

TECHNICAL SPECIFICATION

SPÉCIFICATION TECHNIQUE



**Rotating electrical machines –
Part 31: Selection of energy-efficient motors including variable speed
applications – Application guide**

**Machines électriques tournantes –
Partie 31: Choix des moteurs éconergétiques incluant les applications à vitesse
variable – Guide d'application**



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2010 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 la CEI ou du Comité national de la CEI du pays du demandeur.

Si vous avez des questions sur le copyright de la CEI ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de la CEI de votre pays de résidence.

IEC Central Office
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland
Email: inmail@iec.ch
Web: 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.

- Catalogue of IEC publications: www.iec.ch/searchpub

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 It also gives information on projects, withdrawn and replaced publications.

- IEC Just Published: www.iec.ch/online_news/justpub

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

- Electropedia: www.electropedia.org

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

- Customer Service Centre: www.iec.ch/webstore/custserv

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please visit the Customer Service Centre FAQ or contact us:

Email: csc@iec.ch

Tel.: +41 22 919 02 11

Fax: +41 22 919 03 00

A propos de la CEI

La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) 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 CEI

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

- Catalogue des publications de la CEI: www.iec.ch/searchpub/cur_fut-f.htm

Le Catalogue en-ligne de la CEI vous permet d'effectuer des recherches en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...). Il donne aussi des informations sur les projets et les publications retirées ou remplacées.

- Just Published CEI: www.iec.ch/online_news/justpub

Restez informé sur les nouvelles publications de la CEI. Just Published détaille deux fois par mois les nouvelles publications parues. Disponible en-ligne et aussi par email.

- Electropedia: www.electropedia.org

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

- Service Clients: www.iec.ch/webstore/custserv/custserv_entry-f.htm

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions, visitez le FAQ du Service clients ou contactez-nous:

Email: csc@iec.ch

Tél.: +41 22 919 02 11

Fax: +41 22 919 03 00

TECHNICAL SPECIFICATION

SPÉCIFICATION TECHNIQUE



**Rotating electrical machines –
Part 31: Selection of energy-efficient motors including variable speed
applications – Application guide**

**Machines électriques tournantes –
Partie 31: Choix des moteurs éconergétiques incluant les applications à vitesse
variable – Guide d'application**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX



ICS 29.160

ISBN 978-2-88910-023-1

CONTENTS

FOREWORD.....	5
INTRODUCTION.....	7
1 Scope.....	8
2 Normative references	8
3 Terms, definitions and symbols	8
3.1 Terms and definitions	8
3.2 Symbols	8
4 General	9
5 Efficiency	10
5.1 General.....	10
5.2 Motor losses.....	11
5.3 Additional motor-losses when operated on a frequency converter.....	12
5.4 Motors for higher efficiency classes.....	12
5.5 Variations in motor losses	13
5.6 Part load efficiency.....	14
5.7 Efficiency testing methods.....	15
5.8 Power factor (see Figure 4)	16
5.9 Matching motors and variable frequency converters	17
5.10 Motors rated for 50 Hz and 60 Hz.....	18
5.11 Motors rated for different voltages or a voltage range.....	20
5.12 Motors rated for operation at frequencies other than 50/60 Hz.....	20
5.13 Variable frequency converter efficiency	20
5.14 Frequency converter power factor	22
6 Environment.....	22
6.1 Starting performance.....	22
6.2 Operating speed and slip.....	23
6.3 Effects of power quality and variation in voltage and frequency	23
6.4 Effects of voltage unbalance	23
6.5 Effects of ambient temperature.....	24
7 Applications.....	24
7.1 General.....	24
7.2 Energy savings by speed control (variable speed drives, VSD).....	24
7.3 Correct sizing of the motor	24
7.4 Continuous duty application	25
7.5 Applications involving extended periods of light load operations.....	25
7.6 Applications involving overhauling loads.....	26
7.7 Applications where load-torque is increasing with speed (pumps, fans, compressors, etc.).....	26
7.8 Applications involving frequent starts and stops and/or mechanical braking.....	27
7.9 Applications involving explosive gas or dust atmospheres	27
8 Economy	28
8.1 Relevance to users.....	28
8.2 Initial purchase cost	28
8.3 Operating cost.....	29
8.4 Rewinding cost.....	30
8.5 Payback time.....	31

8.6 Life cycle cost	31
9 Maintenance.....	32
Annex A (informative) Super-premium efficiency (IE4)	34
Bibliography.....	40
Figure 1 – Overview of different areas for savings of electrical energy with drive systems	9
Figure 2 – Typical losses of energy-efficient motors, converters and electro-mechanical brakes	10
Figure 3 – Typical efficiency versus load curve bands for three-phase, cage-induction motors of different output power ranges (approximately 1,1 kW, 15 kW and 150 kW).....	14
Figure 4 – Typical power factor versus load curve bands for three-phase, cage-induction motors of different output power ranges (approximately 1,1 kW, 15 kW and 150 kW).....	16
Figure 5 – Typical reduction of energy efficiency in %-points for 4-pole, low-voltage motors between 50 Hz and 60 Hz when compared at the same torque (60 Hz power 20 % increased).....	19
Figure 6 – Typical reduction of energy efficiency in %-points for 4-pole, low-voltage motors between 50 Hz and 60 Hz when compared at the same output power (60 Hz torque 20 % reduced)	19
Figure 7 – Typical efficiency of indirect three-phase voltage source type converters with a passive front-end for typical load points of pumps, fans and compressors	20
Figure 8 – Typical efficiency of indirect three-phase voltage source type converters with a passive front-end for typical load points of constant torque	21
Figure 9 – Typical variations of current, speed, power factor and efficiency with voltage for constant output power	23
Figure 10 – Potential energy savings by improvement of efficiency classes for motors running at rated load.....	25
Figure 11 – Typical torque versus speed curves for 11 kW, 4-pole, three-phase, cage-induction motors and load versus speed curves for speed-square-loads	26
Figure 12 – 11 kW IE3 motor operated at full load, 4 000 operating hours per year, 15 years life cycle.....	28
Figure 13 – Example of a load factor graph: fraction of annual operating hours	29
Figure 14 – Life cycle cost analysis of an 11 kW motor operating at full load	32
Figure A.1 – IE4 efficiency limits	39
Table 1 – Loss distribution in three-phase, 4-pole, cage-induction electric motors	12
Table 2 – Exemplary efficiency calculation of a motor when operated at 50 Hz and 60 Hz with the same torque, using a 50 Hz motor rating as the basis.....	18
Table 3 – Loss distribution for low-voltage U-converters	21
Table 4 – Example of changing of efficiency, speed and torque demand with energy efficiency class of three 11 kW, 50 Hz motors in the same application	27
Table 5 – Average lifecycles for electric motors	30
Table A.1 – Interpolation coefficients	35
Table A.2 – Nominal limits (%) for super-premium efficiency (IE4)	35
Table A.3 – Standard power in kW associated with torque and speed for line-operated motors	36
Table A.4 – Nominal limits for super-premium efficiency (IE4) for 50 Hz line operated motors	37

Table A.5 – Nominal limits for super-premium efficiency (IE4) for 60 Hz line operated motors	38
--	----

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

ROTATING ELECTRICAL MACHINES –

**Part 31: Selection of energy-efficient motors including
variable speed applications – Application guide**

FOREWORD

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

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

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

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

IEC 60034-31, which is a technical specification, has been prepared by IEC technical committee 2: Rotating machinery.

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

Enquiry draft	Report on voting
2/1575/DTS	2/1594/RVC

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

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

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

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

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

- transformed into an International standard,
- reconfirmed,
- withdrawn,
- replaced by a revised edition, or
- amended.

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

INTRODUCTION

The present technical specification gives technical guidelines for the application of energy-efficient motors in constant-speed and variable speed applications. It does not cover aspects of a purely commercial nature.

Standards developed by IEC technical committee 2 do not deal with methods of how to obtain a high efficiency but with tests to verify the guaranteed value. IEC 60034-2-1 is the most important standard for this purpose.

For approximately 15 years regional agreements were negotiated in many areas of the world regarding efficiency classes of three-phase, cage-induction motors with outputs up to about 200 kW maximum, as motors of this size are installed in high quantities and are for the most part produced in series production. The design of these motors is often driven by the market demand for low investment cost, hence energy efficiency was not a top priority.

In IEC 60034-30, IE efficiency classes for single-speed cage-induction motors have been defined and test procedures specified:

IE1	Standard efficiency
IE2	High efficiency
IE3	Premium efficiency
IE4	Super-premium efficiency

Determination of efficiency for motors powered by a frequency converter will be included in IEC standard 60034-2-3.

However, for motors rated 1 MW and above, which are usually custom made, a high efficiency has always been one of the most important design goals. The full-load efficiency of these machines typically ranges between 95 % and 98 %. Efficiency is usually part of the purchase contract and is penalized if the guaranteed values are not met. Therefore, these higher ratings are of secondary importance when assigning efficiency classes.

With permission from the National Electrical Manufacturers Association (NEMA), some parts of this TS are based on NEMA MG 10, *Energy Management Guide For Selection and Use of Fixed Frequency Medium AC Squirrel-Cage Polyphase Induction Motors*.

ROTATING ELECTRICAL MACHINES –

Part 31: Selection of energy-efficient motors including variable speed applications – Application guide

1 Scope

This part of IEC 60034 provides a guideline of technical aspects for the application of energy-efficient, three-phase, electric motors. It not only applies to motor manufacturers, OEMs (original equipment manufacturers), end users, regulators and legislators but to all other interested parties.

This technical specification is applicable to all electrical machines covered by IEC 60034-30. Most of the information however is also relevant for cage-induction machines with output powers exceeding 375 kW.

2 Normative references

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

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

IEC 60034-30, *Rotating electrical machines – Part 30: Efficiency classes of single-speed three-phase, cage induction motors (IE-code)*

3 Terms, definitions and symbols

3.1 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC 60034-1 and in IEC 60034-30 apply.

3.2 Symbols

η_n	is the nominal efficiency, %
η_N	is the rated efficiency, %
f_N	is the rated frequency, Hz
n_N	is the rated speed, min ⁻¹
P_N	is the rated output power, kW
T_N	is the rated output torque, Nm
U_N	is the rated voltage, V

4 General

	Electrical components	Mechanical components	Application	Factory automation	Energy recovery
	Proper and regular maintenance				
S1 Continuous duty	Energy efficiency motors	Energy efficient, gearboxes, bolts, ...	Variable speed drive systems	Most efficient power supply	
	Power factor correction devices	Energy efficient pumps, fans, compressors, ...	Reducing elect. transmission losses	Low-energy mode during standstill	
S2 Short-time	Use most economical components				
S3...S10 Intermittent duty	Soft-start with frequency control	Minimize rotating inertia	Variable speed drive systems	Most efficient power supply	Regenerative braking
			Optimized mass and flow	Low-energy mode during standstill	DC-link coupling
					Batteries ultra-cap, fly-wheels etc...

IEC 700/10

Figure 1 – Overview of different areas for savings of electrical energy with drive systems

Energy can be saved in different areas of electrical drive systems depending on the duty type (continuous or intermittent).

In continuous duty applications, improved efficiency of the electrical motor is beneficial. An improved power factor (frequency converter, synchronous motor) can help reduce I^2R losses in cables. Mechanical optimizations (gearbox, belts, pumps, fans, etc.) may lead to much greater savings than improvements of the electrical motor.

The application should also be regarded as well because, in many cases, the main part of the energy saving can be obtained by managing the application load from the system point of view. For that purpose, a demand-oriented speed control is often helpful.

Proper maintenance is usually beneficial. Many industrial plants have a high energy consumption within the low voltage control circuits (typically 24 V power supply). Therefore, high-efficiency low-voltage power supplies should be used. If possible, the factory should also be shut down during long standstill periods (weekends, holidays).

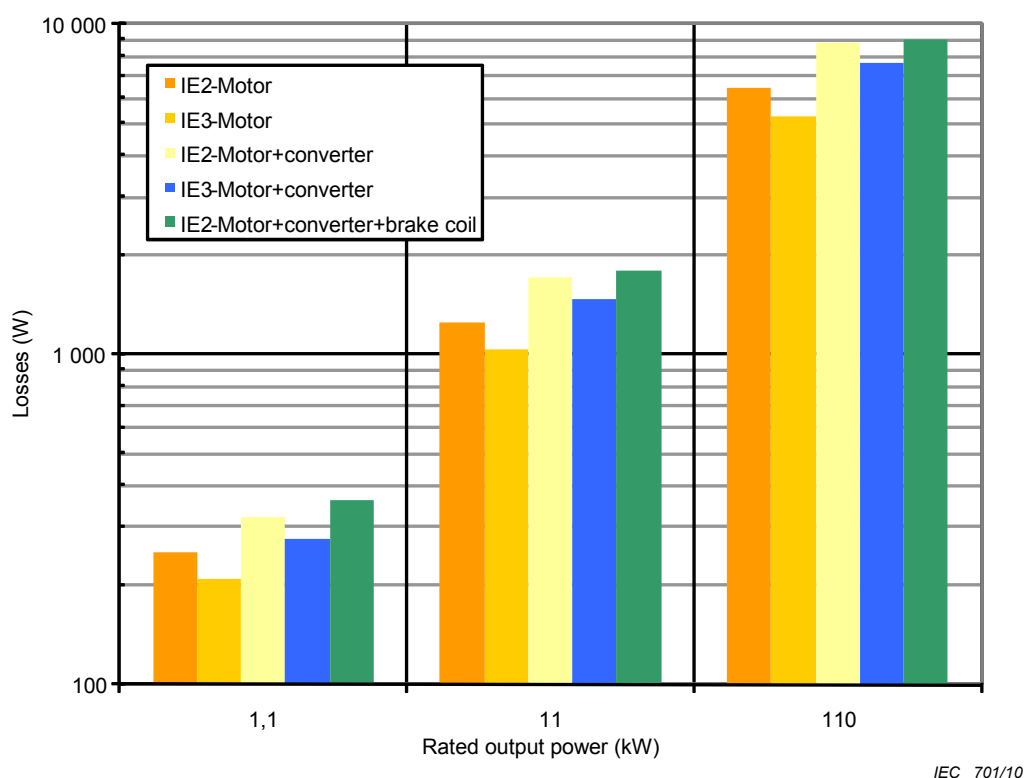


Figure 2 – Typical losses of energy-efficient motors, converters and electro-mechanical brakes

Figure 2 gives an overview of typical losses of energy-efficient motors and typical losses for the power drive system including motors with voltage-source frequency converters with and without brake coils of electro-mechanical motor brakes.

In intermittent duty applications, energy efficient motors are not very effective and may even use more energy due to their increased inertia and start-up currents. For these applications, the energy consumption during the starting phase can be reduced by ramping with a frequency converter. Intermediate energy storage may be beneficial when the operating cycle includes frequent regenerative braking phases (for example hoist drives, lifts, cranes etc.).

5 Efficiency

5.1 General

Motor efficiency is a measure of the effectiveness with which electrical energy is converted to mechanical energy, and is expressed as the ratio of power output to power input:

$$\text{Efficiency} = \frac{\text{OutputPower}}{\text{InputPower}} = \frac{\text{OutputPower}}{\text{OutputPower} + \text{losses}}$$

Motor efficiencies are usually given for rated load, although approximations for 3/4 load and 1/2 load may also be provided.

The efficiency of a motor is primarily a function of load, rated power, and speed, as indicated below.

- a) A change in efficiency as a function of load is an inherent characteristic of motors. Operation of the motor at loads substantially different from rated load may result in a change in motor efficiency (see Figure 3).
- b) Generally, the full-load efficiency of motors increases with physical size and rated output of motors.
- c) For the same power rating, motors with higher speeds generally, but not always, have a higher efficiency at rated load than motors with lower rated speeds. This does not imply, however, that all apparatus should be driven by high-speed motors. Where speed-changing mechanisms, such as pulleys or gears, are required to obtain the necessary lower speed, the additional power losses could reduce the efficiency of the system to a value lower than that provided by a direct drive lower speed motor.

A definite relationship exists between the rated speed (min^{-1}) and the efficiency of a cage-induction motor. That is, the lower the rated speed, the lower is the efficiency, for slip is a measure of the losses in the rotor winding (slip of an induction motor is the difference between synchronous speed and operating speed). Slip, expressed in %, is the difference in speeds divided by the synchronous speed and multiplied by 100. Therefore, Design N cage-induction motors having a slip at full-load of less than 5 % are more efficient than motors having a higher slip and should be used when permitted by the application.

For loads such as pumps, fans and air compressors, it may be possible to make a significant saving in energy by utilizing a multispeed motor or by using a variable speed drive (VSD). However, it should be noted that the efficiency of a multispeed motor at each operating speed is somewhat lower than that of a single-speed motor having a comparable rating. Single-winding (for example Dahlander winding), multispeed motors are generally more efficient than two-winding, multispeed motors.

Motors which operate continuously or for long periods of time provide a significant opportunity for reducing energy consumption. Examples of such applications are processing machinery, air moving equipment, pumps, and many types of industrial equipment.

While many motors are operated continuously, some motors are used for very short periods of time and for a very low total number of hours per year. Examples of such applications are valve motors, dam gate operators, industrial door openers, fire pumps and sewage pumps. In these instances, a change in motor efficiency would not substantially change the total energy cost since very little total energy is involved and may decrease the required performance.

A modest increase of a few percentage points in motor efficiency can represent a rather significant decrease in percentage of motor losses. For example, for the same output, an increase in efficiency from 75 % to 78,9 %, from 85 % to 87,6 %, or from 90 % to 91,8 % represents a 20 % decrease in losses in each case.

As efficiency typically increases with the size of the motor, high-voltage machines with output powers exceeding 1 MW usually have an efficiency above 95 %.

NOTE While an electric motor's output power increases with the square of its diameter the permissible heat dissipation increases almost linearly. Therefore, a higher efficiency is an inevitable precondition for the design of larger motors.

