left(\left(\frac{1}{2\pi} \right) - \frac{1,22 \cdot m \cdot \cos \phi}{8} \right) + \frac{U_{D,r} - U_{D,th}}{I_{r,out}} \cdot 2 \cdot I_{out}^2 \cdot \left(\frac{1}{8} - \frac{1,22 \cdot m \cdot \cos \phi}{3\pi} \right) \quad (6)$$

Les paramètres RCDM de la Formule (6) sont donnés au Tableau 5:

Tableau 5 – Paramètres de référence de la Formule (6)

Abréviation	Description	Valeur de paramètre RCDM	Unité
$U_{D,th}$	Tension de seuil de la diode de puissance	1,1	V
$U_{D,r}$	Tension à l'état passant de la diode de puissance au courant de sortie assigné du CDM	2,4	V

Les variables de la Formule (6) sont identiques à celles de la Formule (5).

5.2.2.4 Pertes de commutation du transistor

Dans les fiches techniques des IGBT de puissance, il est normal de décrire l'énergie de commutation du transistor en fonction du courant de sortie de l'onduleur. Cette valeur est habituellement obtenue en enregistrant la tension collecteur-émetteur de l'IGBT et le courant collecteur de l'IGBT pendant la commutation, en multipliant ces graphiques pour obtenir les pertes de puissance instantanées et en intégrant ces pertes pendant une commutation pour obtenir finalement l'énergie de perte de commutation. Dans une approximation de premier ordre, la courbe résultante indique que l'énergie augmente linéairement avec le courant collecteur et la tension de la liaison à courant continu de l'onduleur. Les ouvrages de référence appellent souvent facteur E_T le quotient de l'énergie de commutation sur le produit

de la tension de la liaison à courant continu et du courant collecteur de l'IGBT. Ce facteur comprend la somme de l'énergie de perte de connexion et de déconnexion d'un transistor de puissance.

En cas de faible courant, le courant à utiliser pour déterminer les pertes de commutation est supérieur au courant de sortie de l'onduleur, car les câbles du moteur provoquent un courant de sortie supplémentaire. Pour tenir compte de ce phénomène, un terme correctif $I_{\text{motor_cable}}$ est utilisé. Ce courant est ajouté au courant de sortie de l'onduleur pour calculer les pertes de commutation. Pour le convertisseur de référence, le Tableau 6 ci-dessous fournit un modèle simple pour le courant du câble.

En partant du principe que l'onduleur produit un courant de sortie sinusoïdal dont la fréquence fondamentale est significativement inférieure à la fréquence de commutation (au moins d'un facteur 15), les pertes de commutation du transistor doivent être calculées selon la formule suivante:

$$P_{L,sw,T} = \frac{E_T}{\pi} \cdot U_{DC} \cdot \sqrt{2} \cdot (I_{\text{out}} + I_{\text{motor_cable}}) \cdot f_{sw} \quad (7)$$

Les paramètres RCDM de la Formule (6) sont donnés au Tableau 5:

Tableau 6 – Paramètres de référence de la Formule (7)

Abréviation	Description	Valeur de paramètre RCDM	Unité
E_T	Énergie de perte de commutation du transistor de puissance (IGBT) par volt et par ampère	$7,5 \times 10^{-7}$	$\frac{J}{V \cdot A}$
U_{DC}	Tension de la liaison à courant continu du CDM	540	V
$I_{\text{motor_cable}}$	Courant du câble du moteur à utiliser lorsque les pertes de commutation sont plus importantes	$I_{\text{motor_cable}} = 4$ pour $I_{r,\text{out}} \leq 4$ A $I_{\text{motor_cable}} = i_{r,\text{out}}$ pour $4 \text{ A} < I_{r,\text{out}} < 10$ A $I_{\text{motor_cable}} = 10$ pour $I_{r,\text{out}} \geq 10$ A	A
f_{sw}	Fréquence de commutation du CDM	4 000 pour un CDM jusqu'à 90 kW 2 000 pour un CDM au-dessus de 90 kW	Hz

La variable de la Formule (7) est de nouveau le courant de sortie de l'onduleur I_{out} . Les pertes de commutation ne dépendent pas de la vitesse du moteur.

Si la fréquence de sortie de l'onduleur était égale à 0 Hz pendant toutes les durées de fonctionnement du CDM, la Formule (7) ne serait plus exacte. Néanmoins, par hypothèse, au moins une fréquence de sortie de faible valeur différente de 0 Hz (par exemple, 0,05 Hz) est déterminée pour la quasi-totalité des applications, de sorte que la Formule (7) doit être utilisée pour toutes les applications.

5.2.2.5 Pertes de commutation de la diode libre

Les pertes de commutation de la diode doivent être calculées de la même manière:

$$P_{L,sw,D} = \frac{E_D}{\pi} \cdot U_{DC} \cdot \sqrt{2} \cdot (I_{\text{out}} + I_{\text{motor_cable}}) \cdot f_{sw} \quad (8)$$

Les paramètres RCDM de la Formule (8) sont donnés au Tableau 7:

Tableau 7 – Paramètres de référence de la Formule (8)

Abréviation	Description	Valeur de paramètre RCDM	Unité
E_D	Énergie de perte de commutation de la diode de puissance par volt et par ampère	$2,5 \times 10^{-7}$	$\frac{J}{V \cdot A}$

5.2.2.6 Pertes totales de l'onduleur de sortie

Les pertes calculées aux Formules (5) à (8) définissent les pertes produites dans un semiconducteur de puissance individuel. La somme des pertes de l'onduleur de sortie pour un CDM triphasé comportant six transistors et diodes doit être calculée comme suit:

$$P_{L, \text{inverter}} = 6 \cdot (P_{L, \text{on}, T} + P_{L, \text{on}, D} + P_{L, \text{sw}, T} + P_{L, \text{sw}, D}) \quad (9)$$

5.2.3 Pertes du convertisseur d'entrée

5.2.3.1 Convertisseur à alimentation active

Si la section du convertisseur d'entrée est un convertisseur à alimentation active, ses pertes doivent être calculées de la même manière que pour la section de l'onduleur de sortie. Dans ce cas, le courant de sortie de la partie alimentation active du convertisseur est le courant réseau d'entrée du CDM.

La fréquence fondamentale côté courant alternatif du convertisseur à alimentation active est identique à la fréquence du réseau. Les valeurs possibles pour l'indice de modulation m sont donc limitées à celles proches de 1. Le facteur de déphasage, $\cos \phi$, entre le courant fondamental d'entrée et la tension fondamentale d'entrée est proche de 1 en cas de fonctionnement moteur du CDM ou de -1 en cas de fonctionnement en récupération. En raison de ce facteur de déphasage, le courant d'entrée du CDM est inférieur au courant de sortie du CDM pour les convertisseurs à alimentation active (AIC), il correspond à $I_{\text{out}} \cdot m \cdot \cos \phi$.

Par hypothèse, le CDM de référence ne comporte pas de convertisseur à alimentation active, mais un redresseur à diodes.

5.2.3.2 Redresseur à diodes

La composante fondamentale du courant d'entrée du CDM est proportionnelle à la puissance de sortie du CDM actif et est calculée par le produit du courant de sortie de l'onduleur, de l'angle de phase de sortie et de l'indice de modulation. La valeur efficace du courant d'entrée du CDM est en outre proportionnelle à un facteur $1/\lambda$. Le facteur λ , tel que défini dans la Formule (B.2) comme le rapport de la puissance d'entrée active à la puissance d'entrée apparente du CDM, est proportionnel au facteur de déphasage entre le courant d'entrée du CDM et diminue avec le contenu harmonique de la forme d'onde du courant d'entrée. Les valeurs normalisées de λ pour différentes topologies de redresseurs sont données en B.4.2.

Finalement, les pertes du redresseur doivent être calculées selon la Formule (10):

$$P_{L,rectifier} = 6 \cdot \left[\frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot m \cdot \cos \phi \cdot I_{out} \cdot U_{D,th,rectifier} + \frac{U_{D,r,rectifier} - U_{D,th,rectifier}}{\cos \phi_r \cdot I_{r,out}} \cdot \frac{\left(\frac{m \cdot \cos \phi \cdot I_{out}}{\lambda} \right)^2}{2} \right] \quad (10)$$

Les paramètres RCDM de la Formule (10) sont donnés au Tableau 8:

Tableau 8 – Paramètres de référence de la Formule (10)

Abréviation	Description	Valeur de paramètre RCDM	Unité
$U_{D,th,rectifier}$	Tension de seuil de la diode de puissance du redresseur	0,9	V
$U_{D,r,rectifier}$	Tension à l'état passant de la diode de puissance du redresseur au courant d'entrée assigné du CDM	2,2	V
λ	Facteur de puissance de la tension et du courant d'entrée du CDM	0,7	

Les variables de la Formule (10) sont données au Tableau 9:

Tableau 9 – Variables de la Formule (10)

Abréviation	Description	Unité
ϕ_r	Angle de phase entre la tension fondamentale de sortie du CDM et le courant fondamental de sortie du CDM au couple assigné selon le Tableau 2	°

5.2.4 Pertes de la bobine d'arrêt d'entrée

Les bobines d'arrêt d'entrée sont parfois utilisées pour réduire les harmoniques. L'inductance de la bobine d'arrêt décroît à mesure qu'augmente la puissance d'entrée du convertisseur. L'impédance de la bobine d'arrêt d'entrée est généralement choisie pour représenter une certaine partie $k1_{choke}$ de l'impédance assignée de l'onduleur U_{mL1}/I_{equ} . En partant du principe que la chute de tension dans la partie résistive de la bobine d'arrêt d'entrée représente une certaine partie $k2_{choke}$ de la chute totale de tension sur la bobine d'arrêt d'entrée, les pertes dans la bobine d'arrêt d'entrée doivent être calculées de la manière suivante:

$$P_{L,choke} = k1_{choke} \cdot k2_{choke} \cdot 3 \cdot \frac{\left(\frac{m \cdot \cos \phi \cdot I_{out}}{\lambda} \right)^2}{\cos \phi_r \cdot I_{r,out}} \cdot U_{mL1} \quad (11)$$

Les paramètres RCDM pour le convertisseur de référence dans la Formule (11) sont donnés au Tableau 10:

Tableau 10 – Paramètres de référence de la Formule (11):

Abréviation	Description	Valeur de paramètre RCDM	Unité
$k1_{choke}$	Impédance de la bobine d'arrêt, relative à l'impédance assignée du CDM	0,02	
$k2_{choke}$	Chute de tension relative sur la partie résistive de la bobine d'arrêt	0,25	
U_{mL1}	Tension de phase à terre du réseau d'alimentation	230	V

Les pertes des bobines d'arrêt à courant continu peuvent être calculées de la même manière que les pertes pour les bobines d'arrêt à courant alternatif.

Les pertes des filtres anti harmoniques de ligne basse fréquence sont calculées de la même manière parce que la plus grande partie de ces pertes a lieu dans la bobine d'arrêt et que les pertes dans les condensateurs du filtre peuvent être négligées.

5.2.5 Pertes de la liaison à courant continu

Comme expliqué dans l'Article B.5, les pertes de la liaison à courant continu sont principalement dues aux résistances exigées pour garantir le partage adéquat de la tension entre les condensateurs de liaison à courant continu et les résistances en série équivalentes à l'intérieur de chaque condensateur. Dans une approximation de premier ordre, la quantité de capacité de la liaison à courant continu est proportionnelle à la puissance assignée de l'onduleur. Les pertes indépendantes de la charge dans les résistances en parallèle par rapport aux condensateurs sont donc proportionnelles au courant de sortie assigné de l'onduleur. Elles sont en outre proportionnelles au carré de la tension de la liaison à courant continu. Les pertes dans la résistance en série équivalente du condensateur dépendent du carré de la partie courant alternatif du courant de sortie du redresseur. Les pertes causées par un courant d'onduleur haute fréquence sont suffisamment faibles pour être négligées. Les pertes de la liaison à courant continu doivent finalement être calculées comme suit:

$$P_{L,dc_link} = k1_{DC_link} \cdot I_{r,out} \cdot U_{DC}^2 + k2_{DC_link} \cdot \frac{\left(\frac{\sqrt{3}}{1,35} \cdot \frac{m \cdot \cos \phi \cdot I_{out}}{1 + 50 \cdot k1_{choke}} \right)^2}{I_{r,out}} \quad (12)$$

Les paramètres RCDM pour le convertisseur de référence dans la Formule (12) sont donnés au Tableau 11:

Tableau 11 – Paramètres de référence de la Formule (12)

Abréviation	Description	Valeur de paramètre RCDM	Unité
$k1_{DC_link}$	Paramètre de perte de liaison à courant continu indépendant de la charge	8×10^{-7}	$\frac{1}{\Omega \cdot A}$
$k2_{DC_link}$	Paramètre de perte de liaison à courant continu dépendant de la charge	2	$\Omega \cdot A$

La détermination des paramètres $k1_{DC_link}$ et $k2_{DC_link}$ pour un CDM est expliquée dans l'Article B.5.

5.2.6 Pertes des conducteurs de courant

Les pertes ohmiques sont par exemple générées dans les conducteurs de courant du CDM. Dans le modèle mathématique, ces pertes dépendent de l'amplitude du courant de sortie du CDM et de la résistance ohmique des conducteurs de courant. Cette résistance ohmique diminue de façon linéaire avec un courant de sortie assigné du CDM supérieur, car des CDM dont la puissance est plus élevée utilisent des conducteurs de courant de plus gros diamètre. La chute de tension au niveau des éléments de conducteur ohmique reste donc indépendante du courant assigné du CDM.

$$P_{L,rails} = \frac{U_{rails}}{I_{r,out}} I_{out}^2 \quad (13)$$

Le paramètre RCDM pour le CDM de référence dans la Formule (13) est donné au Tableau 12:

Tableau 12 – Paramètres de référence de la Formule (13)

Abréviation	Description	Valeur de paramètre RCDM	Unité
U_{rails}	Chute de tension des éléments de conducteur ohmique au courant assigné du CDM	0,7	V

5.2.7 Pertes de commande et de veille

Les pertes indépendantes de la charge sont expliquées à l'Article B.10. Pour obtenir des résultats comparables, ces pertes doivent être évaluées sans que soient raccordés des composants externes, comme des capteurs de position, l'électronique de communication et des freins de moteur. Pour le convertisseur de référence, la valeur de ces résultats doit être par hypothèse celle donnée dans le Tableau 13.

Tableau 13 – Paramètre de référence de la Formule (15)

Abréviation	Description	Valeur de paramètre RCDM	Unité
$P_{L,control}$	Pertes de commande et de veille	50	W

5.2.8 Facteur de perte de refroidissement

Les CDM à l'état de l'art utilisent un système de refroidissement pour transporter les pertes à température ambiante. Dans de nombreux cas, un ventilateur, par exemple, est utilisé, qui fait partie du CDM. Ce composant de refroidissement provoque des pertes supplémentaires. Dans le modèle mathématique, ces pertes sont calculées proportionnellement à toutes les autres pertes produites dans le CDM à son point de fonctionnement de pertes maximales.

$$P_{L,cooling} = k_{L,cooling} \cdot (P_{L,inverter(90;100)} + P_{L,rectifier(90;100)} + P_{L,rails(90;100)} + P_{L,DC_link(90;100)} + P_{L,choke(90;100)} + P_{L,control}) \quad (14)$$

Pour le RCDM, le paramètre de perte de refroidissement est défini à 20 % (voir Tableau 14):

Tableau 14 – Paramètre de référence de la Formule (14)

Abréviation	Description	Valeur de paramètre RCDM	Unité
$k_{L,cooling}$	Paramètre de perte de refroidissement	0,2	

5.2.9 Autres pertes du CDM

Toutes les pertes dans les autres parties du CDM sont négligées dans le modèle mathématique, car elles sont significativement plus faibles que les pertes décrites ci-dessus.

5.2.10 Pertes globales du CDM

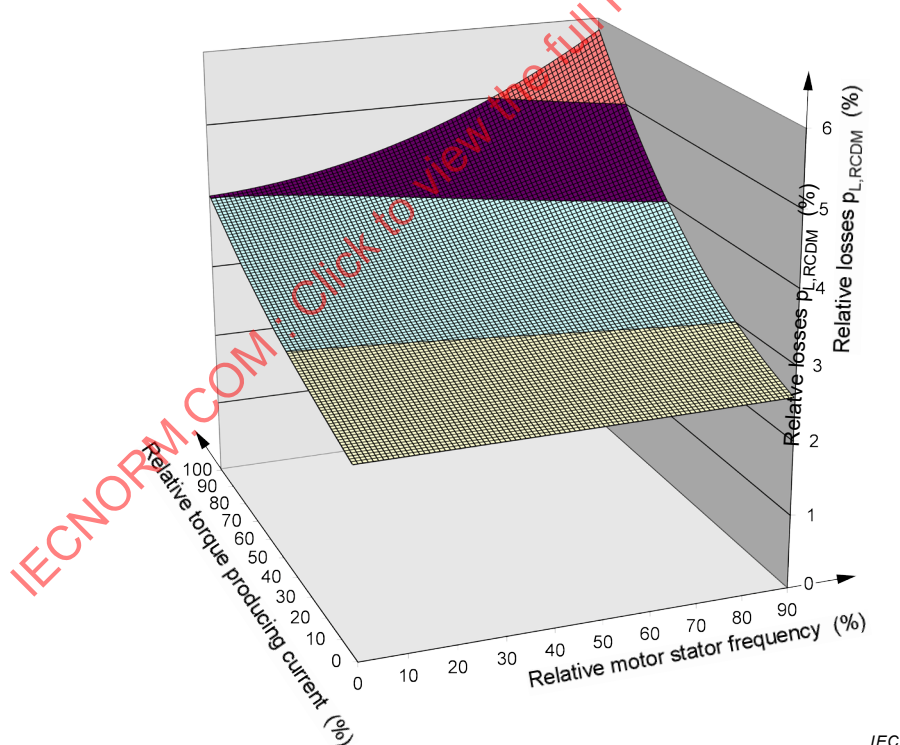
Toutes les pertes dans le CDM doivent être calculées par rapport à la puissance de sortie apparente assignée du PDS, formée par la tension de phase de sortie assignée et le courant de sortie assigné du CDM. Les pertes absolues du CDM obtenues finalement en 5.2 sont donc les suivantes:

$$P_{L,CDM} = P_{L,inverter} + P_{L,rectifier} + P_{L,choke} + P_{L,rails} + P_{L,DC_link} + P_{L,control} + P_{L,cooling} \quad (15)$$

Les pertes relatives du CDM sont donc les suivantes:

$$P_{L,CDM} = \frac{P_{L,CDM} / kW}{S_{r,eq} / kVA} \quad (16)$$

La Figure 12 ci-dessous représente la relation entre le courant relatif produisant le couple, la fréquence relative du stator du moteur et les pertes relatives $p_{L,CDM,relative}$ du CDM de référence de 9,95 kVA (voir Tableau 18) exploité à 400 V.



Anglais	Français
Relative losses	Pertes relatives
Relative torque producing current	Courant relatif produisant le couple
Relative motor stator frequency	Fréquence relative du stator du moteur

Figure 12 – Pertes relatives $p_{L,CDM}$ du RCDM de 9,95 kVA

Le Tableau 15 ci-dessous présente les pertes relatives du CDM de référence de 400 V/9,95 kVA aux points de fonctionnement définis à la Figure 6:

Tableau 15 – Pertes relatives du CDM de référence de 400 V/9,95 kVA aux points de fonctionnement décrits à la Figure 6

$S_{r,eq}$ kVA	I_{rout} A	$P_{L,RCDM}$ (0;25) %	$P_{L,RCDM}$ (0;50) %	$P_{L,RCDM}$ (0;100) %	$P_{L,RCDM}$ (50;25) %	$P_{L,RCDM}$ (50;50) %	$P_{L,RCDM}$ (50;100) %	$P_{L,RCDM}$ (90;50) %	$P_{L,RCDM}$ (90;100) %
9,95	14,4	2,80	3,09	4,02	2,86	3,28	4,64	3,61	5,84

La valeur 5,84 % des pertes se réfère à la puissance de sortie apparente assignée de 9,95 kVA, et la valeur de perte absolue est donc de 581 W. Les pertes relatives des RCDM avec une puissance assignée différente sont données pour le point de fonctionnement (90;100) au Tableau 18 et au Tableau A.1 pour tous les points de fonctionnement définis à la Figure 6.

5.3 Pertes du moteur

5.3.1 Généralités

L'utilisation des moteurs asynchrones triphasés est très répandue dans les applications industrielles. Ces moteurs sont des produits normalisés généralement capables de fonctionner directement sur le réseau ou sous une tension et une fréquence variables fournies par un CDM.

Afin de déterminer les pertes, les efficacités et la classe d'efficacité d'un PDS, des informations relatives aux pertes de moteur sont nécessaires à l'utilisateur. Ces informations peuvent être obtenues soit

- auprès du fabricant du moteur, soit
- à partir des pertes du moteur de référence indiquées à l'Annexe A, soit
- à partir des pertes types des machines IE2 normalisées indiquées à l'Annexe D.

La procédure d'interpolation indiquée à l'Annexe D doit être appliquée pour obtenir les pertes et l'efficacité à tout point de fonctionnement exigé (charge, couple), par exemple celles indiquées en 4.2, à partir des pertes spécifiées par le fabricant aux sept points de référence (voir Tableau F.2).

5.3.2 Pertes supplémentaires dues aux fréquences harmoniques des moteurs asynchrones triphasés alimentés par un CDM

Des pertes de moteurs à induction triphasés sont souvent présentes uniquement pour un fonctionnement sur le réseau sous une tension strictement sinusoïdale. Lorsque ce type de moteur fonctionne sur un CDM, les pertes supplémentaires dues aux fréquences harmoniques P_{LHL} sont générées par l'alimentation sous tension non sinusoïdale.

Il convient de préférence de soumettre le moteur à un contre-essai sur un CDM afin de déterminer ces pertes (voir Annexe D).

En variante, les pertes supplémentaires dues aux fréquences harmoniques peuvent être déterminées par un rapport fixe r_{HL} utilisé comme valeur d'estimation.

r_{HL} représente le rapport des pertes supplémentaires dues aux fréquences harmoniques de l'alimentation par le convertisseur par rapport aux pertes de l'alimentation du moteur avec une

tension d'entrée sinusoïdale à la puissance nominale et à la fréquence nominale (voir IEC 60034-2-3).

Les pertes totales sont:

$$P_{LHL} = r_{HL} \cdot P_{LTsin} \quad (17)$$

où

P_{LTsin} sont les pertes totales déterminées à une alimentation sinusoïdale à tout point de fonctionnement;

P_{LHL} sont les pertes totales estimées pour une alimentation par CDM à ce point de fonctionnement.

Les pertes supplémentaires dues aux fréquences harmoniques générées par une alimentation par le convertisseur doivent être considérées comme constantes et indépendantes de la charge et de la vitesse. Ces pertes dépendent de la fréquence de commutation.

À moins que les mesurages conformes à l'IEC 60034-2-3 ne permettent de déterminer r_{HL} , les estimations suivantes doivent être utilisées:

$r_{HL} = 0,15$ (15 %) pour les moteurs avec une puissance de sortie assignée jusqu'à 90 kW et une fréquence de commutation de 4 kHz

$r_{HL} = 0,25$ (25 %) pour les moteurs avec une puissance de sortie assignée supérieure à 90 kW et une fréquence de commutation de 2 kHz

5.3.3 Données du moteur de référence (RM)

Les pertes du moteur de référence sont indiquées à l'Annexe A.

Les valeurs données dans les tableaux ont été déduites des valeurs d'efficacité IE2 de 50 Hz des machines asynchrones à quatre pôles conformément à l'IEC 60034-30-1, du facteur r_{HL} décrit en 5.3.2, des facteurs K_{fe} , K_{ll} et K_{fw} de valeur identique fixée à 0,5 comme décrit dans l'Annexe D et d'un facteur de correction de chute de tension de $400/360 = 1,11$ à la vitesse assignée (voir Annexe D).

Les valeurs du moteur de référence de 50 Hz doivent également être utilisées dans des applications de 60 Hz.

5.4 PDS de référence (RPDS)

5.4.1 Pertes du PDS de référence

Les pertes de puissance électrique résultantes du PDS à un point de fonctionnement spécifique de vitesse (n) et de couple (T) correspondent à la somme des pertes de puissance électrique des sous-ensembles du PDS selon la Formule (18).

$$P_{L,PDS(n;T)} = P_{L,CDM(n;T)} + P_{L,Aux(n;T)} + P_{L,Mot(n;T)} \quad (18)$$

où

$P_{L,CDM}$ représente les pertes du CDM selon les méthodes en 5.2;

$P_{L,Mot}$ représente les pertes du moteur selon les méthodes en 5.3;

$P_{L,Aux}$ représente les pertes des dispositifs auxiliaires selon l'Annexe B.

Un PDS de référence (RPDS) est défini comme un moteur unique (RM) et un CDM unique (RCDM). Les dispositifs auxiliaires ne sont pas inclus dans le PDS de référence.

La sélection du RM et du RCDM correspondants pour le RPDS s'effectue en fonction de la puissance, voir Annexe A.

Les pertes sont généralement calculées selon la Formule (18). Toutefois, les pertes RPDS à une vitesse et à un couple à 100 % sont déterminées selon la Formule (19) en utilisant le point de fréquence à 90 % et le point de couple à 100 % du RCDM, ainsi que le point de vitesse à 100 % et de couple à 100 % du moteur.

La fréquence à 90 % pour le RCDM est utilisée pour éviter la surmodulation qui apparaîtrait pour la fréquence à 100 % du RCDM. La surmodulation diminue les pertes du CDM mais augmente les pertes dues aux fréquences harmoniques du moteur en raison d'un contenu harmonique plus élevé dans les tensions et courants du moteur.