5.2 Motor losses

An electric motor converts electrical energy into mechanical energy and in so doing incurs losses which are generally described as follows:

- a) Electrical (stator and rotor) losses (vary with load) – Current flowing through stator and rotor windings produces losses which are proportional to the current squared times the winding resistance (I^2R). Rotor loss increases with slip.
- b) Iron (core) loss (essentially independent of load) – This loss is produced mainly in the laminated core of the stator and, to a lesser degree, in the rotor. The magnetic field,

essential to the production of torque in the motor, causes hysteresis and eddy current losses.

- c) Mechanical (friction and windage) losses (essentially independent of load) – Mechanical losses occur in the bearings, fans, and seals of the motor. These losses are generally small in IP2X, IP4X and IP5X slow-speed motors, but may be appreciable in large, high-speed or totally-enclosed IP6X motors.
- d) Additional load losses (stray load losses) – The additional fundamental and high frequency losses in the iron; conductor and circulating current losses in the stator winding; and harmonic losses in the rotor conductors under load. These losses are assumed to be proportional to the torque squared.

Listed below (Table 1) are the motor loss components, with the typical % of the total motor losses they represent, and the design and construction factors which influence their magnitude.

Table 1 – Loss distribution in three-phase, 4-pole, cage-induction electric motors

	Typical % of losses 4-pole motors	Factors affecting these losses
Stator loss	30 to 50	Stator conductor size and material.
Rotor loss	20 to 25	Rotor conductor size and material.
Core loss	20 to 25	Type and quantity of magnetic material.
Additional-load loss	5 to 15	Primarily manufacturing and design methods.
Friction and windage	5 to 10	Selection/design of fan and bearings.

In general, by increasing the active material in the motor, i.e., the type and volume of conductors and magnetic materials, losses can be reduced.

5.3 Additional motor-losses when operated on a frequency converter

Harmonics of voltage and current in a cage-induction motor supplied from a frequency-converter cause additional iron and I^2R winding losses in the stator and the rotor. The total value of these additional losses is essentially independent of load. These additional losses decrease with increasing switching frequency in the converter.

In adverse circumstances the additional losses in the motor caused by the frequency converter can increase the total motor losses up to 15 % to 20 % more than when operating on a sinusoidal power supply.

For details see IEC 60034-17 and IEC 60034-25.

5.4 Motors for higher efficiency classes

It is expected that advanced technologies will enable manufacturers to design motors for higher efficiencies than IE3 with mechanical dimensions (flanges, shaft heights etc.) compatible to existing motors of lower efficiency classes (for example EN 50347, NEMA MG1 and other local standards). These motors usually require power electronics (frequency converters) to operate.

Losses in the rotor are almost eliminated when using synchronous motors without a field winding.

In Annex A, this technical specification proposes a super-premium efficiency-class IE4 which is specifically targeted at such motors (although the efficiency class IE4 as such is not limited to specific motors).

Permanent magnet (PMSM) and reluctance (RSM) synchronous motors are already developed and to some extent commercially available. PMSM usually have some inherent reluctance torque and RSM can be PM enforced, thus hybrids are possible.

Depending on the amount of magnet material used, a PMSM can have a higher power factor than an induction motor thus improving efficiency in the distribution network and in the frequency converter. These motors however require a frequency converter and a rotor position sensor (encoder) (unless an encoder-less control algorithm is used in the converter) for proper operation.

A simpler motor control with block commutated voltage of low switching frequency is also commonly used in small size and/or high speed motors (“brushless-DC” or “electronically commutated (EC) motors”). The main disadvantage is the additional losses due to parasitic harmonic voltages and currents. The improvement in efficiency over asynchronous motors is less when compared to the improvement of PWM (pulse-width modulation) controlled permanent magnet or reluctance synchronous motors.

Another synchronous motor design features both permanent magnets and a cage. It can therefore be used for on-line starting (line-start, permanent magnet, synchronous motors “LSPM”). These motors do not necessarily need a frequency converter for operation. However their starting performance is rather poor with torque ripple and noise and considerable restrictions on the permissible load torque and load inertia. They need to be closely matched to the application and cannot be used as general-purpose machines.

NOTE It is envisaged to expand the scope of IEC 60034-30 and amend it with this Annex A (as normative) when more experience with synchronous motors in standard applications becomes available.

5.5 Variations in motor losses

All manufactured products are subject to tolerances associated with materials and manufacturing methods. No two products will perform exactly the same, even though they are of the same design and produced on the same assembly line at the same time.

This is also true for electric motors. Product tolerances in materials, such as steel used for laminations in the stator and rotor cores, will lead to variations in magnetic properties and ultimately affect iron losses and therefore motor efficiency. Using a tested 7,5 kW motor as an example, a 10 % increase in iron loss (300 W to 330 W), which is within the tolerance offered by steel suppliers, would increase total motor losses from 946 W to 976 W and reduce efficiency from 88,8 % (IE2) to 88,5 % (IE1).

Variations also occur as the result of manufacturing process limitations. There is an economic limit to the practical dimensional tolerances on motor parts. Combinations of mating parts contribute to dimensional variations, such as the size of the air gap, which cause variations in additional-load loss and hence motor efficiency.

In addition, uncertainties can be caused by manufacturing processes and testing procedures.

Thus in forecasting the efficiency of a given motor, one can speak of the rated efficiency as defined by the manufacturer (which should be equivalent to the average efficiency of a large population of motors). The rated efficiency should also be above or equal to the required nominal efficiency of the rated efficiency class (in accordance to IEC 60034-30).

The actual efficiency at rated load of any individual motor, when operating at rated voltage and frequency, can be lower than the rated efficiency but not less than rated efficiency minus the tolerance of the efficiency according to IEC 60034-1. This is the level reached when both raw materials and manufacturing processes are at the least favourable end of their specified tolerances.

The rated efficiency should be used in estimating the power required to supply a number of motors. The minimum efficiency (rated minus tolerance) permits the motor user the assurance of having received the specified level of performance.

5.6 Part load efficiency

Three-phase cage-induction motors offer fairly constant efficiencies over a wide range of partial loads as indicated by Figure 3.

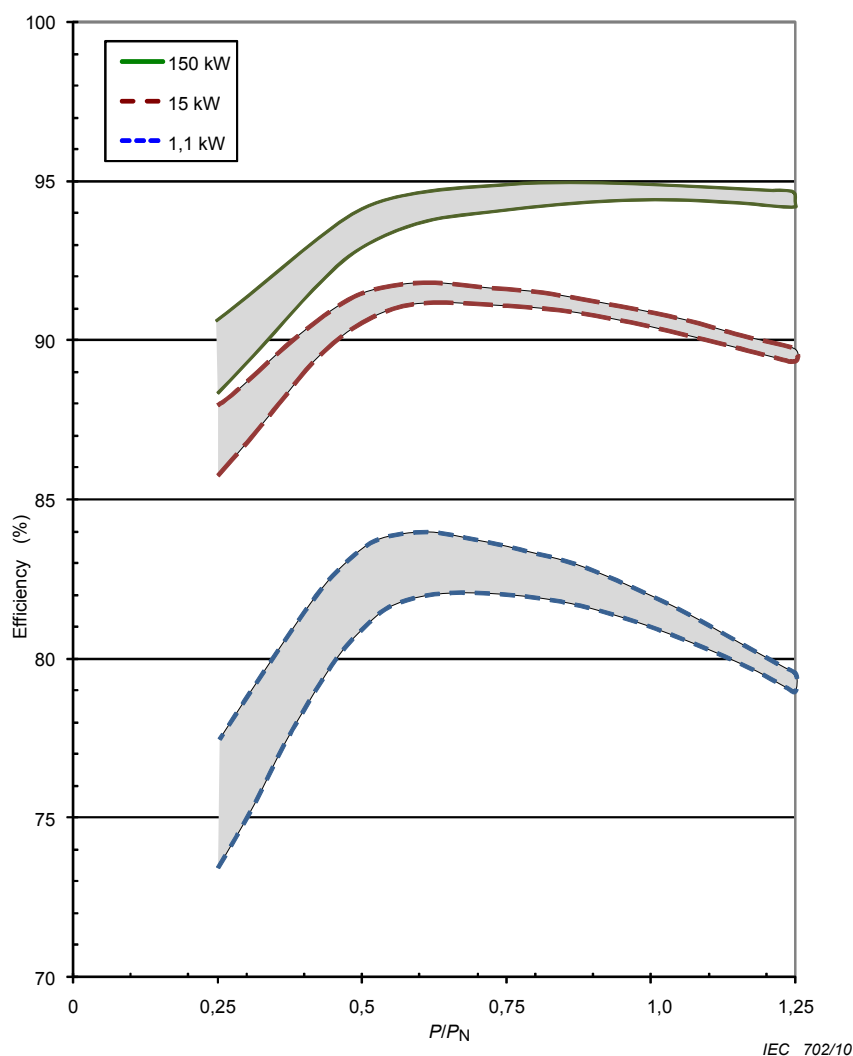


Figure 3 – Typical efficiency versus load curve bands for three-phase, cage-induction motors of different output power ranges (approximately 1,1 kW, 15 kW and 150 kW)

The efficiency bands given in this figure are typical for 2- and 4-pole motors alike. Motors with a higher number of poles will have a different characteristic.

When the efficiency for rated load and 3/4 load is given, the following formula may be used to compute a good approximation of the efficiency at any other partial load:

$$\begin{aligned} \nu_L &= \frac{\left(\frac{100}{\eta_{100}} - 1\right) - 0,75 \cdot \left(\frac{100}{\eta_{75}} - 1\right)}{0,4375} \\ \nu_0 &= \left(\frac{100}{\eta_{100}} - 1\right) - \nu_L \\ \eta_p &= \frac{100}{1 + \frac{\nu_0}{p} + \nu_L \cdot p} \end{aligned}$$

where:

η_{100} is the efficiency at rated load, in %;

η_{75} is the efficiency at 3/4 load, in %;

ν_L, ν_0 are the intermediate results;

p is the desired power (relative to rated load, i.e. from 0...1...overload);

η_p is the resulting efficiency, in %.

NOTE The application of this algorithm is not recommended for loads less than 50 % or greater than 125 % of rated load.

5.7 Efficiency testing methods

There are a number of test methods for determining motor efficiency. Standard methods for testing induction machines are internationally defined in IEC 60034-2-1, which recognizes several methods for determining motor efficiency, each of which has certain advantages as to accuracy, cost, and ease of testing, depending primarily on motor rating. Some of the methods in IEC 60034-2-1 are harmonized with national standards such as CSA C390 and IEEE 112 Part B.

The residual-loss method in IEC 60034-2-1 is a defined calculation procedure for segregating the various types of losses from the raw data and smoothing the additional (stray-) load loss by linear regression analysis. This can reduce the effect of errors introduced from making measurements over the range of loads from 25 % to approximately 150 % of rated- load. It also adjusts the tested ambient temperature to 25 °C to reduce variation due to different testing environments.

The common practice for obtaining the raw data for 0,75 kW to 370 kW is to test the motor with a load machine and a torque meter and to carefully measure the power input and output for several load points to determine loss components and thus efficiency.

Even with the use of a consistent and accurate efficiency test method, variations in results for the same motor do occur, primarily due to test equipment and instrument characteristics, and in the case of non-automated testing, personnel factors.

5.8 Power factor (see Figure 4)

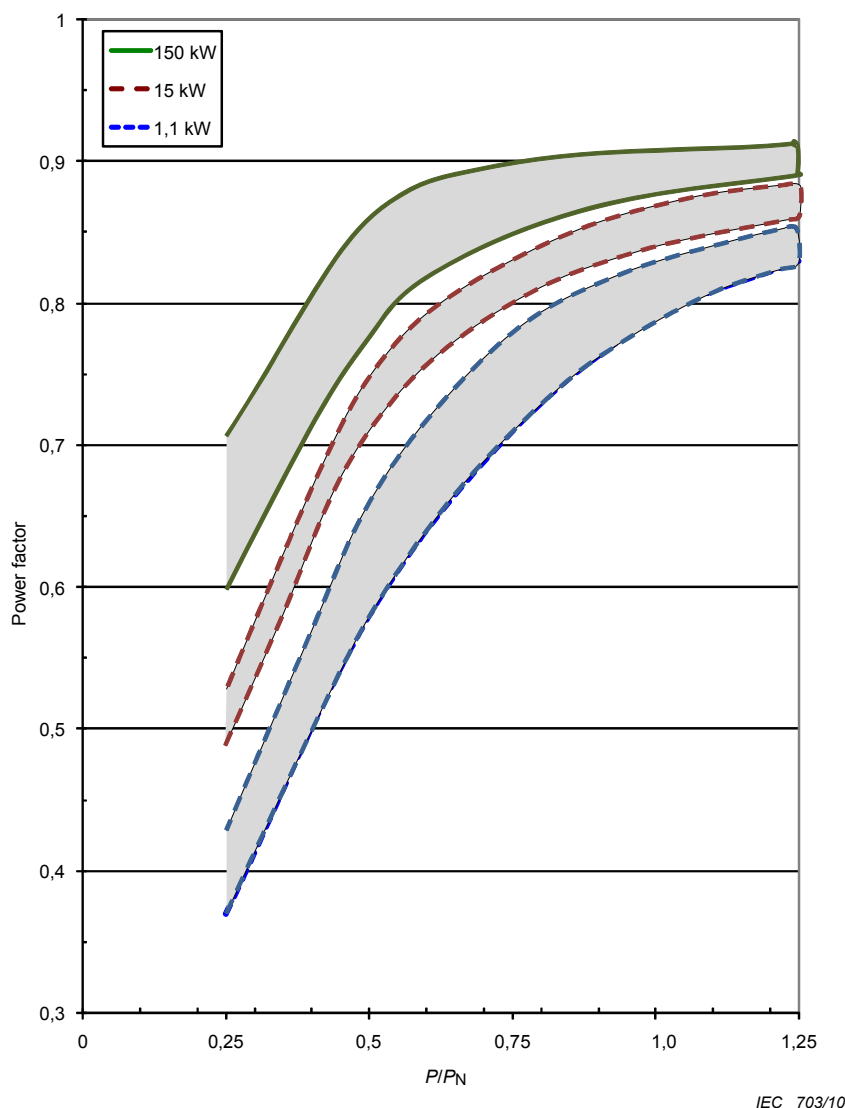


Figure 4 – Typical power factor versus load curve bands for three-phase, cage-induction motors of different output power ranges (approximately 1,1 kW, 15 kW and 150 kW)

The power factor bands given in this figure are typical for 2- and 4-pole motors alike. Motors with a higher number of poles will have a different characteristic.

The total motor load in a facility is usually a major factor in determining the system power factor. Low system power factor results in increased losses in the distribution system. Induction motors inherently cause a lagging system power factor.

The power factor of an induction motor decreases as the load decreases.

Rated-load power factor increases with an increase in the power rating of the motor. A number of induction motors, all operating at light load, can cause the electrical system to have a low power factor. The power factor of induction motors at rated load is lower for low-speed motors than for high-speed motors.

A small increase in voltage (less than 10 %) above rated voltage will decrease the power factor, and conversely a small decrease in voltage (less than 10 %) below rated voltage will improve the power factor of an induction motor. However, other performance characteristics may be adversely affected by such a change in voltage and operation as close as possible to the rating-plate voltage and power rating is recommended.

An analysis of the electrical system will indicate whether an improvement in the power factor is needed and whether capacitors, synchronous motors, or other corrective measures should be used.

When power-factor correction capacitors are used to improve power factor of the electrical system they should be carefully selected and applied to avoid unsafe operating conditions. It is recommended that the system designer be consulted for the proper value of corrective capacitance.

5.9 Matching motors and variable frequency converters

The addition of a variable frequency converter adds considerable potential for improving energy efficiency in many power drive systems. The additional costs of the converter (typically larger than the higher efficiency motor) and some additional losses (which depend upon size and design; typically 2 %...5 % at nominal torque and speed and 10 %...30 % at 25 % torque and speed) require a careful analysis of the application.

The first group of applications is pumps, fans and similar with changing loads where torque increases nearly by the square of the rotating speed of the motor. The electric input power of the motor will increase with the third power of speed when the flow volume in closed ducts and pipes is controlled with dampers and throttles only. A variable speed drive (VSD) can adjust the electric power input smoothly and continuously to the required flow volume and the losses are reduced accordingly. Traditional load control with multi-speed motors or parallel operated multi-motor schemes are to be considered if they can do the job with lower costs and fewer losses. The cost benefit of a VSD is high because a greater energy efficiency improvement is possible.

The second group of applications are conveyors, escalators, hoists and similar where the torque is more or less independent from speed. A variable speed drive (VSD) can continuously adjust the speed from almost standstill to full speed without steps and can thus minimize the needed power. The cost and efficiency benefits are smaller compared to the first group of applications because the change of input power is linear with the speed.

The third group of applications includes those which have minimal changes in load and speed but can benefit from a VSD in other ways like soft starting and stopping or the requirement of a high starting torque. The main benefit is not in energy efficiency improvements but in less wear of the machinery involved. There are other technical solutions for soft-starting available which require less cost. However, compared to soft starting with a variable speed drive, these methods do not save energy.

In some applications, motors are oversized and continuously run at part-load (for example 50 % or below). Even though a variable frequency converter can improve energy efficiency by reducing the input voltage to the motor, a better sizing of the motor for the necessary load would be more cost effective and save even more energy.

Unless additional sinusoidal filters are used, motors operated in a variable speed drive will be subject to voltage spikes significantly higher compared to grid operation. Today, most new industrial electric motors for supply voltages up to 500 V have an insulation system that can handle these voltages without problems. For higher supply voltages, motors according to IEC 60034-25 should be considered.

When retrofitting older motors in existing applications with variable frequency converters, the manufacturer should be contacted. Also it is important to determine the maximum safe

operating speed of the motor in case the grid frequency (50 Hz or 60 Hz) shall be exceeded significantly with a VSD. Such information is normally available in catalogues or the product documentation (manuals) (see also IEC 60034-1 and 60034-17).

The variable speed drive has to be selected and configured based on a clear knowledge of the typical operating conditions:

- torques and speeds required by the driven machine;
- any motor power derating due to the air-cooling method (self-ventilated or forced ventilation).

It is important to match the performance of a variable speed drive closely with the required load profile and the electric properties of the motor in order to achieve the full benefit.