Le calcul des pertes du RPDS utilise l'hypothèse selon laquelle les pertes du RCDM au point de fonctionnement de fréquence à 100 % et de tension à 90 % sont les mêmes que pour le point de fonctionnement à une fréquence à 90 % et une tension à 90 %. Par hypothèse, les pertes dues à la fréquence fondamentale du RM augmentent également par rapport à la Formule (18) avec un facteur de correction $k_{VD} = 1,11$ (selon une chute de tension de 10 % – voir l'Article D.4).

$$P_{L,RPDS(100;100)} = P_{L,RCDM(90;100)} + k_{VD} \cdot P_{L,RM(100;100)} \quad (19)$$

Le paramètre de référence de la Formule (19) est donné au Tableau 16.

Tableau 16 – Paramètre de référence de la Formule (19)

Abréviation	Description	Valeur	Unité
k_{VD}	Facteur de correction des pertes du moteur pour le RPDS, voir F.3.1.	1,11	

Pour le calcul des pertes d'un PDS réel, il est de la responsabilité du fournisseur du PDS d'ajouter toutes les pertes relevant du PDS, par exemple moteur, CDM, dispositifs auxiliaires (filtre, câble, etc.).

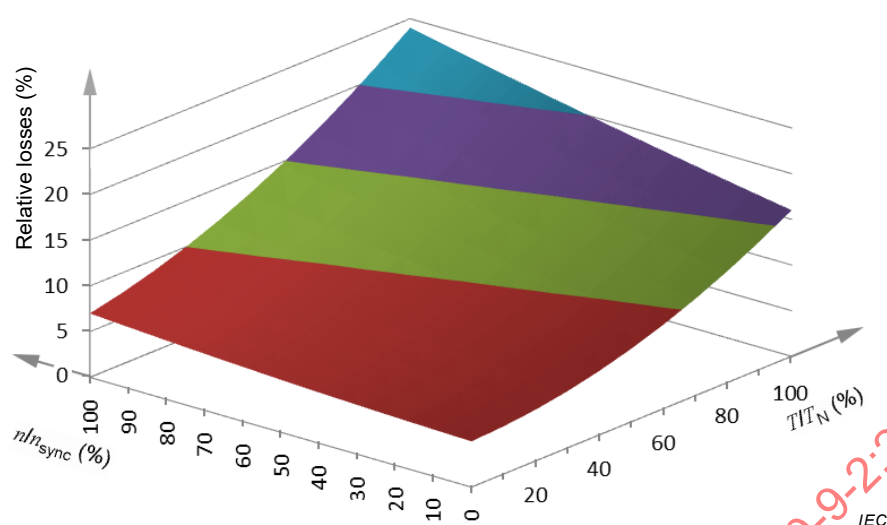
Le Tableau 17 suivant présente les pertes relatives d'un PDS de référence 400 V/7,5 kW (RCDM et RM) aux points de fonctionnement définis à la Figure 6:

Tableau 17 – Pertes relatives du RPDS 400 V/7,5 kW

$P_{r,M} / \text{kW}$	$P_{L,RPDS, \text{relative}} (0;25) / \%$	$P_{L,RPDS, \text{relative}} (0;50) / \%$	$P_{L,RPDS, \text{relative}} (0;100) / \%$	$P_{L,RPDS, \text{relative}} (50;25) / \%$	$P_{L,RPDS, \text{relative}} (50;50) / \%$	$P_{L,RPDS, \text{relative}} (50;100) / \%$	$P_{L,RPDS, \text{relative}} (100;50) / \%$	$P_{L,RPDS, \text{relative}} (100;100) / \%$
7,5	6,21	7,80	14,63	7,79	9,65	17,36	13,45	24,01

Le Tableau A.3 donne les pertes relatives du RPDS avec des puissances assignées différentes.

La Figure 13 donne un exemple de pertes relatives. Toutes les valeurs relatives se rapportent à la puissance de sortie assignée du PDS.



Anglais	Français
Relative losses	Pertes relatives

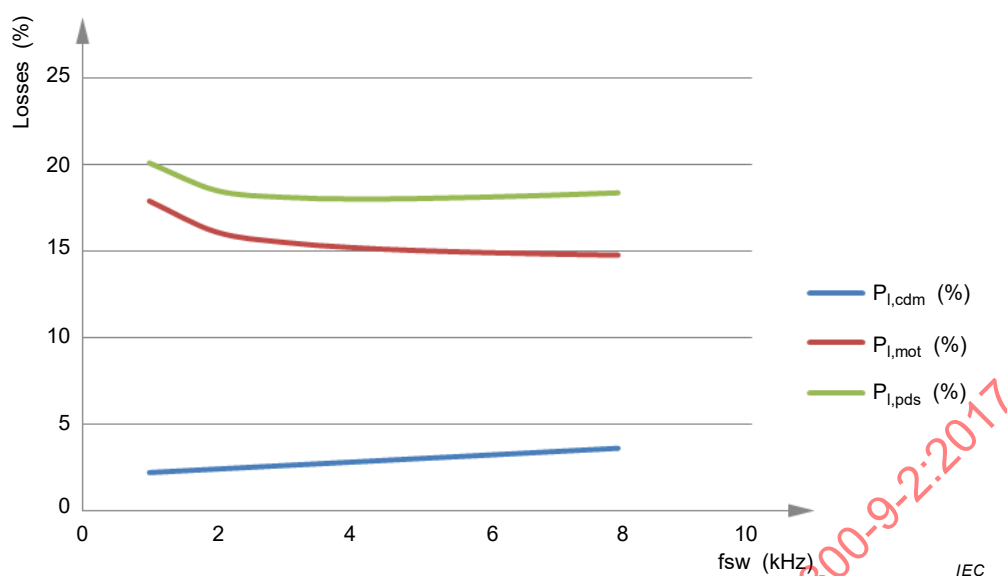
Figure 13 – Exemple de pertes relatives de puissance d'un PDS en fonction de la vitesse et du couple

5.4.2 Pertes du PDS à différentes fréquences de commutation

Les PDS fonctionnent souvent avec des paramètres différents de ceux qu'utilise le RPDS. La fréquence de commutation est un paramètre important pour calculer les pertes du CDM. Lorsque la fréquence de commutation augmente, les pertes du CDM augmentent également, mais les pertes supplémentaires dues aux fréquences harmoniques du moteur diminuent.

Les pertes résultantes de puissance d'un PDS pour une fréquence de commutation dédiée représentent la somme des pertes de puissance électrique des sous-ensembles du PDS, voir Formule (20) et exemple à la Figure 12, lorsque le point de fonctionnement (vitesse, couple) reste constant.

$$P_{L,PDS}(f_{sw}) = P_{L,CDM}(f_{sw}) + P_{L,Aux}(f_{sw}) + P_{L,Mot}(f_{sw}) \quad (20)$$



Anglais	Français
Losses	Pertes

Figure 14 – Exemple de pertes relatives de puissance par rapport à la fréquence de commutation

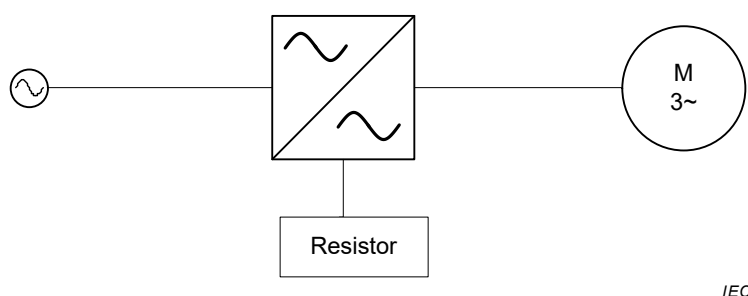
5.5 Pertes du PDS pour un fonctionnement en récupération

Certains PDS sont capables de traiter des charges régénératives, c'est-à-dire des charges qui produisent une puissance électrique. La puissance peut être produite en décélérant l'inertie d'une charge ou d'un moteur, ou à partir du couple que produit la charge (par exemple, l'air dans un ventilateur).

Certains PDS sont capables de transmettre au réseau la puissance produite en utilisant un convertisseur à alimentation active (AIC). La puissance transmise au réseau est la puissance produite, moins les pertes du PDS.

Un CDM peut aussi être capable de dissiper la puissance produite en chaleur, répartie à l'intérieur ou à l'extérieur du CDM (par exemple, par une résistance), voir Figure 14. La puissance dissipée dans la résistance est considérée comme une perte auxiliaire pour le calcul des pertes du PDS, voir Formule (18).

Un CDM peut également être capable de stocker l'énergie dans des batteries, condensateurs ou technologies similaires. Cette énergie peut être réutilisée ultérieurement lorsque la puissance active du moteur est nécessaire. Ces dispositifs de stockage provoquent des pertes qui doivent être ajoutées en tant que pertes auxiliaires lors du calcul des pertes du produit étendu.



Anglais	Français
Resistor	Résistance

Figure 15 – Exemple de CDM comportant une résistance pour dissiper la puissance produite

5.6 Pertes des démarreurs de moteurs

Dans le cadre des calculs de pertes, les pertes de puissance des démarreurs de moteurs (y compris les pertes de commande) conformément à la norme de produit IEC 60947-4-1, doivent être calculées comme étant égales à 0,1 % de la puissance assignée du moteur.

Les démarreurs à variation de fréquence conformément à la norme de produit IEC 60947-4-2 sont généralement mécaniquement en dérivation avec un cycle de service plus long (fonctionnement S1), et le calcul s'effectue donc comme pour les démarreurs de moteurs.

Les pertes de puissance des démarreurs de moteurs sont assez faibles pour que la même classe IE soit utilisée pour un moteur, ainsi que pour un moteur commandé par un démarreur.

6 Limites des classes IE et IES

6.1 Généralités

Les pertes ou l'efficacité du CDM de référence, du moteur de référence et du PDS de référence servent de base d'évaluation de la conformité à une classe IE ou IES d'un moteur, d'un CDM ou d'un PDS existant.

Les appareils de référence sont associés aux classes IE1 et IES1. Les appareils existants dont les pertes sont inférieures aux pertes de référence (c'est-à-dire que l'efficacité est meilleure) sont identifiés par des niveaux supérieurs à 1. Le seuil et la tolérance de chaque niveau sont spécifiés en 6.2 à 6.4.

La conformité à une classe IE ou IES peut être démontrée par des mesures ou des calculs décrits à l'Article 7. Les différents points d'essai représentés à la Figure 4 peuvent être utilisés pour déterminer les pertes et l'efficacité énergétique d'un système global pour une application spécifique.

Pour réduire le plus possible le processus de certification, la conformité à une classe IE doit être uniquement démontrée pour le CDM au courant assigné et à 90 % de la fréquence assignée du stator du moteur, respectivement la tension assignée du moteur.

La conformité à une classe IES doit être uniquement démontrée pour le PDS au couple assigné et à la vitesse assignée de l'arbre.

Le fonctionnement en récupération n'est pas pris en considération pour déterminer une classe IE ou IES pour un CDM ou un PDS.

NOTE Le courant de sortie assigné d'un CDM correspond à son courant de sortie maximum en régime établi.

6.2 CDM

Le CDM de référence est décrit par les paramètres donnés en 5.2. Ses pertes sont indiquées dans le Tableau 18.

La puissance assignée d'un RCDM est définie selon sa puissance de sortie apparente, qui influe fortement sur les pertes du CDM.

Étant donné que la puissance assignée des CDM est généralement conforme au courant de sortie plutôt qu'à la puissance de sortie apparente, le Tableau 18 donne des exemples de courants de sortie RCDM assignés pour les tensions d'alimentation normalisées typiques. La relation avec les puissances assignées normalisées du moteur définies dans l'IEC 60072-1 et l'IEC 60034-30-1 peut être consultée dans le Tableau A.1.