5.10 Motors rated for 50 Hz and 60 Hz

As the utilization and size of motors are actually related to torque rather than power the theoretical output power increases linearly with speed, i.e. by 20 % from 50 Hz to 60 Hz.

I^2R winding-losses are dominant especially in small and medium sized induction motors. These losses basically remain constant at both 50 Hz and 60 Hz as long as the torque is kept constant. Although windage, friction and iron losses increase with frequency, these losses typically play a minor role in motors with four or more poles. Therefore, at 60 Hz, the total losses actually increase less than the 20 % output-power increase compared to 50 Hz. Hence in relative terms (output over input power) the efficiency improves.

Table 2 summarizes the foregoing text in a tabular format.

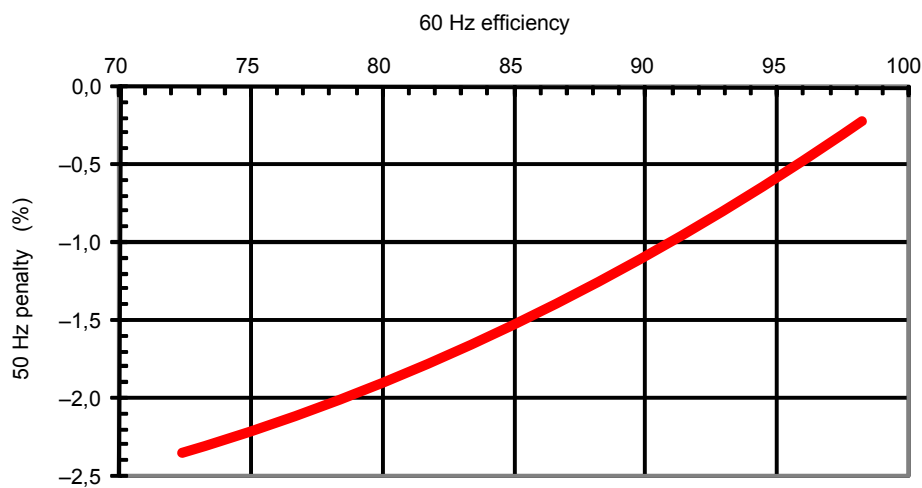
Table 2 – Exemplary efficiency calculation of a motor when operated at 50 Hz and 60 Hz with the same torque, using a 50 Hz motor rating as the basis

	50 Hz	60 Hz
Torque	100 %	100 %
Speed	100 %	120 %
Output power	100 %	120 %
Losses in % of output power		
I^2R	20 %	20 %
Friction and windage	4 %	$4 \times (1,2)^{1,5} = 5,25 \%$
Iron	4 %	$4 \times (1,2)^{1,5} = 5,25 \%$
Total losses	28 %	30,5 %
Input power	$100 + 28 = 128 \%$	$120 + 30,5 = 150,5 \%$
Efficiency	$100/128 = 78,1 \%$	$120/150,5 = 79,7 \%$

In practice, both 60 Hz and 50 Hz output power designations conform to the standard power levels according to IEC 60072. Therefore, an increased rating of motor power by 20 % is not always possible. However, the general advantage of 60 Hz motors still applies if the motor design is optimized for the respective supply frequency rather than just derating the motor.

The difference in motor efficiency between 50 Hz and 60 Hz also varies with the number of poles and the physical size of the motor. In general, the 60 Hz efficiency of three-phase, cage-induction motors in the output power range from 0,75 kW up to 370 kW is about 2,5 to 0,5 points, respectively, greater when compared to the 50 Hz efficiency. Only large 2-pole motors may have a slightly lower efficiency at 60 Hz due to their greater share of windage and friction losses.

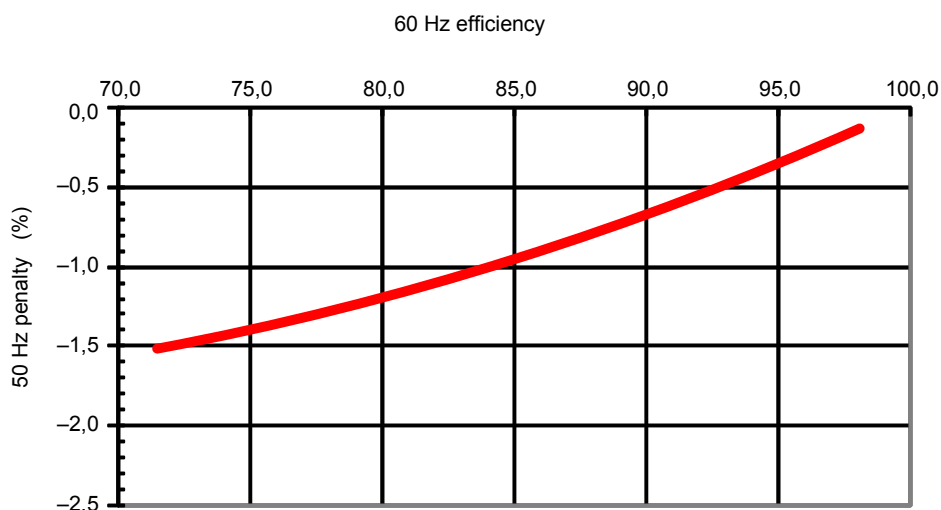
When a motor is rated for operation at either 50 Hz or 60 Hz with nearly the same magnetic flux and nearly the same torque (i.e. 20 % more output power at 60 Hz, for example 400 V / 50 Hz / 3,0 kW and 460 V / 60 Hz / 3,7 kW), the efficiency at 60 Hz is generally greater than at 50 Hz (see Figure 5).



IEC 704/10

Figure 5 – Typical reduction of energy efficiency in %-points for 4-pole, low-voltage motors between 50 Hz and 60 Hz when compared at the same torque (60 Hz power 20 % increased)

Alternately, when a motor is rated for operation on either 50 Hz or 60 Hz with nearly the same magnetic flux and the same output power (i.e. 20 % reduced torque at 60 Hz, for example 400 V / 50 Hz / 5,5 kW and 460 V / 60 Hz / 5,5 kW), the efficiency at 60 Hz is always higher because the utilization of the motor is reduced (see Figure 6).



IEC 705/10

Figure 6 – Typical reduction of energy efficiency in %-points for 4-pole, low-voltage motors between 50 Hz and 60 Hz when compared at the same output power (60 Hz torque 20 % reduced)

For these reasons the limit curves in IEC 60034-30 for the different efficiency classes (IE1, IE2, IE3) are generally higher for 60 Hz motors than for 50 Hz motors.

5.11 Motors rated for different voltages or a voltage range

A change in efficiency as a function of voltage is an inherent characteristic of motors. Operation of the motor at voltages substantially different from rated voltage will result in a change in motor efficiency and heating.

Typically the efficiency of small motors suffers more from voltage deviation than that of larger motors.

5.12 Motors rated for operation at frequencies other than 50/60 Hz

Motors rated for operation at frequencies other than grid frequency (50 Hz or 60 Hz) are not classified according to efficiency classes in IEC 60034-30.

The efficiency class IE4 as defined in Annex A of this document is the only efficiency class applicable to such motors.

5.13 Variable frequency converter efficiency

Frequency converters generally have a high level of energy efficiency. As with motors, their efficiency drops at partial load (see Figure 7).

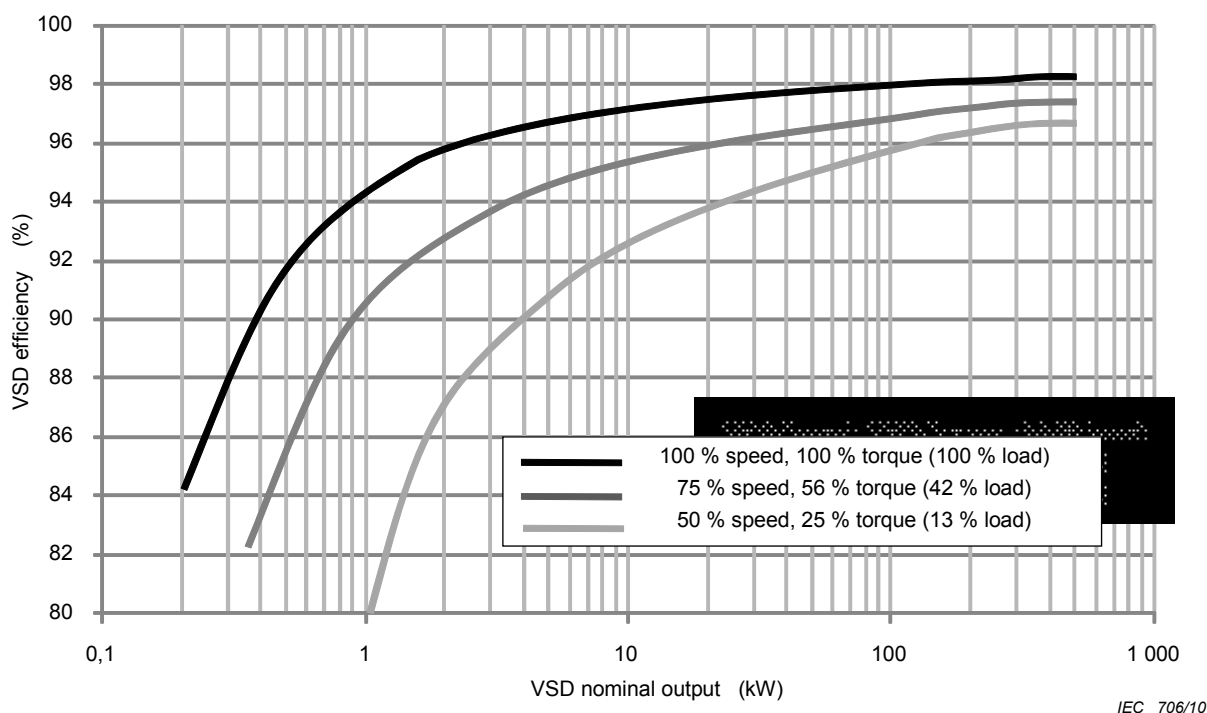


Figure 7 – Typical efficiency of indirect three-phase voltage source type converters with a passive front-end for typical load points of pumps, fans and compressors

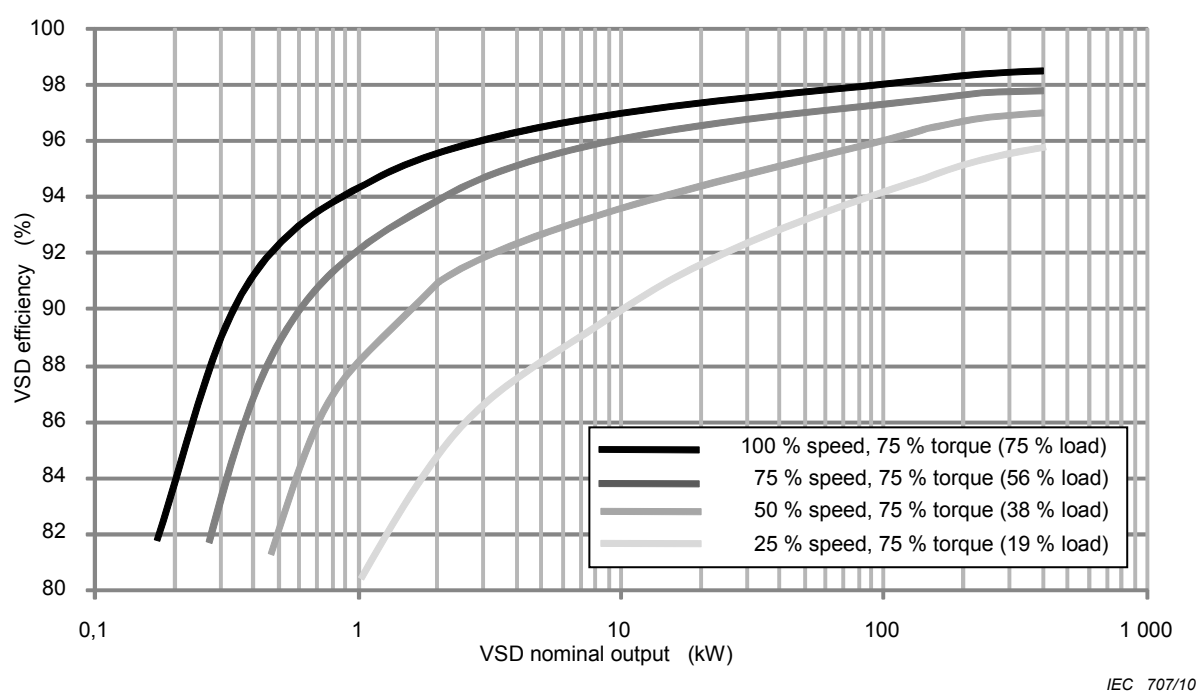


Figure 8 – Typical efficiency of indirect three-phase voltage source type converters with a passive front-end for typical load points of constant torque

Table 3 gives the frequency converter loss components for the most common industrial converter type (low voltage indirect frequency converters of the voltage source type with uncontrolled three-phase diode rectifiers as line side converter) in the output power range from 1 kW to 100 kW:

Table 3 – Loss distribution for low-voltage U-converters

	Typical % of losses for passive front-end converters	Factors affecting these losses
Switching losses (output stage)	30 to 50	Motor-current and switching-frequency.
Line-rectifier losses	20 to 25	Line-current (nearly proportional to motor power).
Forward losses (output stage)	15 to 20	Motor current.
Internal control circuit losses (microcontroller, internal power supply, display, keyboard, bus-communication, digital and analogue ins/outs...)	5 to 20	Nearly constant.
Switching losses (line-side converter / active front-end only)	-	Line-current and switching-frequency (nearly proportional to motor power).
Compound losses (line-side converter / active front-end only)	-	Line-current (nearly proportional to motor power).

A decrease in converter efficiency may lead to a reduced output voltage to the motor. This may prevent the motor from reaching top speed and/or require field weakening operation which will reduce motor efficiency.

5.14 Frequency converter power factor

The power factor of DC-link converters is only dependent on the design of the converter input rectifier. Motor design or motor loading does not influence converter power factor.

Due to the harmonic content of the input current of frequency converters, the total power factor λ has to be analysed:

$$\text{PowerFactor } \lambda = \frac{|\text{ActivePower } P|}{\text{ApparentPower } S}$$

The power factor can be adjusted nearly to unity by using a converter with an active line-side converter (active front-end).

The following typical examples can be given for the most common types of converters for low-voltage motors (indirect converter of the voltage source type with uncontrolled single or three phase diode rectifier as line side converter):

- 1-phase converter: $\lambda \approx 0,58$ (for $P_N \approx 0,5$ kW)
- 3-phase converter: $\lambda \approx 0,64$ (for $P_N \approx 2$ kW)
- 3-phase converter with line-choke: $\lambda \approx 0,92$ (for $P_N \approx 2$ kW)
- 3-phase converter with lean DC-link (small DC-cap.): $\lambda \approx 0,94$ (for $P_N \approx 1 \dots 10$ kW)

As frequency converters improve the power factor on the line side only it is most energy efficient to install the converter as close to the motor as suitable (decentralized installation).

6 Environment

6.1 Starting performance

Energy efficient cage-induction motors are typically built with more active material, i.e. longer core length and/or greater core diameter in order to achieve the higher efficiency. For these reasons the starting performance of energy efficient motors differs somewhat from motors with a lower efficiency.

On average, the locked-rotor current increases by 10 % to 15 % for motors from one energy efficiency class compared to motors of the next higher class with the same output power. Individually, this difference depends on the construction principle of the motor and should be checked with the manufacturer when replacing motors in an existing installation. Copper rotor motors typically have a higher locked-rotor current compared to aluminium rotor motors. It must be ensured that the control protective device is properly sized and set-up. See also IEC 60034-12.

Typically, the average pull-up torque (see IEC 60034-12) of energy efficient motors is also increased by about 10 % to 20 % per efficiency class for motors of the same rated output power.

Copper rotor motors typically have a lower pull-up torque compared to aluminium rotor motors.

The manufacturer has to ensure by appropriate design measures to meet the starting performance characteristics as defined in IEC 60034-12 (typically design-N).

6.2 Operating speed and slip

In general, motors with higher efficiency have a higher operating speed, i.e. a reduced slip compared to motors of lower efficiency. On average, the slip is reduced by some 20 % to 30 % per next higher efficiency class for motors of the same rated output power.

Copper rotor motors typically have a smaller slip and a higher operating speed compared to aluminium rotor motors.

6.3 Effects of power quality and variation in voltage and frequency

Operation outside of the rated conditions of voltage and frequency may decrease both efficiency and power factor and may adversely affect other performance characteristics. The same condition is true when operating the motor on other than a sine wave of voltage. The effect of a variation in supply voltage, wave form, or frequency on the motor's efficiency and power factor characteristics depends on the individual motor design (see Figure 9).

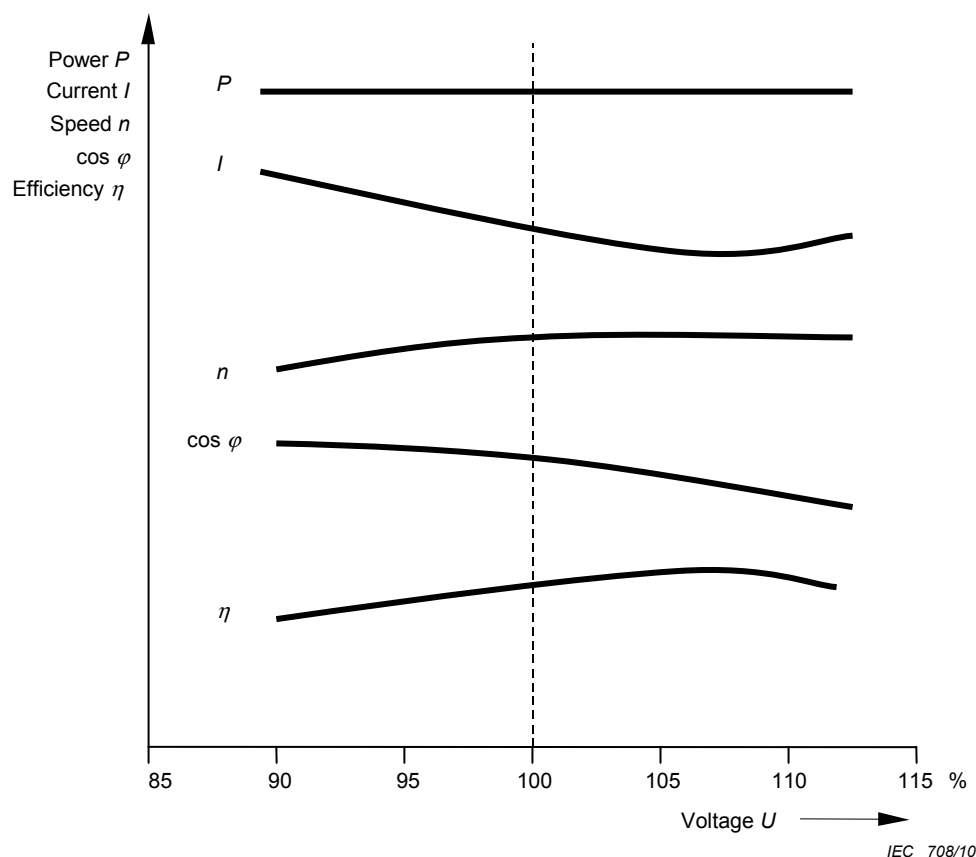


Figure 9 – Typical variations of current, speed, power factor and efficiency with voltage for constant output power

For permissible voltage and frequency variations during operation see IEC 60034-1.

6.4 Effects of voltage unbalance

A balanced voltage of the three-phase power supply to the motor is essential to the efficient operation of the system. For example, a voltage unbalance of 3,5 % can increase motor losses by approximately 20 %. For this reason, single-phase loads taken from a three-phase power supply should be carefully allocated so that the voltage unbalance at the motor terminals will be kept as low as possible.

For details see IEC 60034-26.

6.5 Effects of ambient temperature

The motor rated efficiency is always given for a standard reference ambient temperature of 25 °C (see IEC 60034-2-1). Operation under cooler ambient temperatures will increase efficiency while operation under hotter ambient temperatures will reduce efficiency.

7 Applications

7.1 General

The mechanical output power of standard motors per frame size is not internationally standardized. However regional standards do exist (for example EN 50347 and NEMA MG1) which are widely recognized. It is therefore advantageous for the retrofitting of standard electric motors in existing applications to have energy efficient motors with the same frame sizes and output powers that won't require major refurbishments of driven equipments.

When the device being driven by an electric motor is producing a relatively constant and continuous level of useful work, the primary motor selection concern is its rated-load efficiency. However, many applications are cyclic in nature. In these cases specific application techniques can be used to obtain substantial energy savings.

Other applications require intermittent or continuous absorption of energy. Again there are application techniques that will recover a significant percentage of the otherwise wasted energy.

A few of these cases follow to illustrate the technology that is available to the user. The motor manufacturer should be consulted to determine the most effective solution.

7.2 Energy savings by speed control (variable speed drives, VSD)

In many applications, the largest energy savings can be created by varying the speed of the motor according to the application load demand. This is typically done by using a variable speed drive (VSD).

The additional losses in the frequency converter can easily be compensated for by the overall improvement of the application efficiency.

Many pump and fan applications currently involve the control of flow or pressure by means of throttling or bypass devices. Throttling and bypass valves are in effect series and parallel power regulators that perform their function by dissipating the difference between source energy supplied and the desired sink energy.

These losses can be significantly reduced by controlling the flow rate or pressure by adjusting the speed of the pump or fan with a variable speed drive.

7.3 Correct sizing of the motor

Energy efficient motors are specifically useful in applications with a high number of operating hours at greater than ¾ of full load.

In order to avoid significant operating hours with loads below 50 % resulting in a lower efficiency the system should be sized according to the required peak-load and starting-torque.

Due to the low temperature utilization of more efficient motors their overload capacity is typically higher when compared to standard motors. Therefore, over sizing the motor for occasional peak-power demands is seldom required and certainly not cost effective.

When a replacement of a standard motor with a high efficiency motor is envisaged in existing applications, the correct power-demand and sizing of the motor should be evaluated.

7.4 Continuous duty application

The achievable energy savings from one energy efficiency class to the next higher class result from about 15 % to 20 % reduction in losses (see Figure 10). The payback time of extra investment costs related to high or premium efficiency motors can easily be calculated taking the overall motor efficiency and energy cost into account.

The following diagram illustrates the energy savings in % of the consumed electrical energy of the motor in relation to the rated motor output power when upgrading from a lower IE class to a higher one.

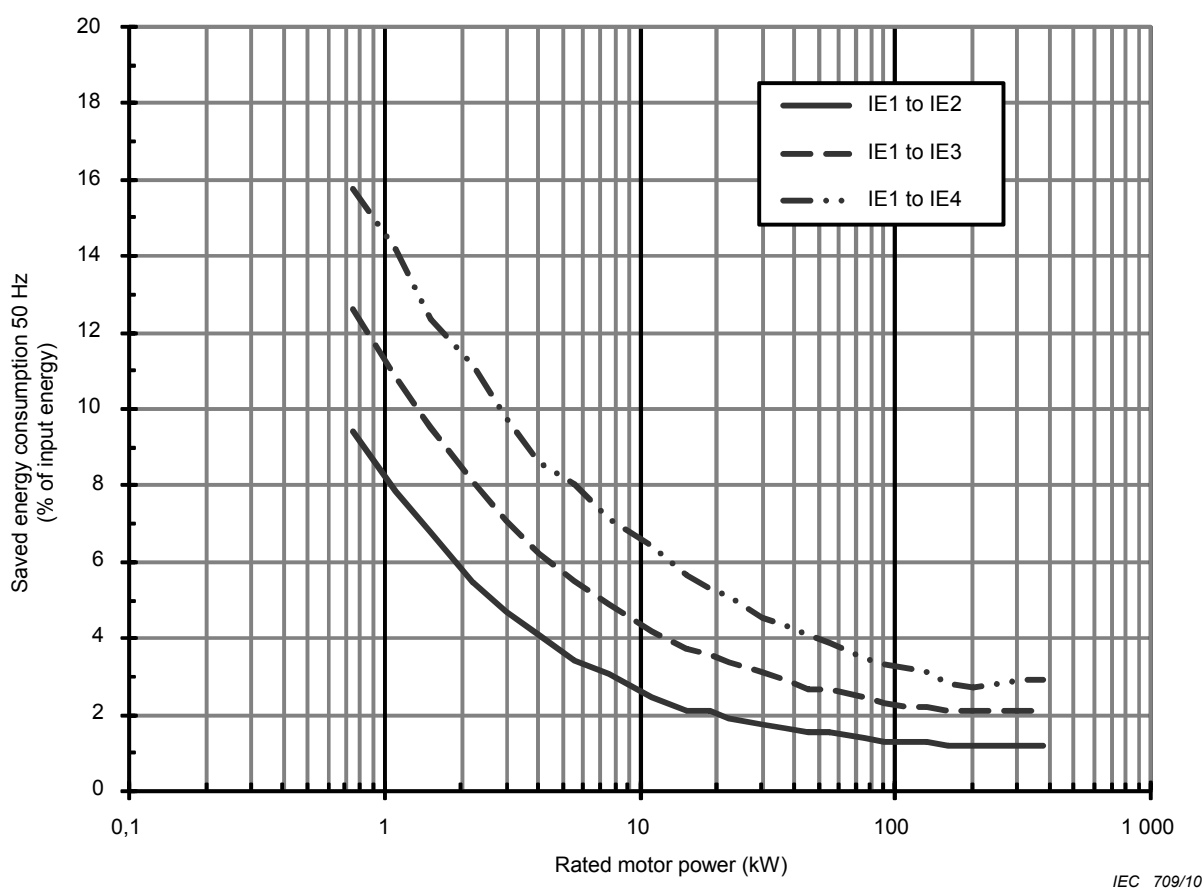


Figure 10 – Potential energy savings by improvement of efficiency classes for motors running at rated load

7.5 Applications involving extended periods of light load operations

A number of methods have been proposed to reduce the voltage applied to the motor in response to the applied load, the purpose of this being to reduce the magnetizing losses during periods when the full torque capability of the motor is not required. Typical of these devices is the power factor controller. The power factor controller is a device that adjusts the voltage applied to the motor to approximate a preset power factor.

These power factor controllers may, for example, be beneficial for use with motors rated less than 3 kW operating for extended periods of light loads where the magnetization losses are a relatively high percentage of the total loss. Care must be exercised in the application of these

controllers. Savings are achieved only when the controlled motor is operated for extended periods at light load.

Particular care must be taken when considering their use with motors rated more than 3 kW. A typical 7,5 kW motor should have idle losses in the order of 4 % or 5 % of the rated output. In this size range the magnetization losses that can be saved may not be equal to the additional losses caused by the distorted voltage wave form introduced by the power-factor controller.

7.6 Applications involving overhauling loads

Overhauling loads typically result in energy waste if some form of dissipative braking is used. Examples of overhauling loads are: deceleration of high inertia loads, absorption test stands, unwind stands, web process stands, and downhill conveyors. In these cases energy can be saved by the use of regenerative devices.

7.7 Applications where load-torque is increasing with speed (pumps, fans, compressors, etc.)

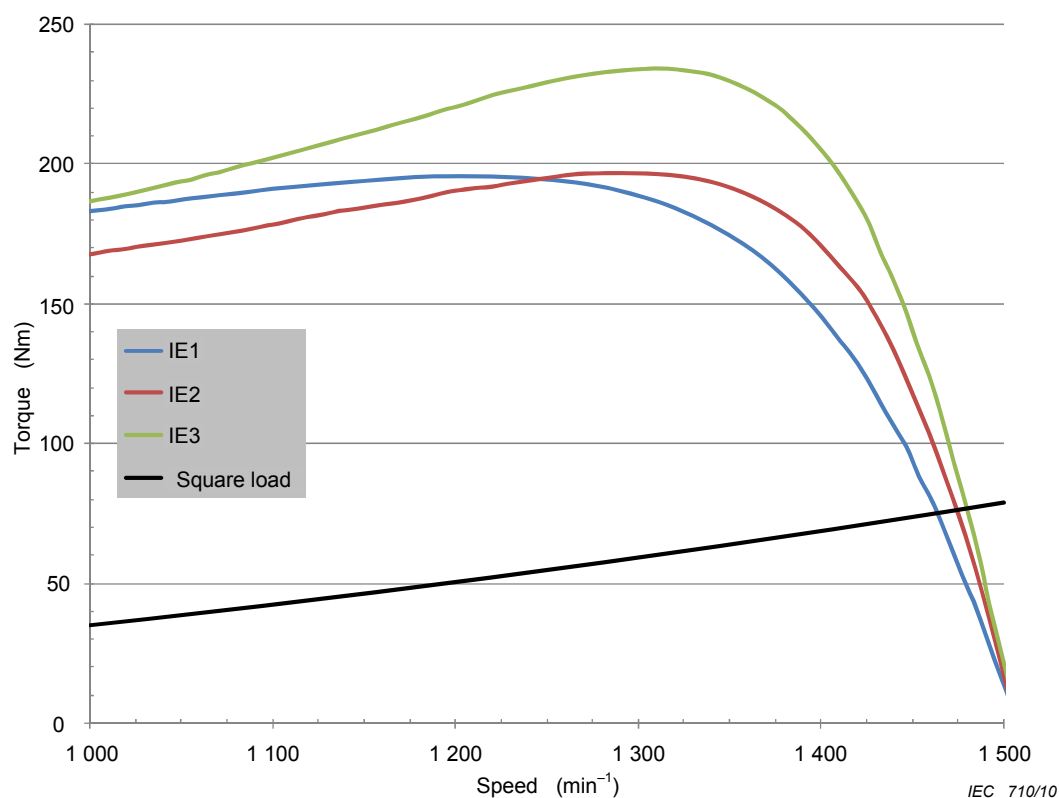


Figure 11 – Typical torque versus speed curves for 11 kW, 4-pole, three-phase, cage-induction motors and load versus speed curves for speed-square-loads

As a general rule, high-efficiency cage-induction motors have a lower slip (see Table 4), i.e. a higher speed of rotation, than motors of lower efficiency. When the torque of the application is a function of the square of the speed, like in pumps, fans, compressors, etc., the increase in speed will lead to an increase in output power (torque) which could in some circumstances defeat the benefits from the improved energy efficiency (see Figure 11).

Table 4 – Example of changing of efficiency, speed and torque demand with energy efficiency class of three 11 kW, 50 Hz motors in the same application

	eff %	n min ⁻¹	T Nm	P_{out} kW	P_{in} kW
IE1	87,6	1464	75,4	11,559	13,195
IE2	89,8	1474	76,4	11,792	13,131
IE3	91,4	1480	77,1	11,948	13,073

Therefore, in such applications when a motor of lower efficiency is retrofitted by a motor of increased efficiency, the input power should not reduce as much as anticipated when comparing the efficiencies of the two motors.

In some cases the input power of the energy efficient motor may actually increase compared to the motor of lower efficiency.

7.8 Applications involving frequent starts and stops and/or mechanical braking

Energy efficient motor designs typically reduce I²R losses either by a reduced utilization, i.e. by over sizing the motor, and/or by improved conductor material in the rotor (for example die-cast copper instead of aluminium).

However both concepts automatically lead to increased rotor inertia when comparing energy-efficient motors with lower-efficiency motors of the same output power rating.

In applications where frequent starts and stops are required, the increased rotor-inertia will increase the run-up time and the power consumption during run-up. It will also reduce the permissible number of starts per hour thereby possibly limiting the application's throughput.

Furthermore, when braking is performed by a mechanical braking system, both the wear of the brake disc and the braking time will increase for motors with higher rotor inertia.

The run-up losses can be greatly reduced and the permissible number of starts per hour can be increased by using a frequency converter to start the motor instead of on-line starting. The general disadvantage of energy efficient motors in this field of applications however remains.

NOTE A soft-starter will reduce the run-up torques but will neither reduce losses nor improve the efficiency.

7.9 Applications involving explosive gas or dust atmospheres

Some design restrictions exist for electric motors in explosive gas or dust atmospheres.

Motors with flameproof enclosures ("d") (according to IEC 60079-1) or type of protection "n" (according to IEC 60079-15) are usually not affected.

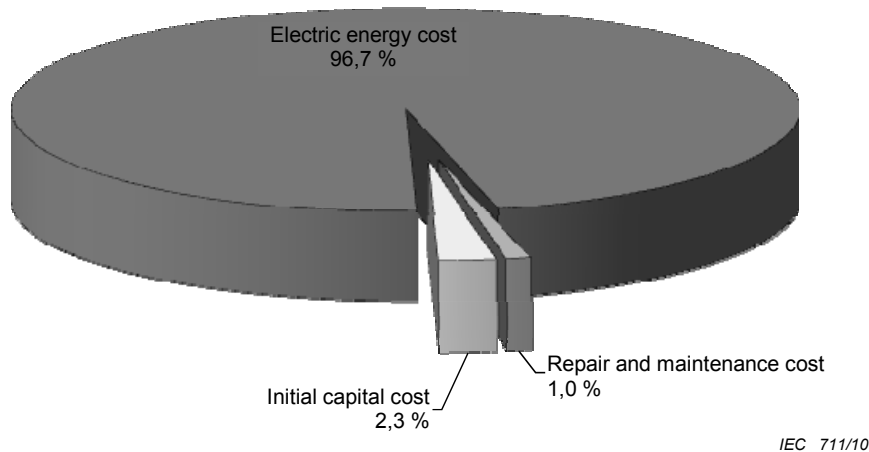
Motors with increased safety ("e") (according to IEC 60079-7) could be limited by the requirements on t_E-time, air-gap, startup current etc. Their energy efficiency level and their efficiency classification may be reduced.

Motors constructed for use in explosive dust atmospheres with dust ignition protection by enclosure "t" or "tD" (according to IEC 60079-31 or IEC 61241-1) have additional shaft seals. Their energy efficiency level might be reduced.

8 Economy

8.1 Relevance to users

The motor user wants a reliable and cost effective motor system. Initial motor purchase cost is low compared with operating cost during the operation phase. Operating costs of electric motors are generally over 90 % of the total cost of ownership (see Figure 12).



NOTE Source: EuP Lot 11, 2008, see Bibliography.

Figure 12 – 11 kW IE3 motor operated at full load, 4 000 operating hours per year, 15 years life cycle

Higher efficiency motors cost more because of their higher production quality and additional material used. The additional cost depends on output size and type of motor. Between IE1 and IE2 some 10 % to 15 %, between IE2 and IE3 another 10 % to 15 % have to be added to the amount of required active materials (steel, copper). Furthermore, higher quality materials may be necessary. Therefore, the typical price increase could be between 10 % to 30 % per efficiency class improvement. In comparing motor efficiency not only the increase of efficiency but also the respective power factor has to be taken into account.

Both in the case of replacement and with new installations, users are faced with a complex decision for the purchase because it involves the consideration of operating costs together with initial purchase cost for a variety of project possibilities. In the case of replacement also the case of repairing the motor should be evaluated.

To determine the economic feasibility of installing energy efficient motors, assess the total annual energy savings in relation to the extra cost of these motors over the existing or standard motors.

Two methods are generally used for the decision making:

- simple pay back;
- life cycle cost.

8.2 Initial purchase cost

The initial purchase cost consists of planning, installation and the purchase price of the motor and additional equipment, such as adjustable speed drives.

For every cost comparison a baseline case has to be defined. In countries with MEPS (Minimum Energy Performance Standards) this is the motor with the respective efficiency level; in countries with no mandatory requirements it is the most often used standard motor in a given market. Then a project case has to be defined with higher efficiency motors up to IE3.

The cost of variable speed drives has to be added to the project cost if they are considered to be feasible for the given type of machines and operation.

In case of replacement upon failure, no cost for the existing motor has to be taken into account. In case of premature replacement a residual value for the lost operation time can be included with the purchase price calculation.

8.3 Operating cost

The operating cost consists of electricity, maintenance and repair.

The anticipated electricity consumption is calculated based on the following three elements:

- average annual load factor (for example see Figure 13);
- motor efficiency for this average load factor;
- annual operating hours.