Tableau 18 – Pertes du CDM de référence pour la définition de la classe IE1

Puissance de sortie apparente $S_{r,eq}$	Pertes relatives $P_{L,RCDM(90,100)}$	Pertes absolues $P_{L,RCDM(90,100)}$	Exemples de courant de sortie du CDM à des tensions d'alimentation typiques			
kVA	%	kW	$I_{r,out} = \frac{S_{r,eq}}{\sqrt{3} \cdot U_{1,r,out}}$			
			$U_{1,r,out} = 200 \text{ V}$	$U_{1,r,out} = 400 \text{ V}$	$U_{1,r,out} = 460 \text{ V}$	$U_{1,r,out} = 690 \text{ V}$
			A			
0,278	35,85	0,100	0,803	0,401	0,349	0,233
0,381	27,30	0,104	1,10	0,550	0,478	0,319
0,500	21,80	0,109	1,44	0,722	0,627	0,418
0,697	16,84	0,117	2,01	1,01	0,875	0,583
0,977	13,21	0,129	2,82	1,41	1,23	0,818
1,29	11,02	0,142	3,73	1,86	1,62	1,08
1,71	9,51	0,163	4,94	2,47	2,15	1,43
2,29	8,21	0,188	6,62	3,31	2,88	1,92
3,30	7,20	0,237	9,54	4,77	4,15	2,76
4,44	6,72	0,299	12,8	6,41	5,58	3,72
5,85	6,39	0,374	16,9	8,44	7,34	4,89
7,94	6,01	0,477	22,9	11,5	9,96	6,64
9,95	5,84	0,581	28,7	14,4	12,5	8,32
14,4	5,43	0,781	41,6	20,8	18,1	12,1
19,5	5,18	1,01	56,2	28,1	24,4	16,3
23,9	5,05	1,21	68,9	34,4	30,0	20,0
28,3	4,97	1,41	81,6	40,8	35,5	23,6
38,2	4,87	1,86	110	55,2	48,0	32,0
47,0	4,79	2,25	136	67,8	58,9	39,3
56,9	4,75	2,70	164	82,1	71,4	47,6
68,4	4,74	3,24	197	98,7	85,8	57,2
92,8	4,69	4,35	268	134	116	77,6
111	4,66	5,17	321	160	139	93,0

Puissance de sortie apparente $S_{r,eq}$	Pertes relatives $P_{L,RCDM} (90,100)$	Pertes absolues $P_{L,RCDM} (90,100)$
kVA	%	kW
135	4,11	5,55
162	4,10	6,65
196	4,09	8,02
245	4,07	10,0
302	4,10	12,4
381	4,09	15,6
429	4,09	17,5
483	4,09	19,8
604	4,08	24,7
677	4,08	27,6
761	4,08	31,1
858	4,08	35,0
967	4,08	39,4
1 088	4,08	44,3
1 209	4,08	49,3

Exemples de courant de sortie du CDM à des tensions d'alimentation typiques			
$I_{r,out} = \frac{S_{r,eq}}{\sqrt{3} \cdot U_{1,r,out}}$			
$U_{1,r,out} = 200 \text{ V}$	$U_{1,r,out} = 400 \text{ V}$	$U_{1,r,out} = 460 \text{ V}$	$U_{1,r,out} = 690 \text{ V}$
A			
391	195	170	113
468	234	203	136
566	283	246	164
706	353	307	205
872	436	379	253
1 099	550	478	319
1 239	619	539	359
1 396	698	607	405
1 745	872	758	506
1 954	977	850	566
2 198	1 099	956	637
2 477	1 239	1 077	718
2 791	1 396	1 214	809
3 140	1 570	1 365	910
3 489	1 745	1 517	1 011

NOTE 1 Le passage de la fréquence de commutation de 4 kHz à 111 kVA à 2 kHz à 135 kVA provoque une discontinuité dans les valeurs de perte relative du RCDM $P_{L,RCDM}$ entre ces puissances assignées.

Si la puissance de sortie apparente assignée d'un CDM est comprise entre deux valeurs du Tableau 18, la valeur de perte relative $P_{L,RCDM}$ du RCDM avec la puissance assignée la plus élevée suivante doit être utilisée pour la détermination de la classe IE. Les pertes du RCDM données au Tableau 18 doivent être utilisées pour tous les CDM basse tension (de plus de 200 V à 1 000 V inclus). Pour une puissance assignée de sortie apparente donnée, les CDM dont la tension d'entrée peut atteindre 200 V sont considérés comme produisant des pertes plus élevées que les CDM dont la puissance assignée correspond à une tension d'entrée plus élevée. Afin de tenir compte de cet élément, les valeurs du Tableau 18 doivent être multipliées par un facteur de 1,35 (référence IEC TS 61800-8) pour l'évaluation de la classe IE pour un CDM dont la tension d'entrée assignée peut atteindre 200 V.

Un CDM doit être classé IE1 si ses pertes relatives se situent à ± 25 % de la valeur RCDM.

Un CDM doit être classé IE0 si ses pertes relatives sont supérieures de plus de 25 % à la valeur RCDM.

Un CDM doit être classé IE2 si ses pertes relatives sont inférieures de plus de 25 % à la valeur RCDM.

Ces définitions sont représentées à la Figure 16:

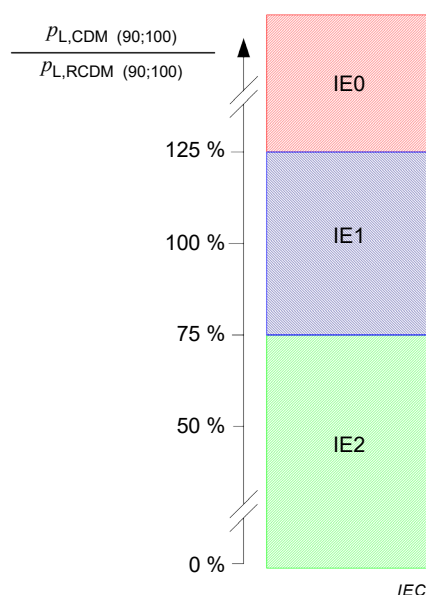


Figure 16 – Représentation des classes IE pour un CDM

NOTE 2 Dans le présent document, des classes limites sont définies pour les CDM jusqu'à IE2 uniquement. Les classes IE3 à IE9 sont réservées à la description de futures améliorations technologiques apportées aux CDM.

Dans le présent document, la détermination de classes IE n'est obligatoire que pour les CDM qui transforment une puissance d'entrée en courant alternatif en puissance de sortie en courant alternatif.

6.3 Moteur

Les classes IE pour les moteurs qui fonctionnent sur un CDM sont définies dans la série IEC 60034-30.

6.4 PDS

Les classes IES du système PDS sont définies par rapport aux pertes du RPDS. La classe IES1 du PDS est définie par le niveau des pertes du RPDS.

Un PDS doit être classé **IES1** si ses pertes relatives se situent à $\pm 20\%$ de la valeur spécifiée au Tableau 19.

Un PDS doit être classé **IES0** si ses pertes relatives sont supérieures de plus de 20 % à la valeur spécifiée au Tableau 19.

Un PDS doit être classé **IES2** si ses pertes relatives sont inférieures de plus de 20 % à la valeur spécifiée au Tableau 19.

Ces définitions sont représentées à la Figure 17:

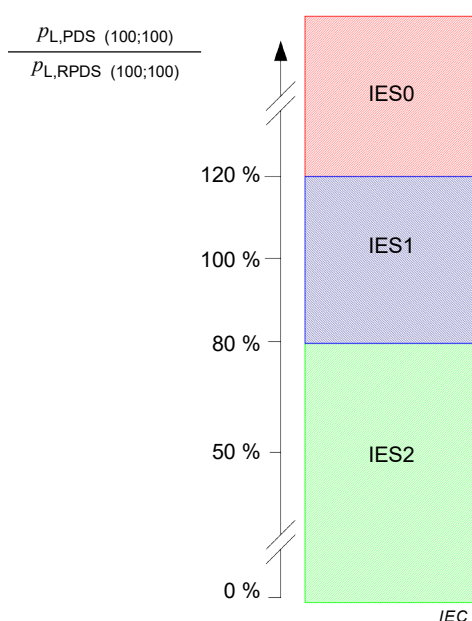


Figure 17 – Représentation des classes IES d'un PDS

Les pertes du PDS de référence sont décrites en 5.4.1. Ces pertes sont donc les suivantes:

Tableau 19 – Pertes du PDS de référence pour la définition de la classe IES 1

$P_{r,M}$ kW	$P_{L,RPDS} (100;100)$ % de $P_{r,M}$	$P_{L,RPDS} (100;100)$ kW
0,12	171,41	0,206
0,18	127,38	0,229
0,25	102,32	0,256
0,37	79,67	0,295
0,55	61,43	0,338
0,75	51,70	0,388
1,1	43,98	0,484
1,5	39,06	0,586
2,2	34,55	0,760
3	31,59	0,948
4	29,10	1,16
5,5	26,55	1,46
7,5	24,06	1,80
11	21,65	2,38
15	19,94	2,99
18,5	18,85	3,49
22	18,05	3,97
30	16,86	5,06
37	16,19	5,99
45	15,44	6,95
55	14,77	8,13

$P_{r,M}$ kW	$P_{L,RPDS(100;100)}$ % de $P_{r,M}$	$P_{L,RPDS(100;100)}$ kW
75	13,91	10,4
90	13,63	12,3
110	13,15	14,5
132	12,80	16,9
160	12,45	19,9
200	12,09	24,2
250	12,06	30,1
315	12,05	38,0
355	12,05	42,8
400	12,04	48,2
500	12,03	60,2
560	12,04	67,4
630	12,03	75,8
710	12,03	85,4
800	12,04	96,3
900	12,04	108
1 000	12,04	120

Si la puissance assignée d'un PDS se situe entre deux valeurs du Tableau 19, la valeur de perte relative $P_{L,RPDS(100;100)}$ du RPDS avec la puissance assignée supérieure suivante doit être utilisée pour déterminer la classe IES.

7 Détermination des pertes

7.1 Généralités

L'Article 7 a pour objectif de définir les essais de type qui doivent être réalisés sur le CDM pour vérifier le classement IE et sur le PDS pour vérifier le classement IES. Dans le présent document, les méthodes de détermination des classes d'énergie IE du CDM et des classes IES du PDS sont considérées comme des essais de type du CDM et du PDS. Des procédures de détermination des pertes du CDM et du PDS dans des conditions de charge partielle sont en outre définies.

Si la spécification d'un CDM ne comporte que la puissance active, son courant de sortie doit être calculé selon la Formule (3). Sa puissance de sortie apparente assignée doit être calculée selon la Formule (4).

Les pertes et les classes IE/IES doivent être calculées et mesurées à une tension d'entrée assignée conformément au Tableau 1 de l'IEC 60038:2009. De plus, la tension assignée de l'équipement et – dans le cas du PDS – la vitesse assignée du moteur doivent être indiquées dans la documentation.

7.2 Essais de type du CDM pour le classement IE

Pour définir la classe d'efficacité énergétique IE d'un CDM, des essais de type doivent être réalisés. Les classes d'efficacité énergétique IE sont définies à partir d'un seul point de fonctionnement selon 6.1. Les pertes à ce point doivent être déterminées à l'aide de l'une des solutions suivantes:

- détermination des pertes d'éléments uniques, décrite en 7.5;
- mesurage d'entrée-sortie selon 7.7 (la procédure d'essai est indiquée en 7.7.3.4 et les conditions d'essai sont décrites en 7.9);
- méthode de mesure calorimétrique selon 7.8 (les conditions d'essai sont décrites en 7.9).

Le fabricant peut choisir l'une des trois solutions.

NOTE Les laboratoires d'essai utilisent des méthodes de détermination basées sur les mesurages, c'est-à-dire une méthode de détermination calorimétrique ou une méthode de détermination d'entrée-sortie.

Le courant de sortie du CDM et le facteur de déphasage sont définis dans le Tableau 1 et le Tableau 2.

S'il est prévu qu'un CDM utilise un moteur non asynchrone, il doit faire l'objet d'un essai avec une charge d'essai appropriée, et les écarts par rapport aux conditions d'essai décrites en 7.9 doivent être indiqués dans la documentation de l'utilisateur et dans le rapport d'essai.

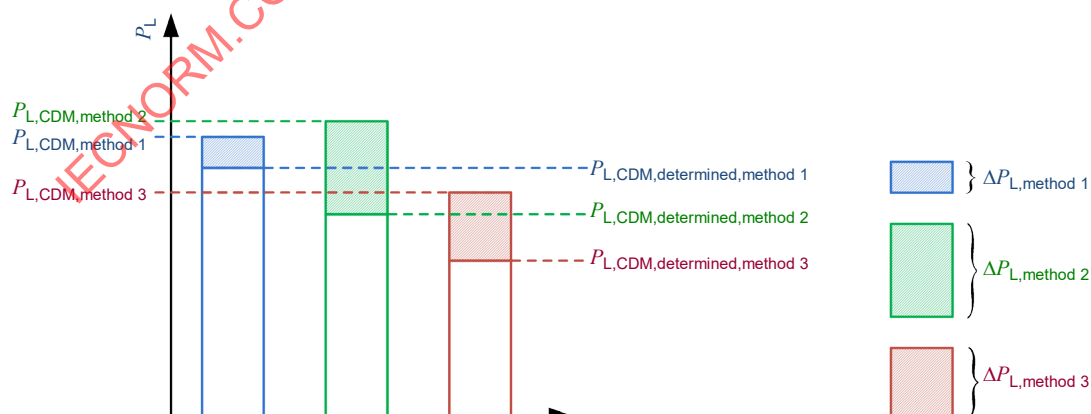
Les pertes exigées pour le classement de l'efficacité énergétique IE doivent être calculées à partir des pertes déterminées $P_{L,CDM,determined}$ et de l'incertitude de mesure selon la formule suivante:

$$P_{L,CDM} = P_{L,CDM,determined} + \Delta P_{L,CDM} = P_{L,CDM,determined} \cdot (1 + \Delta P_{L,CDM}) \quad (21)$$

Cette valeur corrigée de perte de puissance doit être utilisée pour définir les pertes relatives de puissance du CDM.

L'incertitude de la méthode utilisée doit être ajoutée à la valeur de perte déterminée, comme le décrit la Figure 18.