For fixed speed motors these elements can be estimated easily with fair accuracy. For the calculation of motor systems with variable load and the eventual use of variable speed drives (VSDs) the calculation of the average load factor, the respective hours of operation and the efficiencies of the motor plus the variable speed drive have to be based on a typical load profile. If a relevant measured load profile of existing systems is not available, an average profile has to be assumed (example):

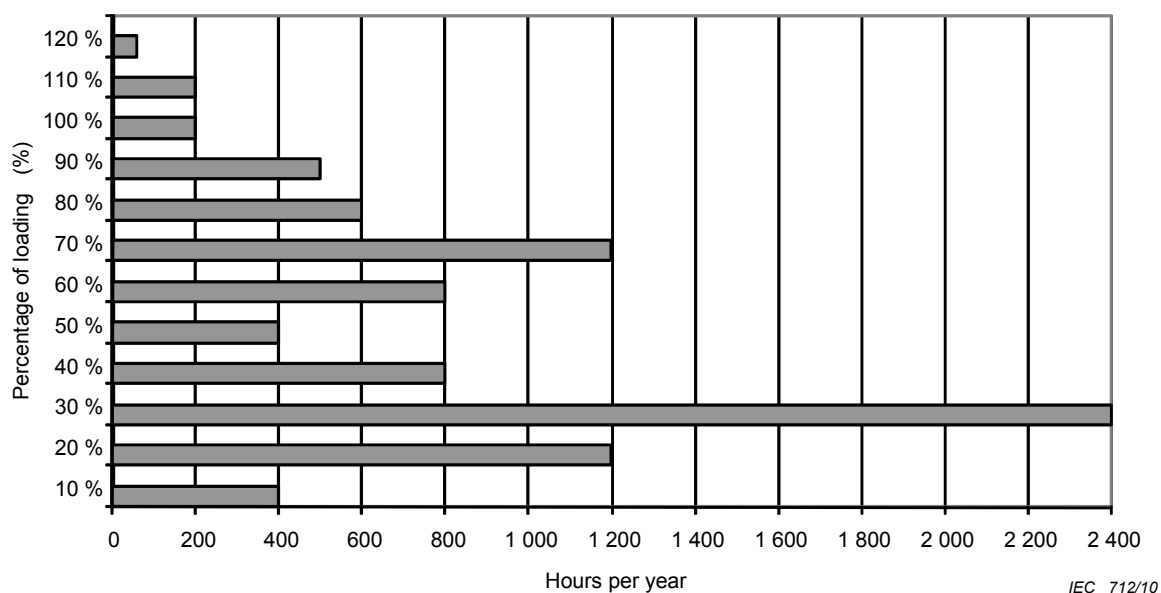


Figure 13 – Example of a load factor graph: fraction of annual operating hours

The operating cost for electricity generally consists of three elements of a tariff or a supply contract with the local utility:

- energy (kWh) price of consumed electricity (taking day/night, seasonal and other tariff elements into account);

- paid peak load cost (kW) taking recorded 15 min peaks;
- non-corrected power factor (kVA) cost.

Local variations of the above electricity cost elements and structure have to be taken into account as well as discounts, taxes and future price hikes during the anticipated technical lifecycle (how long the machine can typically operate including repairs) of the motor or the application (whatever is less). Fixed costs elements in tariffs are not taken into account because they are not affected by energy efficiency improvements.

Added to the electricity costs are maintenance and repair costs. Their value has to be estimated based on plant experience of cost per operating hour of motors of different output, speed and annual operation.

For a lifecycle cost analysis also the lifetime of the operating costs have to be evaluated. If no data from plant experience in the motor stock are available the following average technical data for lifetime may be used (see Table 5):

Table 5 – Average lifecycles for electric motors

	Rated motor output			
	kW			
	0,75 – 1,1	1,1 – 11	11 – 110	110 – 370
Average lifecycle (years)	10	12	15	20

The actual lifetime depends on annual operating hours, cycles and load factor and motor reliability, maintenance quality and repairs. Because operating cost, especially electricity cost, is by far the dominant element in a cost calculation it should be tested with a sensitivity analysis. One or several elements of the operating costs are varied to check whether the results are robust. Robust results mean that different variants of payback time or life cycle cost do not change their sequence in the comparison. Often assumptions for annual operating hours are the most critical element and thus should be varied.

8.4 Rewinding cost

Apart from initial purchase cost and operating cost, the cost of repairing of the failed motors is also taken into account in decision making.

Following a motor failure or burnout the following options are to be considered:

- rewind the failed motor;
- purchase a new standard efficiency motor;
- purchase an energy efficient motor.

Assuming that the failed motor can be rewound, the lowest initial cost approach will be to rewind the motor as per original specifications. However, depending upon the rewinding practices used by different rewinding shops (e.g. heating temperatures used to remove the old windings may change properties of the steel laminations or the new copper wire may change the stator copper losses) there may be a drop in efficiency in the range of 1,0 % to 2,5 % points.

In such case, a comparison is to be done between using a rewound motor (rewinding cost + higher operating cost due to drop in efficiency) and purchasing a new energy efficient motor (with price premium and lower operating cost due to higher efficiency). Apart from this, load factor, annual operating hours, cost of electricity also to be considered for accurate costing.

8.5 Payback time

The simple pay back method is based on the additional investment for higher efficiency motors (and maybe variable speed drives (VSDs) and other improved equipment) versus lower annual operating cost.

The user has to know the following elements:

- purchase price of project variants for different efficiency class motors and variable speed drives;
- annual operating time;
- cost of electricity;
- tax reduction schemes;
- utility rebates.

The user can then calculate operating cost and compare the pay-back time of different proposed project variants. For payback periods up to one year, it is usually not required to take the cost of inflation, maintenance, labour and rise in energy prices into account. However, if the payback time is more than one year, the above can not be neglected. The user can then select the solution with the shortest pay-back time.

The user may also have a previously defined maximum pay-back time in his plant which is usually between 2 and 5 years. This period is considerably shorter than the expected lifetime of the motor system. It means that after a short pay-back time the motor continues to run until the end of its technical lifetime free of cost for the added investment. The motor generates in this phase a profit with a "golden end".

8.6 Life cycle cost

In the life cycle cost analysis the summation of the costs of all elements in three phases for different project variants are compared with the baseline:

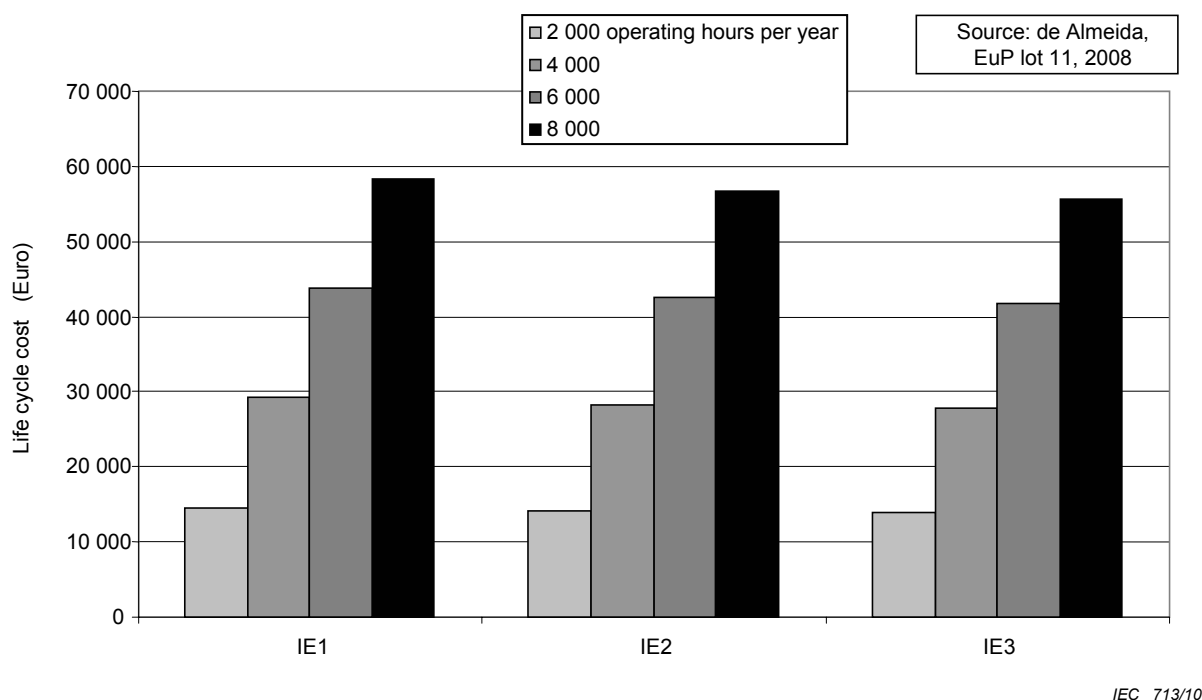
- initial purchase (or repair), planning and installation cost;
- use-phase with operation cost (energy, maintenance and repair);
- end-of-life phase with removal and recycling cost.

For accurate calculation a discounted cash flow analysis has to be made taking interest rates and inflation rates into account. The user has to know the purchase prices of different efficiency class motors and variable speed drives, the annual operating time, the cost of electricity, and also the expected duration of the lifetime and the average cost of maintenance and repair.

The cost of end-of-life is usually neglected in the calculation because recycling of the material of the motor pays for eventual cost of dismantling and transport.

The user can select the project variant with the least life cycle cost. The least life cycle cost is the best choice for the user. In larger investments they can help to decide on optimum projects.

Recent studies in Europe (EuP 2008: Figure 14) confirm that new IE3 motors between 1,1 kW and 110 kW have lower life cycle costs than IE1 or IE2 motors if they have more than 2 000 operating hours per year.



NOTE Source: EuP Lot 11, 2008, see Bibliography.

Figure 14 – Life cycle cost analysis of an 11 kW motor operating at full load

In several studies also the environmental impact of high efficiency motors and variable drives have been studied. The additional material used in the production of the more energy efficient equipment is reflected in higher purchase price. The studies confirm that if the life cycle cost is lower for higher efficiency motors this is also true when considering the environmental impact.

9 Maintenance

The electric motor generally needs little maintenance, therefore proper maintenance is often forgotten. There are a number of common abnormalities which have an adverse effect on a motor's performance:

- insufficient ventilation;
- high ambient temperatures;
- mechanical misalignment;
- improper V-belt application;
- improper lubrication;
- excessive moisture;
- contamination;
- sustained overload;
- abnormal voltage;
- extreme voltage unbalance (single-phasing).

Insufficient ventilation or high ambient temperatures result in higher resistance in the winding. On the average, the efficiency of a motor will decay by 0,2 to 1,0 % points from room temperature to its operating temperature. Furthermore, excessive temperature rises caused

by poor maintenance or misapplication reduce the operating life of the motor and increase energy consumption.

Sometimes additional friction gradually develops within the driven machine. This could be caused by a build up of dust on a fan, the wearing of parts, misalignment of gears or belts, or insufficient lubrication in the driven machine. These conditions cause the driven machine to become less efficient, which reduces system efficiency and increases energy consumption. To assure continued efficient operation and long motor life, a regular schedule for maintenance of motors and driven equipment should be established.

Annex A (informative)

Super-premium efficiency (IE4)

The following proposed nominal limits of super-premium efficiency are given for information purposes. In IEC 60034-30 the terms “super-premium” and “IE4” are projected as approximately 15 % reduced losses compared to IE3. The exact definition is proposed in this Annex.

The IE4 energy efficiency class is not limited to three-phase cage-induction motors like the classes IE1, IE2 and IE3 of IEC 60034-30. Instead, IE4 is intended to be used with all types of electrical motors, particularly with converter-fed machines (both cage-induction and other types like permanent-magnet synchronous-motors, etc.).

Since grid frequency and number of poles of converter-fed machines are not directly related to speed, these motors are typically rated for a speed range and classified by torque rather than power. Consequently the limits of IE4 are ranked by torque and given for discrete speed ranges. Figure A.1 shows examples of such efficiency curves.

NOTE 1 Users should be aware that frequency converters also have an associated efficiency which will reduce the system efficiency (motor plus converter).

NOTE 2 For efficiency determination of converter-fed motors, see IEC 60034-2-3 (in preparation).

However, it is neither required to rate the motor for the entire speed range from 801 to 3 600 min⁻¹ nor for a constant torque rating over the whole rated speed range.

The nominal limits of super-premium efficiency may generally be computed for the rated torque T_N using the following formula:

$$\eta_n = A \times \left[\log_{10} \left(\frac{T_N}{1 \text{ Nm}} \right) \right]^3 + B \times \left[\log_{10} \left(\frac{T_N}{1 \text{ Nm}} \right) \right]^2 + C \times \log_{10} \left(\frac{T_N}{1 \text{ Nm}} \right) + D$$

where A , B , C , D are interpolation coefficients (see Table A.1 below).

NOTE 3 The formula and interpolation coefficients were mathematically derived to create a best fitting curve for the desired nominal efficiency limits. They do not have a physical meaning.

The resulting efficiency (%) are rounded to the nearest tenth, i.e. xx,x %.

Nominal IE4 efficiencies for torques greater than 2 000 Nm are equal to the limits for 2 000 Nm. Nominal IE4-efficiencies for output powers greater than 400 kW are not defined.

When more than one torque and speed (ranges) are rated, the nominal efficiency limits according to this standard should be computed and applied individually for each combination of rated motor torque(s) and rated speed (ranges).

For motors rated by power P_N rather than torque the following formula should be used to determine T_N :

$$T_N = \frac{P_N}{\eta_N} \cdot \frac{60 \cdot 1000}{2\pi}$$

The resulting torque should be rounded to the nearest value from the R10 series of preferred numbers, see ISO 3.

In order to maintain compatibility with single-speed, line-operated 2-, 4- and 6-pole motors, Table A.3 for torque and speed conversion to standard power levels is provided. On this basis Table A.4 gives the nominal IE4-efficiency limits for 50 Hz power supply and Table A.5 for 60 Hz power supply.

Table A.1 – Interpolation coefficients

IE-Code	Coefficients	From 801 min ⁻¹ to 1 000 min ⁻¹	From 1 001 min ⁻¹ to 1 200 min ⁻¹	From 1 201 min ⁻¹ to 1 500 min ⁻¹	From 1 501 min ⁻¹ to 1 800 min ⁻¹	From 1 801 min ⁻¹ to 3 000 min ⁻¹	From 3 001 min ⁻¹ to 3 600 min ⁻¹
		max 2000 Nm	max 2000 Nm	max 2000 Nm	max 2000 Nm	max 1250 Nm	max 1000 Nm
IE4	A	0,2824	0,1901	0,1846	0,1648	0,2116	0,2227
	B	-3,8439	-2,9242	-2,7433	-2,4976	-2,6695	-2,7262
	C	17,4628	13,6953	12,7473	11,6595	11,3369	11,1625
	D	70,2209	76,1961	77,9565	79,7787	80,8449	81,2267

For simplified use for discrete torque levels, the nominal limits from Table A.2 may be applied.

Table A.2 – Nominal limits (%) for super-premium efficiency (IE4)

T_N Nm	From 801 min ⁻¹ to 1 000 min ⁻¹	From 1 001 min ⁻¹ to 1 200 min ⁻¹	From 1 201 min ⁻¹ to 1 500 min ⁻¹	From 1 501 min ⁻¹ to 1 800 min ⁻¹	From 1 801 min ⁻¹ to 3 000 min ⁻¹	From 3 001 min ⁻¹ to 3 600 min ⁻¹
2,5	76,6	81,2	82,6	84,0	84,9	85,3
3,2	78,0	82,3	83,7	85,0	85,9	86,1
4,0	79,4	83,4	84,7	85,9	86,7	87,0
5,0	80,6	84,4	85,6	86,8	87,5	87,8
6,3	81,9	85,4	86,5	87,6	88,3	88,5
8	83,1	86,3	87,4	88,4	89,1	89,2
10	84,1	87,2	88,1	89,1	89,7	89,9
12,5	85,1	88,0	88,9	89,8	90,3	90,5
16	86,2	88,8	89,7	90,5	91,0	91,1
20	87,1	89,5	90,3	91,1	91,5	91,6
25	87,9	90,1	90,9	91,6	92,1	92,1
32	88,7	90,8	91,5	92,2	92,5	92,6
40	89,5	91,4	92,1	92,7	93,0	93,0
50	90,2	92,0	92,6	93,2	93,4	93,4
63	90,8	92,5	93,1	93,6	93,8	93,8
80	91,5	93,0	93,6	94,1	94,2	94,1
100	92,0	93,4	94,0	94,4	94,5	94,4
125	92,5	93,8	94,3	94,8	94,8	94,7
160	93,1	94,2	94,7	95,1	95,1	95,0
200	93,5	94,5	95,0	95,4	95,4	95,2
250	93,9	94,8	95,3	95,6	95,6	95,4
315	94,3	95,1	95,6	95,9	95,8	95,6

T_N Nm	From 801 min ⁻¹ to 1 000 min ⁻¹	From 1 001 min ⁻¹ to 1 200 min ⁻¹	From 1 201 min ⁻¹ to 1 500 min ⁻¹	From 1 501 min ⁻¹ to 1 800 min ⁻¹	From 1 801 min ⁻¹ to 3 000 min ⁻¹	From 3 001 min ⁻¹ to 3 600 min ⁻¹
400	94,6	95,4	95,8	96,1	96,0	95,7
500	94,9	95,6	96,0	96,3	96,2	95,9
630	95,2	95,8	96,2	96,5	96,3	96,0
800	95,4	96,0	96,4	96,6	96,4	96,1
1000	95,6	96,1	96,5	96,7	96,5	96,2
1250	95,8	96,2	96,6	96,8	96,6	-
1600	96,0	96,3	96,7	96,9	-	-
2000	96,1	96,4	96,8	97,0	-	-
2500	96,1	96,4	96,8	-	-	-
3150	96,1	96,4	-	-	-	-
4000	96,1	-	-	-	-	-

**Table A.3 – Standard power in kW associated with torque and speed
for line-operated motors**

T_N Nm	50 Hz 6-pole (from 801 min ⁻¹ to 1 000 min ⁻¹)	60 Hz 6-pole (from 1 001 min ⁻¹ to 1 200 min ⁻¹)	50 Hz 4-pole (from 1 201 min ⁻¹ to 1 500 min ⁻¹)	60 Hz 4-pole (from 1 501 min ⁻¹ to 1 800 min ⁻¹)	50 Hz 2-pole (from 1 801 min ⁻¹ to 3 000 min ⁻¹)	60 Hz 2-pole (from 3 001 min ⁻¹ to 3600 min ⁻¹)
2,5	-	-	-	-	0,75	-
3,2	-	-	-	-	-	1,1
4,0	-	-	-	0,75	1,1	1,5
5,0	-	-	0,75	-	1,5	-
6,3	-	0,75	-	1,1	-	2,2
8	0,75	-	1,1	1,5	2,2	-
10	1,1	1,1	1,5	-	3	3,7
12,5	-	1,5	-	2,2	4	-
16	1,5	-	2,2	-	-	5,5
20	2,2	2,2	3	3,7	5,5	7,5
25	-	-	4	-	7,5	-
32	3	3,7	-	5,5	-	11
40	4	-	5,5	7,5	11	15
50	5,5	5,5	7,5	-	15	18,5
63	-	7,5	-	11	18,5	22
80	7,5	-	11	15	22	30
100	-	11	15	18,5	30	37
125	11	15	18,5	22	37	45
160	15	18,5	22	30	45	55
200	18,5	22	30	37	55	75
250	22	30	37	45	75	90
315	30	37	45	55	90	110
400	37	45	55	75	110 / 132	150
500	45	55	75	90	160	185

T_N Nm	50 Hz 6-pole (from 801 min ⁻¹ to 1 000 min ⁻¹)	60 Hz 6-pole (from 1 001 min ⁻¹ to 1 200 min ⁻¹)	50 Hz 4-pole (from 1 201 min ⁻¹ to 1 500 min ⁻¹)	60 Hz 4-pole (from 1 501 min ⁻¹ to 1 800 min ⁻¹)	50 Hz 2-pole (from 1 801 min ⁻¹ to 3 000 min ⁻¹)	60 Hz 2-pole (from 3 001 min ⁻¹ to 3600 min ⁻¹)
630	55	75	90	110	200	220 / 250
800	75	90	110	150	250	300
1000	90 / 110	110	132 / 160	185	315	335 / 375
1250	132	150	200	220 / 250	355 / 375	-
1600	160	185	250	300	-	-
2000	200	220 / 250	315	335 / 375	-	-
2500	250	300 / 335	355 / 375	-	-	-
3150	315	375	-	-	-	-
4000	355 / 375	-	-	-	-	-

**Table A.4 – Nominal limits for super-premium efficiency (IE4)
for 50 Hz line operated motors**

P_N kW	2-pole 50 Hz	4-pole 50 Hz	6-pole 50 Hz
0,75	84,9	85,6	83,1
1,1	86,7	87,4	84,1
1,5	87,5	88,1	86,2
2,2	89,1	89,7	87,1
3	89,7	90,3	88,7
4	90,3	90,9	89,5
5,5	91,5	92,1	90,2
7,5	92,1	92,6	91,5
11	93,0	93,6	92,5
15	93,4	94,0	93,1
18,5	93,8	94,3	93,5
22	94,2	94,7	93,9
30	94,5	95,0	94,3
37	94,8	95,3	94,6
45	95,1	95,6	94,9
55	95,4	95,8	95,2
75	95,6	96,0	95,4
90	95,8	96,2	95,6
110	96,0	96,4	95,6
132	96,0	96,5	95,8
160	96,2	96,5	96,0
200	96,3	96,6	96,1
250	96,4	96,7	96,1
315	96,5	96,8	96,1
355	96,6	96,8	96,1
375 (400)	96,6	96,8	96,1

**Table A.5 – Nominal limits for super-premium efficiency (IE4)
for 60 Hz line operated motors**

P_N kW	2-pole 60 Hz	4-pole 60 Hz	6-pole 60 Hz
0,75	-	85,9	85,4
1,1	86,1	87,6	87,5 ^a
1,5	87,0	88,4	88,5 ^a
2,2	88,5	89,8	89,5
3,7	89,9	91,1	90,8
5,5	91,1	92,2	92,0
7,5	91,6	92,7	92,5
11	92,6	93,6	93,4
15	93,0	94,1	93,8
18,5	93,4	94,4	94,2
22	93,8	94,8	94,5
30	94,1	95,1	94,8
37	94,4	95,4	95,1
45	94,7	95,6	95,4
55	95,0	95,9	95,6
75	95,2	96,1	95,8
90	95,4	96,3	96,0
110	95,6	96,5	96,1
150	95,7	96,6	96,2
185	95,9	96,7	96,3
220	96,0	96,8	96,4
250	96,0	96,8	96,4
300	96,1	96,9	96,4
335	96,2	97,0	96,4
375	96,2	97,0	96,4

^a Due to discontinuities in the 60 Hz IE3 curves for 6-pole motors with output powers 1,1 kW; 1,5 kW and 2,2 kW, the IE4 limit values derived from the smooth curves (Table A.2) are slightly below the IE3 values (87,5 % for 1,1 kW and 88,5 % for 1,5 kW).

When applying the IE4 efficiency-limit values to motors in the scope of IEC 60034-30 it shall be ensured that the required energy efficiency level of IE3 is also met.

Therefore, the efficiency limits of Table A.5 for 60 Hz, 6-pole motors 1,1 kW and 1,5 kW are slightly above the limits derived from Table A.2.

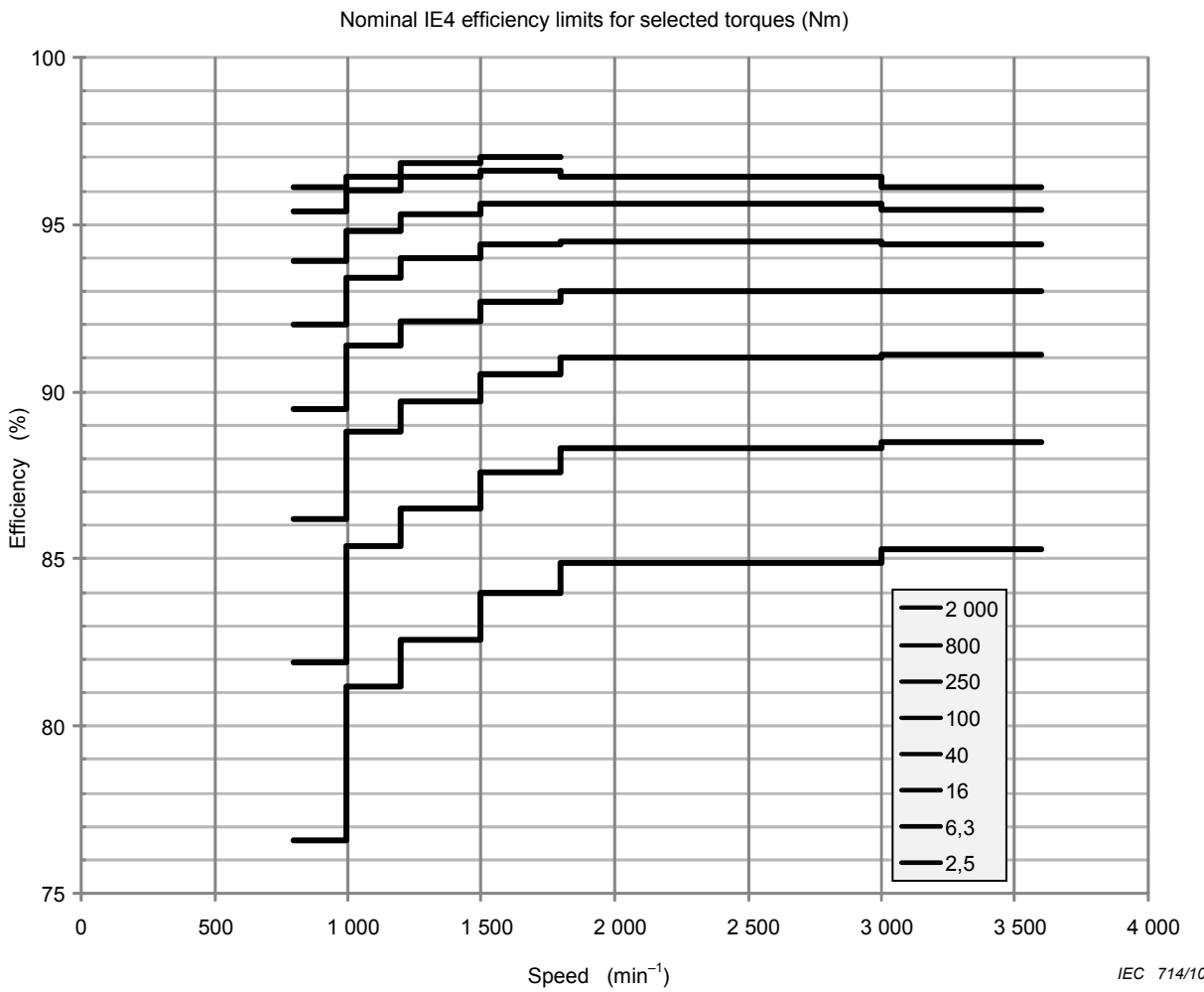


Figure A.1 – IE4 efficiency limits

Bibliography

IEC 60034-2-1:2007, *Rotating electrical machines – Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles)*

IEC 60034-2-3, *Rotating electrical machines – Part 2-3: Specific test methods for determining losses and efficiency of converter-fed AC motors*¹

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

IEC TS 60034-17, *Rotating electrical machines – Part 17: Cage induction motors when fed from converters – Application guide*

IEC TS 60034-25, *Rotating electrical machines – Part 25: Guidance for the design and performance of a.c. motors specifically designed for converter supply*

IEC 60034-26, *Rotating electrical machines – Part 26: Effects of unbalanced voltages on the performance of three-phase cage induction motors*

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 60079-0, *Explosive atmospheres – Part 0: Equipment – General requirements*

IEC 60300-3-3, *Dependability management – Part 3-3: Application guide – Life cycle costing*

IEC 61241-1, *Electrical apparatus for use in the presence of combustible dust – Part 1: Protection by enclosures "tD" (withdrawn)*

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

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

ISO 3, *Preferred numbers – Series of preferred numbers*

EN 50347, *General purpose three-phase induction motors having standard dimensions and outputs – Frame numbers 56 to 315 and flange numbers 65 to 740*

NEMA ICS7.1, *Safety Standards for Construction and Guide for Selection, Installation, and Operation of Adjustable-Speed Drive Systems*

NEMA MG1, *Motors and Generators*

NEMA MG10, *Energy Management Guide For Selection and Use of Fixed Frequency Medium AC Squirrel-Cage Polyphase Induction Motors*

NEMA MG11, *Energy Management Guide For Selection and Use of Single-Phase Motors*

IEEE 112-1996, *IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*

¹ In preparation.

DE ALMEIDA, ANIBAL, et al. *Energy-using Products Directive*, Preparatory Studies, Lot 11: Motors, Coimbra Portugal, February 2008

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	45
INTRODUCTION.....	47
1 Domaine d'application	48
2 Références normatives.....	48
3 Termes, définitions et symboles	48
3.1 Termes et définitions	48
3.2 Symboles	48
4 Généralités.....	49
5 Rendement.....	50
5.1 Généralités.....	50
5.2 Pertes des moteurs	52
5.3 Pertes supplémentaires d'un moteur lorsqu'il fonctionne à l'aide d'un convertisseur de fréquence	52
5.4 Moteurs pour des classes de rendement plus élevé.....	53
5.5 Variations des pertes d'un moteur	54
5.6 Rendement à charge partielle.....	54
5.7 Méthodes d'essai du rendement	56
5.8 Facteur de puissance (voir la Figure 4)	57
5.9 Adaptation des moteurs et des convertisseurs à fréquence variable	58
5.10 Moteurs assignés pour 50 Hz et 60 Hz	59
5.11 Moteurs assignés pour différentes tensions ou une gamme de tensions	62
5.12 Moteurs assignés pour un fonctionnement à des fréquences différentes de 50/60 Hz	62
5.13 Rendement des convertisseurs à fréquence variable	62
5.14 Facteur de puissance d'un convertisseur de fréquence.....	64
6 Environnement	64
6.1 Performance de démarrage	64
6.2 Vitesse de fonctionnement et glissement.....	65
6.3 Effets de la qualité de l'alimentation et de la variation de tension et de fréquence	65
6.4 Effets du déséquilibre des tensions	66
6.5 Effets de la température ambiante.....	66
7 Applications.....	66
7.1 Généralités.....	66
7.2 Economies d'énergie par commande de vitesse (commandes à vitesse variable, VSD)	66
7.3 Dimensionnement correct du moteur	67
7.4 Application en service continu	67
7.5 Applications impliquant de longues périodes de fonctionnement à faible charge.....	68
7.6 Applications impliquant des charges négatives.....	69
7.7 Applications pour lesquelles le couple résistant augmente avec la vitesse (pompes, ventilateurs, compresseurs, etc.)	69
7.8 Applications impliquant des démarrages et des arrêts fréquents et/ou un freinage mécanique.....	70
7.9 Applications impliquant des atmosphères explosives de gaz ou de poussières.....	70

8	Aspects économiques.....	71
8.1	Pertinence vis-à-vis des utilisateurs	71
8.2	Coût d'achat initial.....	72
8.3	Frais d'exploitation	72
8.4	Coût de rebobinage.....	74
8.5	Période de récupération	74
8.6	Coût du cycle de vie.....	75
9	Maintenance.....	76
	Annexe A (informative) Rendement super premium (IE4).....	78
	Bibliographie.....	84

Figure 1	– Vue d'ensemble des différents niveaux d'économie d'énergie électrique relatifs aux systèmes d'entraînement	49
Figure 2	– Pertes représentatives des moteurs éconergétiques, des convertisseurs et des freins électromécaniques.....	50
Figure 3	– Rendement représentatif en fonction des bandes de courbes de charge pour les moteurs triphasés à induction à cage dans différentes gammes de puissances de sortie (approximativement 1,1 kW, 15 kW et 150 kW).....	55
Figure 4	– Facteur de puissance représentatif en fonction des bandes de courbes de charge pour les moteurs triphasés à induction à cage dans différentes gammes de puissances de sortie (approximativement 1,1 kW, 15 kW et 150 kW)	57
Figure 5	– Réduction représentative du rendement énergétique, en points de %, relative aux moteurs basse tension 4 pôles, entre 50 Hz et 60 Hz, au même couple (puissance à 60 Hz augmentée de 20 %).....	61
Figure 6	– Réduction représentative du rendement énergétique, en points de %, relative aux moteurs basse tension 4 pôles, entre 50 Hz et 60 Hz, à la même puissance de sortie (couple à 60 Hz réduit de 20 %).....	61
Figure 7	– Rendement représentatif des convertisseurs de type triphasé indirect, source de tension, avec un dispositif frontal passif, pour des pourcentages de charge représentatifs des pompes, des ventilateurs et des compresseurs	62
Figure 8	– Rendement représentatif des convertisseurs de type triphasé indirect, source de tension, avec un dispositif frontal passif, pour des pourcentages de charge représentatifs d'un couple constant.....	63
Figure 9	– Variations représentatives du courant, de la vitesse, du facteur de puissance et du rendement, en fonction de la tension, pour une puissance de sortie constante.....	65
Figure 10	– Economies potentielles d'énergie par amélioration du rendement en fonction des classes pour des moteurs fonctionnant à leur charge assignée	68
Figure 11	– Couples représentatifs en fonction des courbes de vitesse pour des moteurs triphasés à induction à cage, 4 pôles de 11 kW et charges représentatives en fonction des courbes de vitesse pour des charges variant comme le carré de la vitesse	69
Figure 12	– Cycle de vie sur 15 ans d'un moteur IE3, 11 kW, fonctionnant à pleine charge, 4 000 h de fonctionnement par an	71
Figure 13	– Exemple d'un profil d'indice de charge: pourcentage de charge rapporté au nombre d'heures de fonctionnement par an.....	73
Figure 14	– Analyse du coût du cycle de vie d'un moteur de 11 kW fonctionnant à pleine charge.....	76
Figure A.1	– Limites de rendement IE4	83

Tableau 1	– Distribution des pertes dans les moteurs électriques à induction à cage, triphasés, 4 pôles	52
-----------	---	----

Tableau 2 – Calculs, donnés à titre d'exemple, du rendement d'un moteur fonctionnant à 50 Hz et à 60 Hz avec le même couple, en utilisant comme base une assignation de moteur à 50 Hz	60
Tableau 3 – Distribution de perte pour des convertisseurs basse tension.....	63
Tableau 4 – Exemple de variations du rendement, de la vitesse et du couple demandé en fonction de la classe de rendement énergétique, pour trois moteurs de 11 kW, 50 Hz dans la même application	69
Tableau 5 – Durées de vie moyennes de moteurs électriques	73
Tableau A.1 – Coefficients d'interpolation	79
Tableau A.2 – Limites nominales (%) pour le rendement "super-premium" (IE4)	79
Tableau A.3 – Puissance normalisée en kW associée au couple et à la vitesse, pour les moteurs fonctionnant directement sur le réseau	80
Tableau A.4 – Limites nominales pour le rendement super premium (IE4) pour les moteurs fonctionnant directement sur le réseau 50 Hz.....	81
Tableau A.5 – Limites nominales pour le rendement super premium (IE4) pour les moteurs fonctionnant directement sur le réseau 60 Hz.....	82

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES –

**Partie 31: Choix des moteurs éconergétiques incluant
les applications à vitesse variable – Guide d'application**

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI – 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 la CEI"). 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 la CEI, participent également aux travaux. La CEI 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 la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de la CEI intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de la CEI se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de la CEI. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que la CEI s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; la CEI 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 la CEI s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de la CEI dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de la CEI et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) La CEI 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 la CEI. La CEI 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 la CEI, 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 la CEI, 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 la CEI ou de toute autre Publication de la CEI, 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 la CEI peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La tâche principale des comités d'études de la CEI est l'élaboration des Normes internationales. Dans des circonstances exceptionnelles, un comité d'études peut proposer la publication d'une spécification technique lorsque

- le soutien nécessaire ne peut pas être obtenu pour la publication d'une Norme internationale, en dépit d'efforts répétés, ou
- le sujet en est encore en évolution d'un point de vue technique ou, pour toute autre raison, il existe une possibilité dans l'avenir mais pas dans l'immédiat pour un accord sur une Norme internationale.