Le fabricant doit déterminer l'incertitude de la méthode choisie pour déterminer les pertes. Il est responsable de l'application de l'incertitude correcte. L'incertitude appliquée doit être basée sur les erreurs qui se produisent aléatoirement avec une distribution normale à deux écarts-types (par exemple, niveau de confiance de 95 %). Les incertitudes typiques des différentes méthodes de détermination et une méthode de calcul de l'incertitude de perte sont données à l'Annexe F.



IEC

Figure 18 – Pertes du CDM correspondant à la somme des pertes déterminées et de l'incertitude de la méthode de détermination

7.3 Essais de type du PDS pour le classement IES

Le fabricant doit réaliser des essais de type pour définir la classe d'efficacité énergétique IES d'un PDS. Les classes d'efficacité énergétique IES sont définies à partir d'un seul point de fonctionnement selon 6.1. Les pertes à ce point doivent être déterminées à l'aide de l'une des solutions suivantes:

- calcul des pertes selon 7.6;
- mesurage d'entrée-sortie selon 7.7 (la procédure d'essai est indiquée en 7.7.3.5 et les conditions d'essai sont décrites en 7.10).

Le fabricant peut choisir l'une des deux solutions.

NOTE Les laboratoires d'essai utilisent la méthode de détermination d'entrée-sortie.

La méthode de mesure calorimétrique est exclue étant donné qu'elle est difficile à réaliser sur les moteurs électriques.

Les pertes exigées pour le classement de l'efficacité énergétique IES doivent être calculées à partir des pertes déterminées $P_{L,PDS,determined}$ et de l'incertitude de mesure selon la formule suivante:

$$P_{L,PDS} = P_{L,PDS,determined} + \Delta P_{L,PDS} = P_{L,PDS,determined} (1 + \Delta p_{L,PDS}) \quad (22)$$

Cette valeur corrigée de perte de puissance doit être utilisée pour définir les pertes relatives de puissance d'un PDS.

Le fabricant doit déterminer l'incertitude de la méthode choisie pour déterminer les pertes. Il est responsable de l'application de l'incertitude correcte. L'incertitude appliquée doit être basée sur les erreurs qui se produisent aléatoirement avec une distribution normale. Les incertitudes typiques des différentes méthodes de détermination et une méthode de calcul de l'incertitude de perte sont données à l'Annexe F.

7.4 Procédures de détermination des pertes du CDM et du PDS dans un fonctionnement de charge partielle

Le fabricant doit mentionner les pertes de puissance du CDM ou du PDS selon les points de charge partielle comme défini en 4.2.

Pour les CDM, les pertes doivent être déterminées selon la même approche que pour la détermination de la classe IE en 7.2. Le fabricant doit mentionner les pertes de puissance de charge partielle pour le CDM avec les incertitudes comme le décrit la Formule (21).

Pour les PDS, les pertes doivent être déterminées selon la même approche que pour la détermination de la classe IES en 7.3. Le fabricant doit mentionner les pertes de puissance de charge partielle pour le PDS avec les incertitudes comme le décrit la Formule (22).

NOTE Les laboratoires d'essai utilisent des méthodes de détermination basées sur les mesurages, c'est-à-dire une méthode de détermination calorimétrique ou une méthode de détermination d'entrée-sortie.

7.5 Calcul des pertes du CDM

Le modèle présenté en 5.2 peut être utilisé pour déterminer les pertes d'un CDM par calcul. Le fabricant est autorisé à utiliser un modèle de calcul différent ou à effectuer des simulations de pertes. Les fabricants sont responsables de l'application des exactitudes correctes dans la Formule (21).

Les calculs de pertes du CDM doivent être effectués par rapport aux données du fabricant des composants, aux valeurs typiques des semiconducteurs de puissance à la température

de fonctionnement réelle du CDM ou à la température de fonctionnement maximale spécifiée dans la fiche technique.

Les paramètres qui influent sur les pertes des composants du CDM doivent être déterminés aux points de fonctionnement exigés. En l'absence de données du fabricant relatives aux pertes, ces dernières doivent être déterminées par mesurage.

NOTE Pour certains composants du CDM, les mesurages des pertes sont faciles à effectuer. Un des moyens possibles de déterminer les pertes du CDM consiste à combiner les pertes mesurées et les pertes calculées.

En fin de compte, les différentes pertes individuelles sont calculées ou mesurées séparément, et les pertes totales du CDM ($P_{L,CDM,determined}$) sont déterminées comme la somme de toutes les pertes individuelles.

7.6 Calcul des pertes des PDS

Les pertes des PDS peuvent être déterminées par calcul selon les Formules (18) et (19). Lors du calcul des pertes des PDS avec un RCDM, aucune tolérance ne doit être ajoutée aux pertes du CDM. Si les pertes des PDS sont calculées avec le RM, les tolérances conformes à l'IEC 60034-1 doivent être ajoutées aux pertes du PDS final.

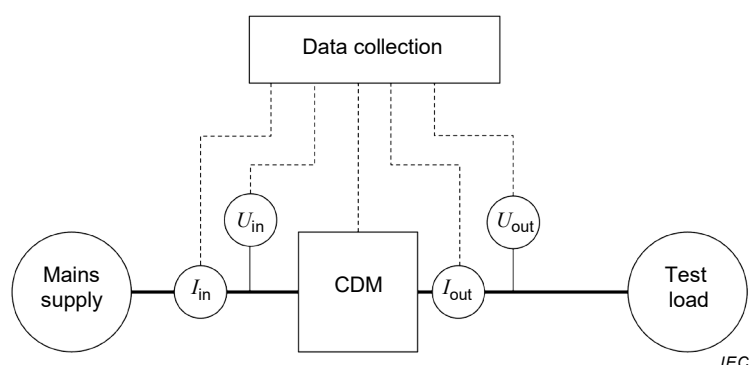
7.7 Méthode de mesure d'entrée-sortie

7.7.1 Mesurage d'entrée-sortie des pertes du CDM

La méthode de détermination d'entrée-sortie des pertes du CDM repose sur les mesurages de la puissance électrique à l'entrée et à la sortie du CDM. L'installation de mesure est représentée à la Figure 19. Les pertes du CDM doivent être déterminées à l'aide de la formule:

$$P_{L,CDM,determined} = P_{in,CDM} - P_{out,CDM} \quad (23)$$

La puissance d'entrée P_{in} est déterminée sur la base des tensions d'entrée U_{in} et des courants d'entrée I_{in} mesurés par un analyseur de puissance. En conséquence, la puissance de sortie P_{out} est déterminée sur la base des tensions de sortie U_{out} et des courants de sortie I_{out} mesurés par un analyseur de puissance. Le mesurage de la puissance de sortie du CDM doit être effectué directement aux bornes de sortie du CDM. L'exactitude de cette méthode est limitée par l'exactitude de l'appareil de mesure disponible.



Anglais	Français
Data collection	Collecte des données
Mains supply	Alimentation réseau
CDM	CDM
Test load	Charge d'essai

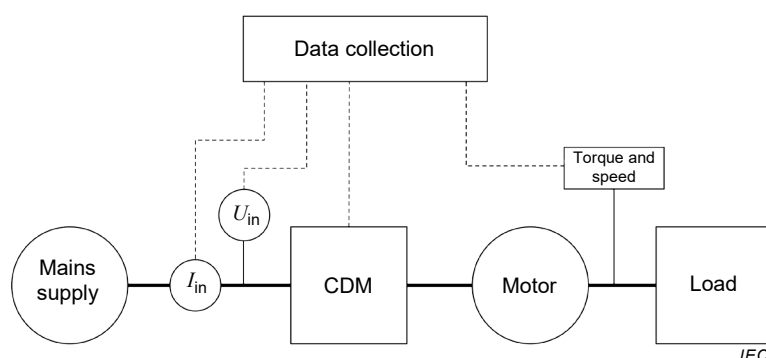
Figure 19 – Installation de mesure d'entrée-sortie pour la détermination des pertes du CDM

7.7.2 Mesurage d'entrée-sortie des pertes du PDS

La méthode de détermination d'entrée-sortie des pertes du PDS repose sur les mesurages de la puissance électrique à l'entrée et de la puissance mécanique à la sortie du PDS. L'installation de mesure est représentée à la Figure 20. Les pertes du PDS doivent être déterminées à l'aide de la formule:

$$P_{L,PDS,determined} = P_{in,PDS} - P_{out,PDS} \quad (24)$$

La puissance d'entrée $P_{in,PDS}$ est déterminée sur la base des tensions d'entrée U_{in} et des courants d'entrée I_{in} mesurés par un analyseur de puissance. La puissance de sortie $P_{out,PDS}$ est déterminée sur la base du couple et de la vitesse mesurés du moteur. L'exactitude de cette méthode est limitée par l'exactitude de l'appareil de mesure disponible.



Anglais	Français
Data collection	Collecte des données
Torque and speed	Couple et vitesse
Mains supply	Alimentation réseau
CDM	CDM
Motor	Moteur
Load	Charge

Figure 20 – Installation de mesure d'entrée-sortie des pertes du PDS

7.7.3 Exigences relatives aux méthodes de mesure d'entrée-sortie

7.7.3.1 Généralités

De légères fluctuations concernant la puissance de sortie et d'autres grandeurs mesurées peuvent être inévitables lorsque des essais sont effectués sur le CDM ou le PDS en charge. Plusieurs mesurages doivent par conséquent être échantillonnés simultanément pour chaque point de charge sur une certaine durée (au moins plusieurs cycles de glissement, généralement de 1 min à 3 min), et la moyenne de ces valeurs doit être utilisée pour déterminer les pertes.

Étant donné les harmoniques rencontrés dans les convertisseurs, l'appareil de mesure doit être choisi selon la plage des fréquences appropriées avec une exactitude suffisante.

7.7.3.2 Analyseur de puissance et transducteurs

L'instrumentation utilisée pour mesurer la puissance et le courant à l'entrée ou à la sortie du CDM doit satisfaire aux exigences de l'IEC 60034-2-1.

L'incertitude spécifiée par le fabricant des wattmètres doit être de 0,2 % de S_{equ} ou plus pour la puissance active totale à 50 Hz/60 Hz. Il s'agit de l'incertitude totale pour le wattmètre, y compris les capteurs éventuels.

La bande passante des wattmètres et des capteurs doit être suffisamment large pour assurer une erreur de la puissance active totale inférieure ou égale à 0,3 % de S_{equ} .

NOTE 1 La puissance de sortie apparente d'un CDM à la fréquence de commutation ne dépasse généralement pas 5 % de la puissance de sortie assignée totale. La puissance de sortie à des fréquences plus élevées diminue selon une fonction d'élévation au carré. Par conséquent, une bande passante comprise entre 0 Hz et 10 fois la fréquence de commutation f_{sw} est suffisante pour mesurer la puissance de sortie du convertisseur MLI.

L'étendue de mesure doit être choisie correctement par rapport aux courants et tensions mesurés.

Il est préférable de fournir le courant et la tension directement dans l'analyseur de puissance. Si un transducteur externe de courant est exigé, des transducteurs inductifs, des shunts à large bande passante ou des transducteurs à flux nul peuvent être utilisés.

NOTE 2 Lorsque des composants à courant continu sont présents, les transducteurs inductifs ne s'appliquent pas.

NOTE 3 Les transducteurs inductifs présentent des incertitudes et/ou des limitations d'amplitude plus grandes à des fréquences inférieures plutôt qu'à la fréquence nominale.

Tous les câbles utilisés pour transmettre des signaux de mesure doivent être installés avec précaution, et il convient si possible de les protéger au moyen d'un blindage.

7.7.3.3 Sortie mécanique du moteur

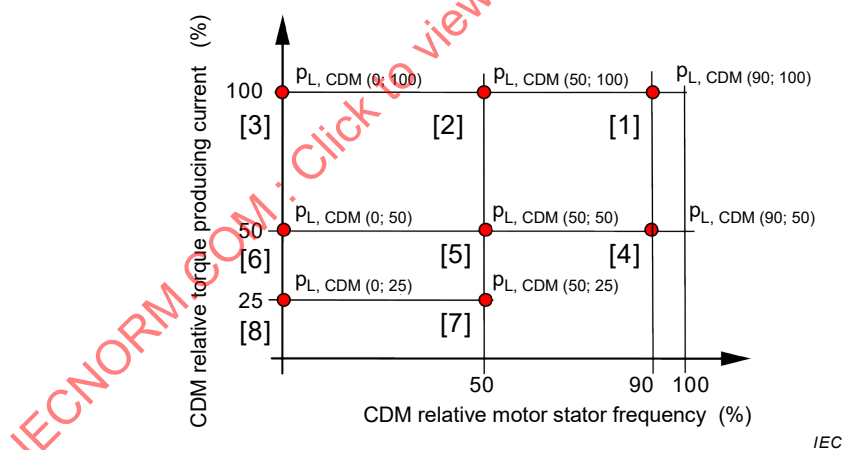
L'instrumentation destinée à mesurer le couple et la vitesse à la sortie du moteur doit satisfaire aux exigences de l'IEC 60034-2-1:2014.

7.7.3.4 Détermination des pertes du CDM selon la méthode d'entrée-sortie

La procédure de mesure suivante détermine les pertes aux huit points de charge exigés d'un CDM.

La procédure commence avec un fonctionnement à chaud initial du CDM nécessaire pour obtenir une température stable à la vitesse et à la charge assignées. La procédure d'essai inclut trois autres périodes de fonctionnement à des vitesses et des couples plus faibles. L'ordre des mesurages exigé est représenté à la Figure 21 (voir les chiffres entre crochets).

À tous les points d'essai, la tension relative de sortie du CDM (en pourcentage) ne doit pas être inférieure à la fréquence relative de sortie du CDM (en pourcentage).



Anglais	Français
CDM relative Torque producing current	Courant relatif du CDM produisant le couple
CDM relative Motor stator frequency	Fréquence relative du stator du moteur du CDM

Figure 21 – Ordre des mesurages du CDM de [1] à [8]

Le CDM est d'abord exploité à une fréquence à 90 % et à un courant à 100 % [1] jusqu'à ce qu'il atteigne la stabilité thermique (mesurée, par exemple, sur le dissipateur thermique, dans le débit d'air de sortie, les paramètres d'affichage, etc.). La stabilité est atteinte lorsque le taux d'échauffement est inférieur à 1 K par 30 min.

Une fois la stabilité thermique atteinte, la tension, le courant, la puissance et le facteur de puissance aux bornes d'entrée et de sortie du CDM doivent être mesurés et enregistrés.

Tous les autres points de fonctionnement doivent être mesurés immédiatement dans l'ordre successif, toutefois avec des fluctuations moyennées, voir 7.7.3.1, une fois accompli le premier point de fonctionnement [1]. Toutes les données exigées au premier point de charge doivent être également enregistrées à chaque point de charge.

Les points de fonctionnement à une fréquence assignée à 50 % [2] et à 0 % [3] doivent être mesurés avec des paramètres de charge non modifiés.

Puis, le courant produisant le couple doit être réduit à 50 % de sa valeur assignée pour les mesurages à une fréquence assignée à 90 % [4], 50 % [5] et 0 % [6].

Enfin, le courant produisant le couple doit être réduit à 25 % de sa valeur assignée pour les mesurages à une fréquence assignée à 50 % [7] et 0 % [8].

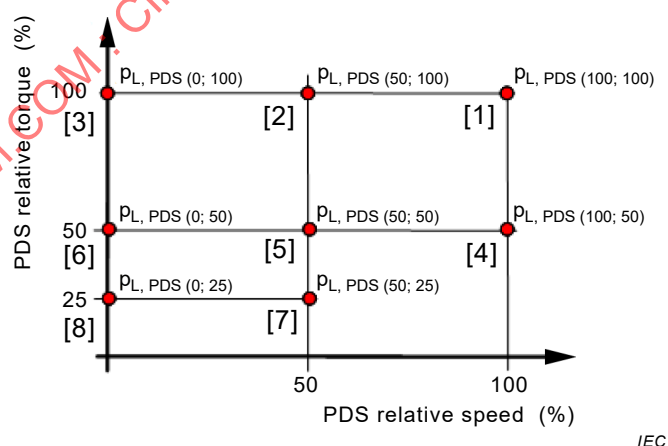
Dans certains cas, les essais peuvent s'avérer plus pratiques lorsque tous les points sont soumis à essai à une fréquence après l'autre. Par conséquent, il est admis de modifier l'ordre des points d'essai comme suit: [1] – [4] – [2] – [5] – [7] – [3] – [6] – [8].

Pour pallier les limitations de l'appareil de mesure du commerce à basse fréquence, il est acceptable de mesurer les pertes du CDM à une fréquence maximale de 12 Hz au lieu d'une fréquence nulle. Ces pertes doivent être utilisées sans extrapolation supplémentaire comme les pertes aux points de charge [3], [6] et [8]. Ces points d'essai doivent être fournis dans la documentation du fabricant.

7.7.3.5 Détermination des pertes du PDS selon la méthode d'entrée-sortie

La procédure de mesure suivante détermine les pertes aux huit points de charge exigés d'un PDS.

La procédure commence avec un fonctionnement à chaud initial du PDS nécessaire pour obtenir une température stable à la vitesse et à la charge assignées. La procédure d'essai inclut trois autres périodes de fonctionnement à des vitesses et des couples plus faibles. L'ordre des mesurages exigé est représenté à la Figure 22 (voir les chiffres entre crochets).



IEC

Anglais	Français
PDS relative Torque producing current	Courant relatif du PDS produisant le couple
PDS relative Motor stator frequency	Fréquence relative du stator du moteur du PDS

Figure 22 – Ordre des mesurages du PDS de [1] à [8]

Le PDS est d'abord exploité au couple et à la vitesse assignés complets [1] jusqu'à la stabilité de l'échauffement du moteur (défini comme la température externe du moteur mesurée

directement à la surface du carter du stator – et non au sommet des ailettes de refroidissement ni au niveau de la boîte à bornes – moins la température de l'air ambiant). La stabilité est atteinte lorsque le taux d'échauffement est inférieur à 1 K par 30 min. Par hypothèse, du fait de la constante de temps réduite, la stabilité thermique de l'équipement électronique de puissance associé au moteur est également atteinte au même moment.

Lorsque la stabilité thermique est atteinte, la tension d'alimentation, le courant d'entrée, la puissance d'entrée, le facteur de puissance d'entrée, ainsi que le couple et la vitesse de l'arbre doivent être mesurés et enregistrés.

Tous les autres points de fonctionnement doivent être mesurés immédiatement dans l'ordre successif, toutefois avec des fluctuations moyennées, voir 7.7.3.1, une fois accompli le premier point de fonctionnement [1]. Toutes les données exigées au premier point de charge doivent être enregistrées à chaque point de charge.

Les points de fonctionnement à une vitesse assignée à 50 % [2] et à 0 % [3] doivent être mesurés avec des paramètres de couple non modifiés.

Le couple du moteur doit alors être réduit à 50 % de sa valeur assignée, et les mesurages doivent être effectués à une vitesse assignée à 100 % [4], 50 % [5] et 0 % [6].

Enfin, le couple du moteur doit être réduit à 25 % de sa valeur assignée pour les mesurages à une vitesse assignée à 50 % [7] et 0 % [8].

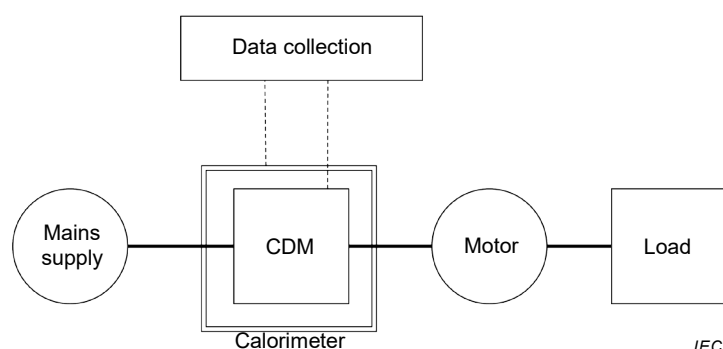
Dans certains cas, les essais peuvent s'avérer plus pratiques lorsque tous les points sont soumis à essai à une fréquence après l'autre. Par conséquent, il est admis de modifier l'ordre des points d'essai comme suit: [1] – [4] – [2] – [5] – [7] – [3] – [6] – [8].

Étant donné que les moteurs électriques présentent une répartition inégale du courant et par conséquent un échauffement inégal de leurs bobines lorsque la fréquence d'alimentation est nulle ou très proche d'une valeur nulle, les pertes du PDS peuvent également être indiquées pour une vitesse correspondant à une fréquence de stator maximale de 12 Hz au lieu d'une vitesse nulle. Ces pertes doivent être utilisées sans extrapolation supplémentaire comme les pertes aux points de charge [3], [6] et [8].

7.8 Mesurage calorimétrique des pertes du CDM

Pour les mesurages calorimétriques, le débit et les températures du milieu de refroidissement permettent de mesurer les pertes du CDM.

L'installation de mesure est représentée à la Figure 23. Les conditions d'essai sont décrites en 7.9. Des procédures et des méthodes d'essai détaillées sont décrites à l'Annexe G.



Anglais	Français
Data collection	Collecte des données
Mains supply	Alimentation réseau
CDM	CDM
Calorimeter	Calorimètre
Motor	Moteur
Load	Charge

Figure 23 – Installation de mesure calorimétrique pour la détermination des pertes du CDM

7.9 Conditions d'essai pour les essais du CDM

Les conditions et procédures d'essai sont très importantes pour les résultats et pour assurer la reproductibilité et la comparaison des mesurages entre différents fabricants et laboratoires d'essai. Les exigences suivantes sont obligatoires. Toutes les conditions de fonctionnement doivent être enregistrées et documentées, voir 8.4.

- Le réglage de la fréquence de commutation et du modèle d'impulsions doit être le réglage en usine par défaut tel que défini par le fabricant.
- Les points de fonctionnement sont conformes à la Figure 21.
- À tous les points d'essai, la tension relative de sortie du CDM (en pourcentage) ne doit pas être inférieure à la fréquence relative de sortie du CDM (en pourcentage).
- Les mesurages doivent être effectués selon la procédure de mesure décrite en 7.7.3.4.
- La tension et la fréquence d'entrée du CDM doivent être réglées sur les valeurs assignées.
- Le facteur de crête de la tension d'alimentation doit être compris entre 1,35 et 1,44.
- Le rapport de court-circuit du CDM et du réseau d'alimentation doit se situer dans la plage comprise entre 50 et 200 pour un CDM avec une puissance de sortie apparente assignée jusqu'à et y compris 111 kVA et entre 5 et 50 pour un CDM avec une puissance de sortie assignée supérieure à 111 kVA.
- Le courant de sortie du CDM ne doit pas être inférieur aux valeurs données dans le Tableau 1 dans la mesure où un courant de sortie de l'onduleur inférieur entraîne des pertes réduites.
- Il est admis d'utiliser une charge électronique au lieu d'un moteur électrique réel.
- Le facteur de déphasage du courant fondamental de la charge en rapport avec la tension fondamentale doit être conforme aux facteurs de déphasage donnés dans le Tableau 2 avec une tolérance de $\pm 0,08$. Parfois il n'est pas possible d'utiliser le facteur de déphasage du tableau aux points de fonctionnement de charge partielle. Dans ce cas, un

facteur de déphasage aussi proche que possible qui ne nécessite pas de modifier la taille du moteur doit être utilisé et indiqué dans la documentation.