Les spécifications techniques sont révisées dans les trois années qui suivent leur publication pour décider si elles peuvent être transformées en Normes internationales.

La CEI 60034-31, qui est une spécification technique, a été établie par le comité d'études 2 de la CEI: Machines tournantes.

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

Projet soumis à enquête	Rapport de vote
2/1575/DTS	2/1594/RVC

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

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

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

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

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de la CEI sous "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives à la publication recherchée. A cette date, la publication sera

- transformée en Norme internationale,
- reconduite,
- supprimée,
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

IMPORTANT – Le logo "colour inside" qui se trouve sur la page de couverture de cette publication indique qu'elle contient des couleurs qui sont considérées comme utiles à une bonne compréhension de son contenu. Les utilisateurs devraient, par conséquent, imprimer cette publication en utilisant une imprimante couleur.

INTRODUCTION

La présente spécification technique donne des directives techniques d'utilisation des moteurs éconergétiques dans des applications à vitesse constante et à vitesse variable. Elle ne couvre pas les aspects à caractère purement commercial.

Les normes élaborées par le comité d'études 2 de la CEI ne traitent pas des méthodes relatives à la façon d'obtenir un rendement élevé, mais des essais destinés à vérifier la valeur garantie. La CEI 60034-2-1 est la Norme la plus importante permettant cette vérification.

Pendant environ 15 ans des accords régionaux ont été négociés dans de nombreuses régions du monde. Ces accords ont concerné les classes de rendement des moteurs triphasés à induction à cage, avec des puissances de sortie allant jusqu'à un maximum d'environ 200 kW, car des moteurs de cette taille sont installés en grand nombre et pour la plupart, sont produits en série. La conception de ces moteurs a souvent été gouvernée par la demande du marché, favorisant les faibles coûts d'investissement, par conséquent le rendement énergétique n'était pas une priorité première.

Dans la CEI 60034-30 des classes de rendement, relatives aux moteurs à induction à cage à une seule vitesse, ont été définies et des procédures d'essai spécifiées:

IE1	Rendement standard
IE2	Haut rendement
IE3	Rendement premium
IE4	Rendement super-premium

La détermination du rendement pour les moteurs alimentés par un convertisseur de fréquence sera incluse dans la Norme CEI 60034-2-3.

Cependant, concernant les moteurs conçus pour une puissance de sortie assignée de 1 MW et plus, généralement réalisés sur commande, un rendement élevé a toujours été l'un des buts le plus important recherché lors de la conception. Le rendement à pleine charge de ces machines est généralement compris entre 95 % et 98 %. Le rendement fait généralement partie du contrat d'achat et des pénalités sont prévues si les valeurs garanties ne sont pas tenues. Par conséquent, des caractéristiques plus élevées sont d'une importance secondaire lors de l'assignation des classes de rendement.

Avec l'autorisation de la NEMA (National Electrical Manufacturers Association), certaines parties de la présente Spécification technique sont basées sur le document NEMA MG 10, *Energy Management Guide For Selection and Use of Fixed Frequency Medium AC Squirrel-Cage Polyphase Induction Motors*.

MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES –

Partie 31: Choix des moteurs éconergétiques incluant les applications à vitesse variable – Guide d'application

1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 60034 donne une ligne directrice concernant les aspects techniques relatifs à l'application des moteurs électriques éconergétiques triphasés. Elle s'applique non seulement aux fabricants de moteurs, aux OEM (fabricants originaux d'équipement), aux utilisateurs finaux, aux autorités de réglementation et aux législateurs, mais également à toutes les autres parties intéressées.

Cette spécification technique est applicable à toutes les machines électriques couvertes par la CEI 60034-30. La plupart des informations sont toutefois également appropriées aux machines à induction à cage, dont les puissances de sortie sont supérieures à 375 kW.

2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour 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).

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

CEI 60034-30, *Machines électriques tournantes – Partie 30: Classes de rendement pour les moteurs à induction triphasés à cage, mono vitesse (Code IE)*

3 Termes, définitions et symboles

3.1 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions donnés dans la CEI 60034-1 et dans la CEI 60034-30 s'appliquent.

3.2 Symboles

η_n	est le rendement nominal, %
η_N	est le rendement assigné, %
f_N	est la fréquence assignée, Hz
n_N	est la vitesse assignée, min ⁻¹
P_N	est la puissance de sortie assignée, kW
T_N	est le couple de sortie assigné, Nm
U_N	est la tension assignée, V

4 Généralités

	Composants électriques	Composants mécaniques	Application	Automatisation industrielle	Récupération d'énergie
	Maintenance adéquate et régulière				
S1 Service continu	Moteurs éconergétiques	Boîtes de vitesse, courroies, etc., éconergétiques	Systèmes d'entraînement à vitesse variable	Alimentation de meilleur rendement	
	Dispositifs de correction du facteur de puissance	Pompes, ventilateurs, compresseurs, ... éconergétiques	Diminution des pertes électriques de transmission	Mode "faible énergie" pendant les arrêts	
S2 Service temporaire	Utilisation de composants plus économiques				
S3...S10 Service périodique intermittent	Démarrage progressif avec commande de fréquence	Réduction de l'inertie de rotation	Systèmes d'entraînement à vitesse variable	Alimentation de meilleur rendement	Freinage par récupération
			Masse et flux optimisés	Mode "faible énergie" pendant les arrêts	Liaison courant continu
					Batteries, supercondensateurs, volants d'inertie, etc...

IEC 700/10

Figure 1 – Vue d'ensemble des différents niveaux d'économie d'énergie électrique relatifs aux systèmes d'entraînement

L'énergie peut être économisée à différents niveaux des systèmes électriques d'entraînement selon le type de service (continu ou intermittent).

Dans des applications en service continu, un rendement amélioré du moteur électrique est bénéfique. Un facteur de puissance amélioré (convertisseur de fréquence, moteur synchrone) peut aider à réduire des pertes par effet joule (I^2R) dans les câbles. Les optimisations mécaniques (boîtes de vitesse, courroies, pompes, ventilateurs, etc.) peuvent conduire à des économies beaucoup plus grandes que les améliorations du moteur électrique proprement dit.

Il convient que l'application soit également considérée car dans de nombreux cas, la principale part de l'économie d'énergie peut être obtenue en contrôlant la charge de l'application du point de vue du système. Dans ce but, une commande de vitesse en fonction de la demande est souvent utile.

Une maintenance appropriée est généralement salubre. Beaucoup d'installations industrielles ont une consommation d'énergie élevée dans les circuits de commande basse tension (généralement alimentation en 24 V). Par conséquent, il convient d'utiliser des alimentations en énergie basse tension à haut rendement. Si possible, il convient également de couper le courant de l'usine pendant les longues périodes d'inactivité (week-ends, vacances).

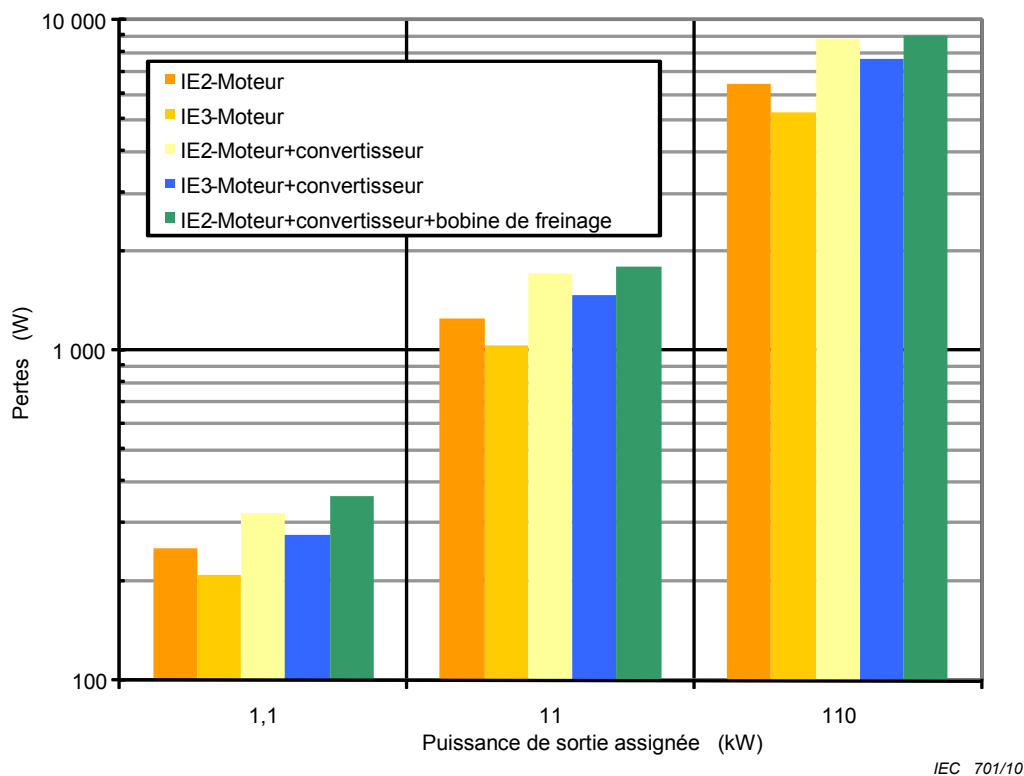


Figure 2 – Pertes représentatives des moteurs éconergétiques, des convertisseurs et des freins électromécaniques

La Figure 2 donne une vue d'ensemble des pertes représentatives des moteurs éconergétiques et des pertes typiques relatives au système d'entraînement incluant les moteurs avec des convertisseurs de fréquence source de tension, avec et sans les bobines de freinage des freins électromécaniques.

Dans les applications en service intermittent, les moteurs éconergétiques ne sont pas très efficaces et peuvent même consommer plus d'énergie, du fait de leur inertie et de leurs courants de démarrage plus importants. Pour ces applications, la consommation d'énergie pendant la phase de démarrage peut être réduite par une alimentation en énergie progressive (ramping) avec un convertisseur de fréquence. Un stockage d'énergie intermédiaire peut être bénéfique lorsque le cycle de fonctionnement inclut de fréquentes phases de freinage par récupération (par exemple, mécanismes de levage, ascenseurs, grues, etc.).

5 Rendement

5.1 Généralités

Le rendement d'un moteur est une mesure de l'efficacité avec laquelle de l'énergie électrique est convertie en énergie mécanique; il est exprimée comme le rapport de la puissance de sortie à la puissance d'entrée:

$$\text{Rendement} = \frac{\text{Puissance de sortie}}{\text{Puissance d'entrée}} = \frac{\text{Puissance de sortie}}{\text{Puissance de sortie} + \text{pertes}}$$

Les rendements des moteurs sont généralement donnés pour la charge assignée, bien que des approximations pour 3/4 de charge et pour la 1/2 charge puissent également être fournies.

Le rendement d'un moteur est principalement une fonction de la charge, de la puissance assignée et de la vitesse, comme indiqué ci-dessous.

- a) Une variation du rendement en fonction de la charge est une caractéristique inhérente aux moteurs. Le fonctionnement du moteur à des charges substantiellement différentes de la charge assignée peut entraîner un changement de rendement de celui-ci (voir la Figure 3).
- b) Généralement, le rendement à pleine charge des moteurs augmente avec leur taille physique et leur puissance de sortie assignée.
- c) Pour la même assignation de puissance, généralement, mais pas toujours, les moteurs avec des vitesses plus élevées ont un rendement plus élevé à la charge assignée que des moteurs avec des vitesses assignées inférieures. Cependant, ceci n'implique pas qu'il convient que tous les appareils soient entraînés par des moteurs à grande vitesse. Dans le cas où des mécanismes de changement de vitesse, tels que des poulies ou des engrenages, sont nécessaires pour obtenir la vitesse plus faible requise, des pertes de puissance supplémentaires pourraient réduire le rendement du système à une valeur inférieure à celle donnée par un moteur à plus faible vitesse, entraîné directement.

Une relation définie existe entre la vitesse assignée (min^{-1}) et le rendement d'un moteur à induction à cage. À savoir, plus la vitesse assignée est faible, plus le rendement est faible, à cause du glissement, qui est l'expression des pertes dans l'enroulement rotorique (le glissement d'un moteur à induction est la différence entre la vitesse synchrone et la vitesse de fonctionnement). Le glissement, exprimé en %, est la différence des vitesses divisée par la vitesse synchrone et multipliée par 100. Par conséquent, les moteurs à induction à cage de conception N, ayant un glissement à pleine charge inférieur à 5 %, ont un rendement plus élevé que les moteurs ayant un glissement supérieur, et il convient de les utiliser lorsque l'application le permet.

Pour des charges telles que des pompes, des ventilateurs et des compresseurs d'air, il peut être possible de faire une économie d'énergie significative en utilisant un moteur à plusieurs vitesses ou en employant un entraînement à vitesse variable (VSD). Cependant, il convient de noter que le rendement d'un moteur à plusieurs vitesses, à chaque vitesse de fonctionnement, est quelque peu inférieur à celui d'un moteur à une seule vitesse ayant des assignations comparables. Les moteurs à un seul enroulement (par exemple, Dahlander), à plusieurs vitesses, sont généralement plus efficaces que les moteurs à deux enroulements, à plusieurs vitesses.

Les moteurs fonctionnant sans interruption ou pendant de longues périodes présentent une occasion particulière de réduire la consommation d'énergie. Les exemples de telles applications sont les machines de traitement industriel, les équipements de ventilation, les pompes, et de nombreux types d'équipements industriels.

Tandis que beaucoup de moteurs fonctionnent de manière continue, certains moteurs ne sont utilisés que pendant de très courtes périodes et pendant un très faible nombre d'heures total par an. Donnons, comme exemples de telles applications, les moteurs de vanne, les actionneurs de porte d'ouvrage hydraulique, les dispositifs industriels d'ouverture de porte, les pompes à incendie et les pompes d'eaux usées. Dans ces exemples, une augmentation du rendement du moteur ne changerait pas sensiblement le coût énergétique global, puisqu'une très petite partie de l'énergie totale est en jeu, et cela pourrait diminuer les performances requises.

Une augmentation modérée, de quelques points en pourcentage, du rendement du moteur peut représenter une diminution assez significative du pourcentage de pertes de celui-ci. Par exemple, pour la même puissance de sortie, une augmentation du rendement de 75 à 78,9 %, de 85 à 87,6 %, ou de 90 à 91,8 % représente, dans chaque cas, une diminution de 20 % des pertes.

Comme généralement le rendement augmente avec la taille du moteur, les machines à haute tension, avec des puissances de sortie excédant 1 MW, ont usuellement un rendement supérieur à 95 %.

NOTE Alors que la puissance de sortie d'un moteur électrique augmente avec le carré de son diamètre, la dissipation thermique admise augmente presque linéairement. Par conséquent, un rendement élevé est une condition préalable incontournable pour la conception des moteurs de grandes dimensions.

5.2 Pertes des moteurs

Un moteur électrique convertit l'énergie électrique en énergie mécanique, et de ce fait, il est l'objet de pertes généralement décrites de la manière suivante:

- a) Pertes électriques (stator et rotor) (changent avec la charge) – Les courants traversant les enroulements du stator et du rotor produisent des pertes proportionnelles au carré du courant multiplié par la résistance de l'enroulement (I^2R). Les pertes dans le rotor augmentent avec le glissement.
- b) Pertes dans le fer (noyau) (par nature, indépendantes de la charge) – Ces pertes sont produites principalement dans le noyau feuilleté du stator et, à un moindre degré, dans le rotor. Le champ magnétique, essentiel pour la production du couple moteur, provoque des pertes par hystérésis et par courants de Foucault.
- c) Pertes mécaniques (frottement et ventilation) (par nature, indépendantes de la charge) – Les pertes mécaniques ont lieu dans les paliers, les ventilateurs, et les dispositifs d'étanchéité du moteur. Ces pertes sont généralement faibles pour les moteurs lents IP2X, IP4X et IP5X, mais peuvent être appréciables dans les moteurs IP6X de grandes dimensions, à grande vitesse ou totalement carénés.
- d) Pertes supplémentaires en charge (pertes parasites en charge) – Ce sont les pertes supplémentaires par fondamental et haute fréquence dans le fer; les pertes dans les conducteurs et par circulation de courant dans l'enroulement du stator; et les pertes par harmoniques dans les conducteurs du rotor en charge. On fait l'hypothèse que ces pertes sont proportionnelles au carré du couple.

Les composantes de perte d'un moteur sont listées ci-dessous (Tableau 1), avec les % représentatifs des pertes du moteur qu'elles représentent par rapport au total des pertes, et les facteurs de conception et de construction influençant leur valeur.

Tableau 1 – Distribution des pertes dans les moteurs électriques à induction à cage, triphasés, 4 pôles

	% représentatif des pertes d'un moteur 4 pôles	Facteurs affectant ces pertes
Pertes dans le stator	30 à 50	Taille des conducteurs et matériau du stator.
Pertes dans le rotor	20 à 25	Taille des conducteurs et matériau du rotor.
Pertes dans le noyau	20 à 25	Type et quantité de matériau magnétique.
Pertes supplémentaires en charge	5 à 15	Principalement, méthodes de fabrication et de conception.
Frottement et ventilation	5 à 10	Choix/conception du ventilateur et des paliers.

Généralement, en augmentant le matériau actif du moteur, c'est-à-dire, le type et le volume des conducteurs, et les matériaux magnétiques, les pertes peuvent être réduites.

5.3 Pertes supplémentaires d'un moteur lorsqu'il fonctionne à l'aide d'un convertisseur de fréquence

Les harmoniques de tension et de courant dans un moteur à induction à cage, alimenté à partir d'un convertisseur de fréquence, entraînent des pertes supplémentaires dans le fer et dans les enroulements (pertes Joule, I^2R), dans le stator et dans le rotor. La valeur totale de ces pertes supplémentaires est, par nature, indépendante de la charge. Ces pertes

supplémentaires diminuent avec l'augmentation de la fréquence de commutation du convertisseur.