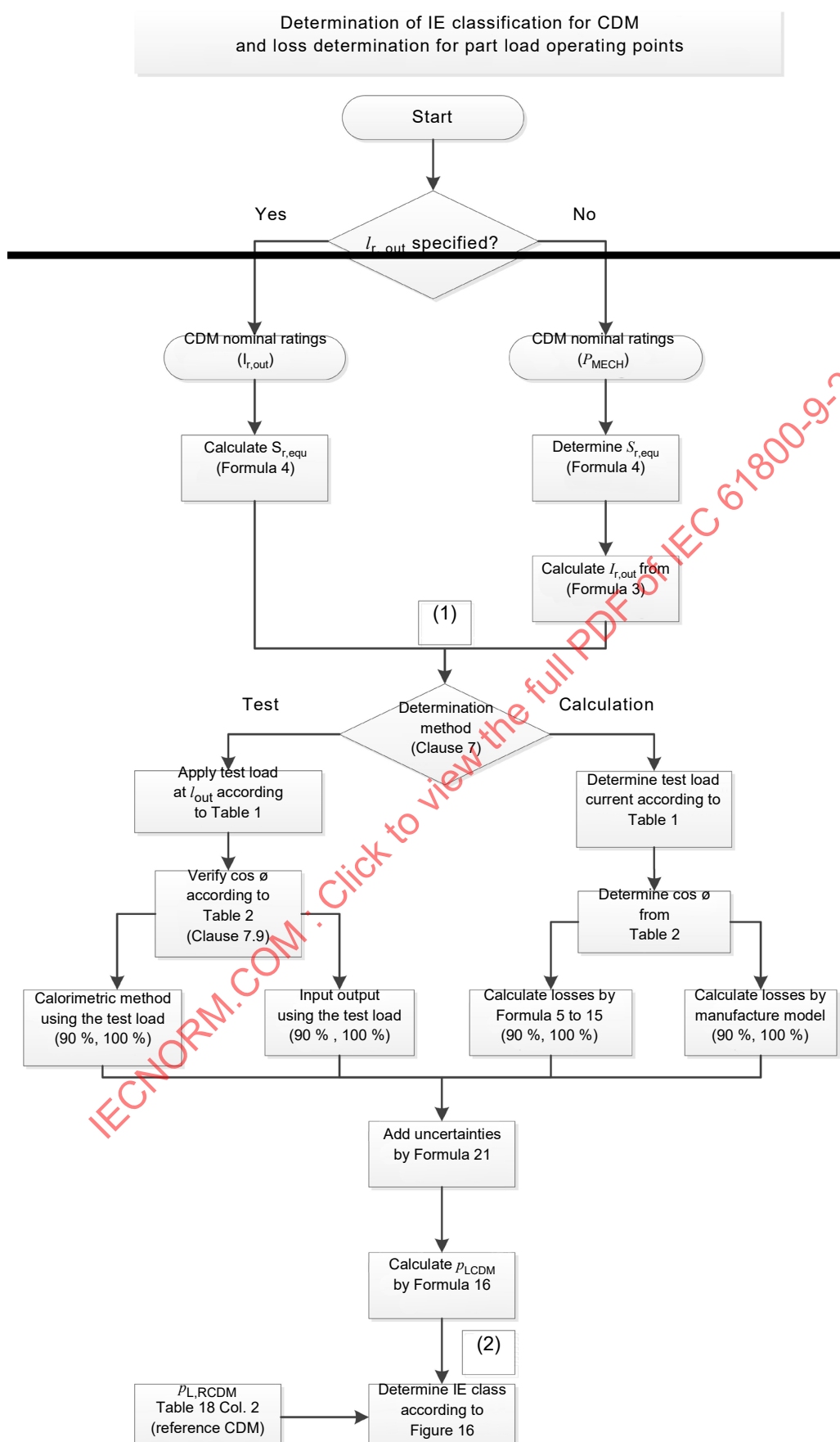
- Dans le cas où le courant de sortie assigné du CDM se situe entre deux valeurs données dans le Tableau 18, le plus grand moteur suivant doit être utilisé.
- La charge d'essai pour le mesurage des pertes du CDM doit être choisie de façon à ce que le THD du courant de sortie fondamental du CDM soit inférieur ou égal à 5 %. Une distorsion plus importante entraîne des pertes plus importantes du CDM.
- Sauf spécification contraire, les CDM dont la puissance de sortie apparente assignée est inférieure à 8 kVA doivent être mesurés avec un câble blindé de 15 m minimum. Si le fabricant du CDM spécifie une longueur de câble maximale inférieure à 15 m, la longueur de câble la plus importante admissible doit être utilisée.
- Il convient d'équiper et d'installer le CDM de manière à satisfaire à l'exigence de l'IEC 61800-5-1 relative à la sécurité électrique.
- Les pertes doivent être déterminées en fonctionnement continu.
- Les essais peuvent être réalisés à n'importe quelle température.
- Les mesurages doivent être effectués avec le système de refroidissement à sa performance maximale. Dans le cas où le refroidissement est régulé par la température (marche/arrêt ou commande MLI), un mesurage moyen pendant une durée de 10 min peut être effectué à chaque point de charge.

7.10 Conditions d'essai pour les essais du PDS

- Le point de fonctionnement doit être défini selon la Figure 22.
- Le mesurage doit être effectué selon la procédure de mesure décrite en 7.7.3.5.
- La tension et la fréquence d'entrée du CDM doivent être les valeurs assignées du CDM.
- Le facteur de crête de la tension d'alimentation doit être compris entre 1,35 et 1,44.
- Le rapport de court-circuit du CDM et du réseau d'alimentation doit se situer dans la plage comprise entre 50 et 200 pour un CDM avec une puissance de sortie assignée jusqu'à et y compris 90 kW et entre 5 et 50 pour un CDM avec une puissance de sortie assignée supérieure à 90 kW.
- Sauf spécification contraire, les PDS dont la puissance assignée est inférieure à 7,5 kW doivent être mesurés avec un câble blindé de 15 m minimum. Si le fabricant du PDS ou du CDM spécifie une longueur de câble maximale inférieure à 15 m, la longueur de câble la plus importante admissible doit être utilisée. Il n'existe pas d'exigence relative aux longueurs de câble pour les PDS intégrés.
- Les essais doivent être effectués pour une température ambiante du moteur comprise entre +15 °C et +30 °C, ou dans le cas contraire, une correction de température appropriée doit être appliquée pour les pertes du moteur.
- Les mesurages doivent être effectués avec le système de refroidissement à sa performance maximale. Dans le cas où le refroidissement est régulé par la température (marche/arrêt ou commande MLI), un mesurage moyen pendant une durée de 10 min peut être effectué à chaque point de charge.

7.11 Organigrammes des procédures d'essai

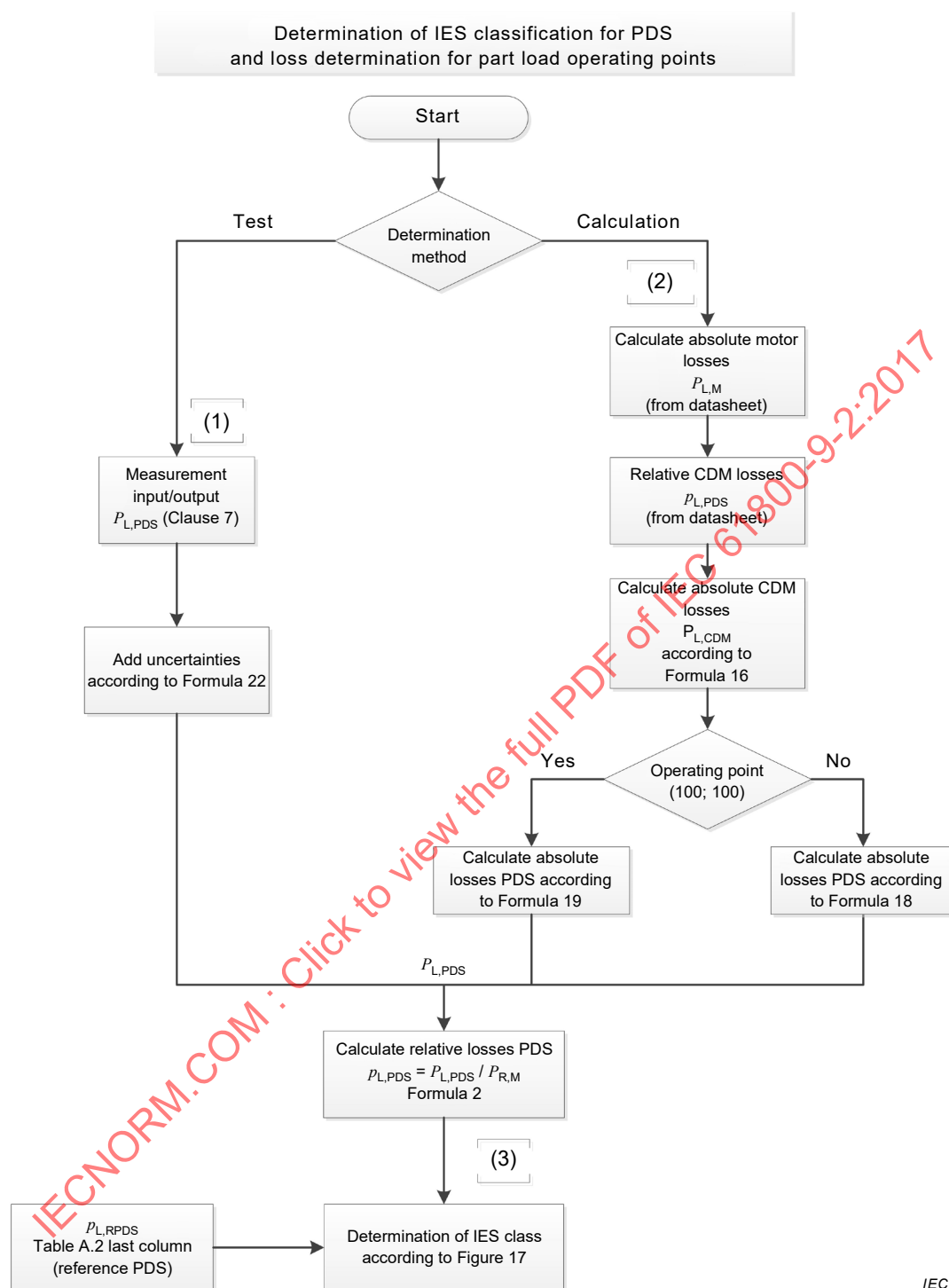
Voir la Figure 24 et la Figure 25.



Anglais	Français
Determination of IE classification for CDM and loss determination for part load operating points	Détermination du classement IE pour le CDM et détermination des pertes pour les points de fonctionnement de charge partielle
Start	Début
Yes	Oui
No	Non
$I_{r, out}$ specified?	$I_{r, out}$ spécifié?
CDM nominal ratings	Caractéristiques assignées nominales du CDM
Calculate $S_{r, equ}$ (Formula 4)	Calcul de $S_{r, equ}$ (Formule 4)
Determine $S_{r, equ}$ (Formula 4)	Détermination de $S_{r, equ}$ (Formule 4)
Calculate $I_{r, out}$ from (Formula 3)	Calcul de $I_{r, out}$ (Formule 3)
Determination method (Clause 7)	Méthode de détermination (Article 7)
Test	Essai
Calculation	Calcul
Apply test load at I_{out} according to table 1.	Application de la charge d'essai à I_{out} selon le Tableau 1
Determine test load current according to table 1.	Détermination du courant de la charge selon le Tableau 1
Verify $\cos \phi$ according to table 2 (Clause 7.9)	Vérification de $\cos \phi$ selon le Tableau 2 (7.9)
Determine $\cos \phi$ from table 2	Détermination de $\cos \phi$ à partir du Tableau 2
Calorimetric method using the test load (90 %, 100 %)	Méthode calorimétrique qui utilise la charge d'essai (90 %, 100 %)
Input-output using the test load (90 %, 100 %)	Entrée-sortie qui utilise la charge d'essai (90 %, 100 %)
Calculate losses by Formulae 5 to 15 (90 %, 100 %)	Calcul des pertes par les Formules 5 à 15 (90 %, 100 %)
Calculate losses by manufacturer model (90 %, 100 %)	Calcul des pertes par le modèle du fabricant (90 %, 100 %)
Add uncertainties	Ajout des incertitudes
By Formula (21)	Par la Formule (21)
Calculate $p_{L, CDM}$ by Formula (16)	Calcul de $p_{L, CDM}$ par la Formule (16)
$p_{L, RCDM}$ Table 18 col.2 (Reference CDM)	$p_{L, RCDM}$ Tableau 18 col.2 (CDM de référence)
Determine IE class according to fig. 16	Détermination de la classe IE selon la Figure 16
Partload operating point:	Point de fonctionnement de charge partielle:
For determination of partload operation the flowchart from point 1 to 2 is repeated for each part load operating point adjusting the I_{out} and $\cos \phi$ according to tables 1 and 2 at each of the 8 partload operating points (relative torque 25 %, 50 %, 90 % and relative speed 0 %, 50 %, 90 % according to fig. 21).	Pour la détermination du fonctionnement de charge partielle, l'organigramme du point 1 à 2 est répété pour chaque point de fonctionnement de charge partielle en réglant I_{out} et $\cos \phi$ selon les Tableaux 1 et 2 à chacun des huit points de fonctionnement de charge partielle (couple relatif 25 %, 50 %, 90 % et vitesse relative 0 %, 50 %, 90 % selon la Figure 21).

NOTE Point de fonctionnement de charge partielle: pour la détermination du fonctionnement de charge partielle, l'organigramme du point 1 à 2 est répété pour chaque point de fonctionnement de charge partielle en réglant I_{out} et $\cos \phi$ selon les Tableaux 1 et 2 à chacun des huit points de fonctionnement de charge partielle (couple relatif 25 %, 50 %, 90 % et vitesse relative 0 %, 50 %, 90 % selon la Figure 21).

Figure 24 – Détermination du classement IE pour le CDM et détermination des pertes aux points de fonctionnement de charge partielle



Anglais	Français
Determination of IES classification for PDS and loss determination for part load operating points	Détermination du classement IES pour le PDS et détermination des pertes pour les points de fonctionnement de charge partielle
Start	Début
Test	Essai
Calculation	Calcul
Determination method	Méthode de détermination

Anglais	Français
Measurement input/output $P_{L,PDS}$ (Clause 7)	Entrée/sortie de mesure $P_{L,PDS}$ (Article 7)
Add uncertainties according to Formula 22	Ajout des incertitudes selon la Formule 22
Calculate absolute Motor losses $P_{L,M}$ (from datasheet data)	Calcul des pertes absolues du moteur $P_{L,M}$ (à partir des données de la fiche technique)
Relative CDM losses $p_{L,CDM}$ (datasheet data)	Pertes relatives du CDM $p_{L,CDM}$ (données de la fiche technique)
Calculate absolute CDM losses $P_{L,CDM}$ according to Formula 16	Calcul des pertes absolues du CDM $P_{L,CDM}$ selon la Formule 16
Yes	Oui
No	Non
Operating point	Point de fonctionnement
Calculate absolute losses PDS according to Formula 19	Calcul des pertes absolues du PDS selon la Formule 19
Calculate absolute losses PDS according to Formula 18	Calcul des pertes absolues du PDS selon la Formule 18
Calculate relative losses PDS $p_{L,PDS} = P_{L,PDS} / P_{R,M}$ Formula 2	Calcul des pertes relatives du PDS $p_{L,PDS} = P_{L,PDS} / P_{R,M}$ (Formule 2)
$p_{L,RPDS}$ Table A.2, last column (reference PDS)	$p_{L,RPDS}$ Tableau A.2, dernière colonne (PDS de référence)
Determination of IES class according to figure 17	Détermination de la classe IES selon la Figure 17
Actual motor might be replaced by Reference motor data. Table A.2	Le moteur réel peut être remplacé par les données du moteur de référence (Tableau A.2).
Actual CDM might be replaced by Reference CDM data. Table A.1	Le CDM réel peut être remplacé par les données du CDM de référence (Tableau A.1).
For determination of part load operation the test sequence flowchart point (1) – (3) is repeated for each part load operating point adjusting the torque and speed according to Figure 4.	Pour la détermination du fonctionnement de charge partielle, le point (1) – (3) de l'organigramme de la séquence d'essai est répété pour chaque point de fonctionnement de charge partielle en réglant le couple et la vitesse selon la Figure 4.
For determination of part load operation the calculation sequence flowchart point (2) – (3) is repeated for each part load operating point adjusting the torque and speed according to Figure 5 and Figure 6 for motor and CDM.	Pour la détermination du fonctionnement de charge partielle, le point (2) – (3) de l'organigramme de la séquence de calcul est répété pour chaque point de fonctionnement de charge partielle en réglant le couple et la vitesse selon la Figure 5 et la Figure 6 pour le moteur et le CDM.

Figure 25 – Détermination du classement IES pour le PDS et détermination des pertes aux points de fonctionnement de charge partielle

8 Exigences relatives à la documentation de l'utilisateur

8.1 Généralités

L'Article 8 a pour objectif de définir les informations nécessaires à la détermination des pertes d'énergie du CDM et du PDS. Le Tableau 20 présente les informations exigées, en indiquant l'emplacement où les informations doivent être fournies, suivi de paragraphes explicatifs.

La documentation doit mentionner toutes les étiquettes de l'équipement relatives à l'efficacité énergétique.

Sauf indication contraire, les exigences de l'Article 8 doivent s'appliquer à tous les CDM et au PDS.

Les informations fournies doivent permettre de classer l'efficacité énergétique du CDM et du PDS; des informations suffisantes doivent par ailleurs être fournies pour permettre de classer l'efficacité énergétique de l'application finale et/ou du système dans laquelle ou lequel le CDM ou le PDS sert de composant.

Le fabricant doit définir si la fréquence assignée du stator de charge d'essai est 50 Hz ou 60 Hz et indiquer cette information dans la documentation.

Tableau 20 – Exigences relatives aux informations

Informations	Paragraphe	Emplacement ^{a, b}			Paragraphe technique
		1	2	3	
	référence				référence
Pour la sélection	8.2				
Pour la détermination du classement de l'efficacité énergétique	8.3				
Généralités	8.3			X	4.6, 4.7, 6.1, 6.2, 6.4, 7
Tension d'alimentation	8.3			X	4.6, 4.7, 6.1, 6.2, 6.4, 7
Fréquence d'alimentation	8.3			X	4.6, 4.7, 6.1, 6.2, 6.4, 7
Fréquence assignée du stator de charge d'essai en cas de CDM et vitesse assignée du moteur (tours mécaniques par minute) en cas de PDS	8.3			X	4.6, 4.7, 6.1, 6.2, 6.4, 7
Assignation d'une classe IE au CDM et d'une classe IEC au PDS	8.3			X	4.6, 4.7, 6.1, 6.2, 6.4, 7
Tension de sortie fondamentale maximale du CDM	8.3			X	5.3, Annexe D
Pour la détermination des pertes d'énergie supplémentaires et des conditions de charge partielle	8.4			X	
Généralités	8.4.1			X	Annexe B, 4.2, 7
Pertes de charge partielle	8.4.2			X	4.2, 7
Pertes des dispositifs auxiliaires et options	8.4.3			X	
Pertes en mode de veille	8.4.4			X	5.2.7
Pertes en mode régénérateur	8.4.5			X	B.4.3, 5.5
^a Emplacement: 1. Sur le produit (voir 8.1); 2. Sur l'emballage; 3. Dans la documentation produit.					
^b La documentation produit demandée par 8.4 peut être fournie au format électronique. Lorsque plusieurs produits identiques sont fournis à un seul client, il n'est pas nécessaire de fournir un manuel pour chaque unité, si le client l'accepte.					

8.2 Informations destinées à la sélection

Chaque partie d'un CDM ou d'un PDS fourni sous forme de produit distinct doit être accompagnée d'informations relatives à son fonctionnement et à ses caractéristiques électriques, comme le demandent les normes de produits applicables.

NOTE Exemples types de normes de produits:

- IEC 61800-2 pour les systèmes d'entraînement électrique à vitesse variable
- IEC 60947-4-1 pour les contacteurs et les démarreurs de moteurs – Contacteurs et démarreurs électromécaniques
- IEC 60947-4-2 pour les contacteurs et les démarreurs de moteurs – Gradateurs et démarreurs à semiconducteurs de moteurs à courant alternatif

8.3 Informations pour la détermination du classement de l'efficacité énergétique

Le fabricant doit fournir des informations concernant le classement de l'efficacité énergétique (IE/IES) du CDM et du PDS déterminé en 4.6, 4.7, 6.2 et 6.4 et vérifié conformément à l'Article 7.

Une classe IES doit être assignée au PDS dans le cas où le moteur et le CDM sont physiquement combinés en une seule unité ou lorsqu'il est prévu de les utiliser uniquement dans cette combinaison. Dans ce cas, il n'est pas exigé d'assigner une classe IE individuelle au CDM et au moteur.

Pour un CDM à usage général qu'il n'est pas prévu de vendre ou de faire fonctionner sur un moteur spécifique, seule l'assignation d'une classe IE au CDM est exigée. L'assignation d'une classe IES pour la combinaison d'un CDM et d'un moteur peut toutefois être spécifiée.

Les informations supplémentaires suivantes doivent être fournies avec le classement IE/IES:

- valeur efficace de la tension d'alimentation entre phases U_{mL1} ;
- fréquence de la tension d'alimentation (par exemple, 50 Hz, 60 Hz);
- fréquence assignée du stator de charge d'essai en cas de CDM ou vitesse assignée du moteur (tours mécaniques par minute) en cas de PDS;
- tension de sortie fondamentale entre phases efficace maximale du CDM.

8.4 Informations pour la détermination des pertes d'énergie supplémentaires et des conditions de charge partielle

8.4.1 Généralités

Les pertes du CDM ou du PDS sont exigées pour calculer les classes d'efficacité énergétique dans les applications finales ou le système (voir 4.9 et Figure 7), lorsque le CDM et/ou le PDS servent de composants comme le décrit l'Annexe B. Ceci inclut également le fonctionnement de charge partielle et des options applicables nécessaires pour le fonctionnement de cette application.

8.4.2 Pertes dans des conditions de charge partielle

Le fabricant doit indiquer les pertes du CDM selon les points de mesure de charge partielle définis en 4.2 et vérifiés conformément à l'Article 7. Dans le présent document, les informations sur les pertes ne sont obligatoires que pour les CDM qui transforment une puissance d'entrée en courant alternatif en puissance de sortie en courant alternatif.

Le fabricant doit indiquer les pertes du PDS selon les points de fonctionnement de charge partielle définis en 4.2 et vérifiés conformément à l'Article 7.

Le nombre des points de fonctionnement de charge partielle peut être réduit lorsque l'application finale n'exige qu'un nombre limité de points de charge selon l'approche produit étendu. Si le fabricant du CDM/PDS ne fournit que des points de fonctionnement de charge partielle limités pour prendre en charge des applications spécifiques, cela doit être indiqué dans le manuel.

8.4.3 Pertes des dispositifs auxiliaires et options

Il s'agit des pertes de filtres EMI facultatifs, de bobines d'arrêt de ligne, de transformateurs, de ventilateurs externes, de bobines d'arrêt de sortie, de filtres de sortie ou d'autres options de puissance consommée, qu'il est prévu d'utiliser avec le PDS ou le CDM pour le fonctionnement dans l'application finale, qui dépassent

- 0,1 % de la puissance assignée du CDM, et

- 5 W au total.

Ces pertes doivent être indiquées dans la documentation au point de fonctionnement de la puissance assignée avec une tolérance de $\pm 25\%$, sauf si elles sont comprises dans les pertes du CDM ou du PDS.

Cela s'applique également aux dispositifs de commande de mouvement ou aux options d'application qui sont spécifiquement destinés à être utilisés avec l'entraînement.

8.4.4 Pertes en mode de veille

Le fabricant doit indiquer les pertes de puissance lorsque le CDM et le PDS sont en mode de veille avec une tolérance de $\pm 25\%$.

8.4.5 Pertes en mode régénérateur

La documentation de l'utilisateur doit indiquer si un CDM ou un PDS est capable ou non de régénérer l'énergie de la charge au réseau.

Le fabricant doit fournir suffisamment d'informations à l'intégrateur du système afin qu'il détermine les pertes du CDM ou du PDS en mode régénérateur à partir de la topologie régénératrice qu'admet le CDM ou le PDS.

Annexe A (normative)

Pertes du RCDM, RM et du RPDS

A.1 Tableaux des pertes relatives

Les Tableaux A.1, A.2 et A.3 donnent les pourcentages des pertes relatives des CDM, des moteurs et des PDS de référence, respectivement.

Tableau A.1 – Pertes relatives (%) des CDM de référence à des puissances assignées différentes aux points de fonctionnement décrits à la Figure 6

$P_{rM} /$ kW infor- mative	$S_{r,eq} /$ kVA	$P_{L,RCDM}$, relative (0;25)	$P_{L,RCDM}$, relative (0;50)	$P_{L,RCDM}$, relative (0;100)	$P_{L,RCDM}$, relative (50;25)	$P_{L,RCDM}$, relative (50;50)	$P_{L,RCDM}$, relative (50;100)	$P_{L,RCDM}$, relative (90;50)	$P_{L,RCDM}$, relative (90;100)
0,12	0,278	33,79	33,84	34,30	33,89	34,04	34,84	34,39	35,85
0,18	0,381	25,24	25,28	25,75	25,34	25,48	26,28	25,83	27,30
0,25	0,5	19,74	19,78	20,25	19,84	19,99	20,78	20,34	21,80
0,37	0,697	14,77	14,82	15,29	14,87	15,02	15,82	15,37	16,84
0,55	0,977	11,14	11,19	11,66	11,24	11,39	12,19	11,74	13,21
0,75	1,29	8,96	9,00	9,47	9,06	9,20	10,00	9,55	11,02
1,1	1,71	6,86	7,13	7,82	6,93	7,33	8,40	7,68	9,51
1,5	2,29	5,56	5,83	6,52	5,63	6,03	7,10	6,38	8,21
2,2	3,3	4,54	4,82	5,51	4,61	5,02	6,09	5,37	7,20
3	4,44	4,07	4,35	5,04	4,14	4,55	5,62	4,90	6,72
4	5,85	3,74	4,02	4,71	3,82	4,22	5,29	4,57	6,39
5,5	7,94	3,35	3,63	4,32	3,42	3,83	4,90	4,18	6,01
7,5	9,95	2,80	3,09	4,02	2,86	3,28	4,64	3,61	5,84
11	14,4	2,39	2,68	3,61	2,46	2,87	4,23	3,20	5,43
15	19,5	2,15	2,44	3,37	2,22	2,63	3,99	2,96	5,18
18,5	23,9	2,02	2,32	3,24	2,09	2,51	3,86	2,83	5,05
22	28,3	1,94	2,23	3,16	2,01	2,43	3,78	2,75	4,97
30	38,2	1,83	2,12	3,05	1,90	2,31	3,67	2,64	4,87
37	47	1,76	2,05	2,98	1,83	2,24	3,60	2,57	4,79
45	56,9	1,71	2,01	2,93	1,78	2,20	3,55	2,52	4,75
55	68,4	1,62	1,93	2,90	1,70	2,13	3,53	2,47	4,74
75	92,8	1,58	1,88	2,85	1,65	2,08	3,48	2,42	4,69
90	111	1,55	1,86	2,82	1,62	2,05	3,45	2,39	4,66
110	135	1,24	1,48	2,27	1,32	1,68	2,91	2,02	4,11
132	162	1,23	1,47	2,26	1,30	1,67	2,89	2,01	4,10
160	196	1,22	1,46	2,25	1,29	1,66	2,88	2,00	4,09
200	245	1,21	1,45	2,24	1,28	1,65	2,87	1,98	4,07
250	302	1,17	1,42	2,24	1,24	1,61	2,88	1,95	4,10
315	381	1,16	1,41	2,23	1,23	1,61	2,87	1,94	4,09
355	429	1,16	1,41	2,23	1,23	1,60	2,87	1,94	4,09
400	483	1,16	1,41	2,23	1,23	1,60	2,87	1,94	4,09