Dans des circonstances défavorables, les pertes supplémentaires internes au moteur, provoquées par le convertisseur de fréquence, peuvent augmenter les pertes totales du moteur jusqu'à plus de 15 % à 20 %, lorsqu'il fonctionne sur une source d'alimentation sinusoïdale.

Pour plus de détails, voir la CEI 60034-17 et la CEI 60034-25.

5.4 Moteurs pour des classes de rendement plus élevé

Il est probable que les technologies de pointe permettront aux fabricants de concevoir des moteurs de rendements supérieurs à ceux de la classe IE3, avec des dimensions mécaniques (brides, hauteurs d'arbre etc.) compatibles avec les moteurs existants de classes de rendement inférieur (par exemple, EN 50347, NEMA MG1 et d'autres normes nationales). Ces moteurs exigent généralement de l'électronique de puissance pour fonctionner (convertisseurs de fréquence).

Les pertes dans le rotor sont presque éliminées lorsqu'on utilise des moteurs synchrones sans enroulement de champ.

A l'Annexe A, cette spécification technique propose une classe de rendement "Super-premium" IE4, spécifiquement destinée à de tels moteurs (bien que la classe de rendement IE4 en tant que telle ne soit pas limitée à des moteurs spécifiques).

Des moteurs synchrones à aimants permanents (PMSM) et des moteurs synchrones à réluctance (RSM) sont déjà développés et, dans une certaine mesure, commercialisés. Les PMSM ont généralement un certain couple de réluctance inhérent et les RSM peuvent être renforcés par des aimants permanents (PM), donc les configurations hybrides sont possibles.

Selon la quantité de matériau magnétique utilisée, un PMSM peut avoir un facteur de puissance plus élevé qu'un moteur à induction, améliorant de ce fait le rendement dans le réseau de distribution et dans le convertisseur de fréquence. Cependant, ces moteurs exigent un convertisseur de fréquence et un capteur de la position du rotor (codeur) pour obtenir un fonctionnement correct (à moins qu'un algorithme de commande sans codeur ne soit utilisé dans le convertisseur).

Une commande de moteur plus simple, avec tension commutée à faible fréquence de commutation (block-commutated) est également utilisée communément dans les moteurs de petite taille et/ou à grande vitesse (moteurs à courant continu sans balai ou à commutation électronique (EC)). L'inconvénient principal est que, du fait des tensions et courants harmoniques parasites, il apparaît des pertes supplémentaires. L'amélioration du rendement des moteurs asynchrones est moindre, comparée à l'amélioration des moteurs synchrones à aimants permanents ou à réluctance commandés par PWM (modulation d'impulsions en durée).

Une autre conception des moteurs synchrones est caractérisée par les machines comportant à la fois des aimants permanents et une cage. Ils peuvent donc être utilisés pour démarrer directement sur le réseau (moteurs synchrones à démarrage direct, à aimants permanents, "LSPM"). Ces moteurs n'ont pas nécessairement besoin d'un convertisseur de fréquence pour leur fonctionnement. Cependant, leurs performances de démarrage est assez médiocre, avec ondulation de couple et bruit, et des restrictions considérables au couple en charge et à l'inertie de charge admissibles. Ils nécessitent d'être parfaitement adaptés à l'application et ne peuvent pas être utilisés comme machines à usage général.

NOTE Il est envisagé d'étendre le domaine d'application de la CEI 60034-30 et de l'amender avec la présente Annexe A (en tant qu'annexe normative), lorsqu'une expérience plus importante avec les applications courantes des moteurs synchrones deviendra disponible.

5.5 Variations des pertes d'un moteur

Tous les produits manufacturés sont sujets à des tolérances liées aux matériaux et aux méthodes de fabrication. Deux produits n'auront pas exactement les mêmes performances, bien qu'ils soient de la même conception et fabriqués en même temps sur la même chaîne de montage.

Ceci est également vrai pour les moteurs électriques. Les tolérances de production des matériaux, tels que l'acier utilisé pour les tôles feuilletées des noyaux de stator et de rotor, conduiront à des variations des propriétés magnétiques et affecteront finalement les pertes fer et donc le rendement du moteur. En utilisant, à titre d'exemple, un moteur de 7,5 kW soumis aux essais, une augmentation de 10 % de la perte fer (de 300 W à 330 W), ce qui est dans la tolérance proposée par les fournisseurs d'acier, il en résulterait une augmentation des pertes totales du moteur de 946 W à 976 W et ramènerait ainsi le rendement de 88,8 % (IE2) à 88,5 % (IE1).

Des variations se produisent également du fait des limitations dans le processus de fabrication. Il existe une limite économique aux tolérances dimensionnelles pratiques sur des éléments du moteur. Les combinaisons des éléments à accoupler contribuent aux variations dimensionnelles, telle que la dimension de l'entrefer, entraînant des variations des pertes supplémentaires en charge et par conséquent du rendement du moteur.

En outre, des incertitudes peuvent être générées par les processus de fabrication et par les méthodes d'essai.

Ainsi, lors de la prévision du rendement d'un moteur donné, on peut parler du rendement assigné, tel que défini par le fabricant (qu'il convient de considérer comme étant l'équivalent d'un rendement moyen d'une grande quantité de moteurs). Il convient que le rendement assigné soit également supérieur ou égal au rendement nominal exigé de la classe de rendement assigné (conformément à la CEI 60034-30).

Le rendement réel à la charge assignée de tout moteur individuel, lorsqu'il fonctionne à la tension assignée et à la fréquence assignée, peut être inférieur au rendement *assigné*, mais pas inférieur au rendement assigné moins sa tolérance sur le rendement, conformément à la CEI 60034-1. Ceci est le niveau de rendement atteint lorsque les matières premières et les processus de fabrication sont à la limite la plus défavorable de leurs tolérances spécifiées.

Il convient d'utiliser le rendement assigné lors de l'estimation de la puissance nécessaire pour alimenter un certain nombre de moteurs. Le rendement minimal (assigné moins la tolérance) permet de garantir à l'utilisateur du moteur le niveau spécifié de performance.

5.6 Rendement à charge partielle

Les moteurs triphasés à induction à cage présentent des rendements assez constants sur une large plage de charges partielles, comme cela est indiqué à la Figure 3.

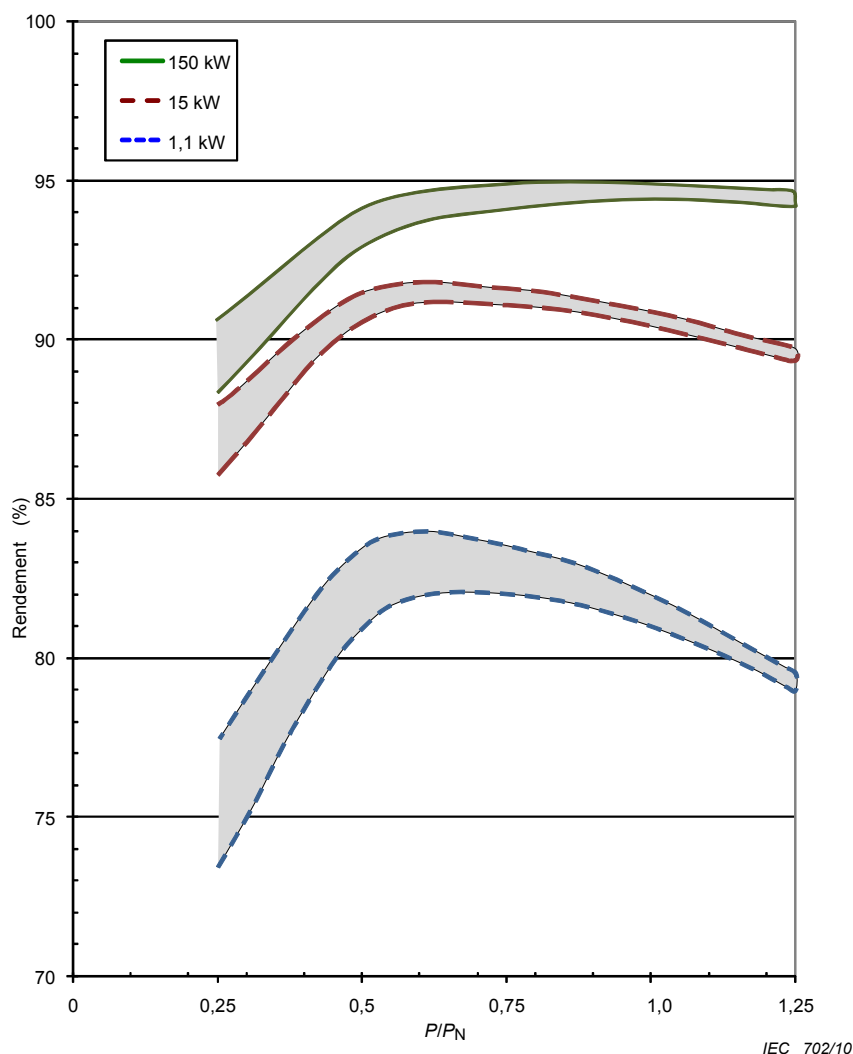


Figure 3 – Rendement représentatif en fonction des bandes de courbes de charge pour les moteurs triphasés à induction à cage dans différentes gammes de puissances de sortie (approximativement 1,1 kW, 15 kW et 150 kW)

Les bandes de rendement données dans cette figure sont représentatives des moteurs 2 et 4 pôles et similaires. Les moteurs ayant un plus grand nombre de pôles auront une caractéristique différente.

Lorsque le rendement est donné pour la charge assignée et à 3/4 de charge, la formule suivante peut être utilisée pour calculer le rendement à n'importe quelle autre charge partielle, avec une bonne approximation:

$$v_L = \frac{\left(\frac{100}{\eta_{100}} - 1 \right) - 0,75 \cdot \left(\frac{100}{\eta_{75}} - 1 \right)}{0,4375}$$

$$v_0 = \left(\frac{100}{\eta_{100}} - 1 \right) - v_L$$

$$\eta_p = \frac{100}{1 + \frac{v_0}{p} + v_L \cdot p}$$

où:

η_{100} est le rendement à la charge assignée, en %;

η_{75} est le rendement à $\frac{3}{4}$ de charge, en %;

v_L, v_0 sont les résultats intermédiaires;

p est la puissance désirée (par rapport à la charge assignée, c'est-à-dire, de 0...1... surcharge);

η_p est le rendement résultant, en %.

NOTE L'application de cet algorithme n'est pas recommandée pour les charges inférieures à 50 % ou supérieures à 125 % par rapport à la charge assignée.

5.7 Méthodes d'essai du rendement

Il existe un certain nombre de méthodes d'essai pour déterminer le rendement d'un moteur. Des méthodes normalisées pour soumettre des machines à induction aux essais sont définies au plan international par la CEI 60034-2-1; celle-ci identifie plusieurs méthodes pour déterminer le rendement d'un moteur, chacune d'elle ayant certains avantages quant à la précision, au coût, et à la facilité des essais, tout en dépendant principalement des caractéristiques du moteur. Certaines de ces méthodes de la CEI 60034-2-1 sont harmonisées avec des normes nationales, telles que la CSA C390 et la Partie B de l'IEEE 112.

La méthode par pertes résiduelles de la CEI 60034-2-1 est une procédure de calcul bien définie destinée à isoler les divers types de pertes des données brutes et à lisser les pertes supplémentaires en charge (parasites) par analyse de régression linéaire. Celle-ci peut diminuer l'effet des erreurs introduites du fait des mesures sur la gamme des charges, de 25 % à approximativement 150 % de la charge assignée. Elle fixe également la température ambiante des essais à 25 °C pour réduire la variation due aux différents environnements d'essai.

La pratique courante pour obtenir les données brutes relatives aux moteurs de 0,75 kW à 370 kW est de les soumettre aux essais avec une machine de charge et un couplemètre, et de mesurer précisément la puissance d'entrée et la puissance de sortie, en plusieurs points de charge, afin de déterminer les composantes de perte et donc le rendement.

Même en utilisant une méthode d'essai du rendement cohérente et précise, des variations des résultats pour le même moteur se produisent, principalement en raison des caractéristiques des équipements et de l'instrumentation d'essai, et dans le cas des essais non automatisés, en raison des facteurs liés aux opérateurs.

5.8 Facteur de puissance (voir la Figure 4)

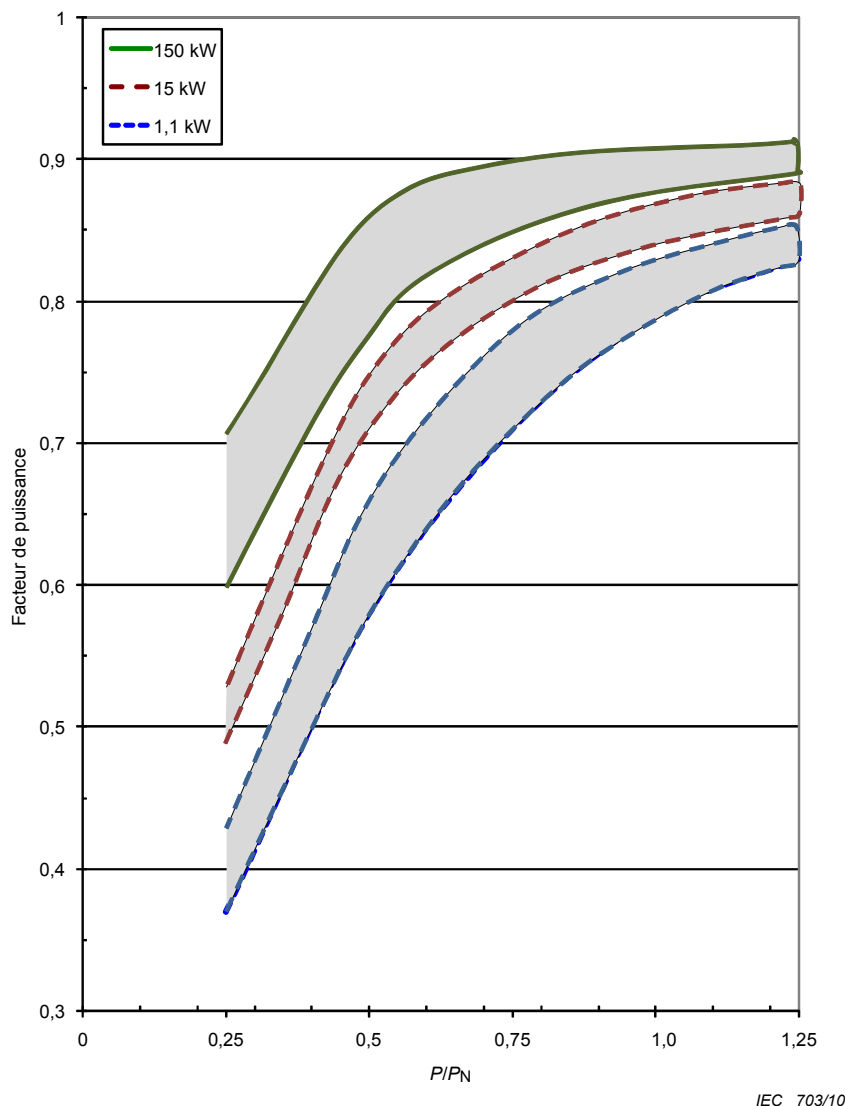


Figure 4 – Facteur de puissance représentatif en fonction des bandes de courbes de charge pour les moteurs triphasés à induction à cage dans différentes gammes de puissances de sortie (approximativement 1,1 kW, 15 kW et 150 kW)

Les bandes de facteur de puissance données dans cette figure sont représentatives des moteurs 2 et 4 pôles et similaires. Les moteurs ayant un plus grand nombre de pôles auront une caractéristique différente.

La charge totale du moteur dans une installation est généralement un élément majeur déterminant le facteur de puissance du système. Un faible facteur de puissance du système conduit à une augmentation des pertes dans le système de distribution. Les moteurs à induction entraînent, de manière inhérente, un facteur de puissance du système de type inductif.

Le facteur de puissance d'un moteur à induction diminue avec la charge.

Le facteur de puissance à une charge assignée augmente avec l'assignation de puissance du moteur. Un certain nombre de moteurs à induction, fonctionnant tous à faible charge, peuvent faire en sorte que le système électrique ait un faible facteur de puissance. Le facteur de

puissance des moteurs à induction à la charge assignée est plus petit pour les moteurs à faible vitesse que pour les moteurs à grande vitesse.

Une légère augmentation de la tension au-dessus de la tension assignée (moins de 10 %) diminuera le facteur de puissance, et réciproquement une légère diminution de la tension au-dessous de la tension assignée (moins de 10 %) améliorera le facteur de puissance d'un moteur à induction. Cependant, d'autres caractéristiques de performance peuvent être compromises par un tel changement de tension, et un fonctionnement aussi proche que possible des assignations de tension et de puissance inscrites sur la plaque signalétique du moteur est recommandé.

Une analyse du système électrique indiquera si une amélioration du facteur de puissance est nécessaire et s'il convient d'utiliser des condensateurs, des moteurs synchrones, ou de mettre en place d'autres mesures correctives.

Lorsque des condensateurs de correction du facteur de puissance sont utilisés pour améliorer le facteur de puissance du système électrique, il convient de les choisir soigneusement et de les mettre en œuvre de manière à éviter des conditions de fonctionnement dangereuses. Il est recommandé de consulter le concepteur du système pour définir la valeur appropriée de la capacité de correction.

5.9 Adaptation des moteurs et des convertisseurs à fréquence variable

L'adjonction d'un convertisseur à fréquence variable apporte un potentiel d'améliorations considérable au rendement énergétique dans de nombreux systèmes d'entraînement électriques de puissance. Les coûts supplémentaires du convertisseur (en général plus importants que ceux du moteur du plus haut rendement) et certaines pertes supplémentaires (dépendant de la taille et de la conception, en général 2 % à 5 % au couple nominal et à la vitesse nominale, et 10 % à 30 % à 25 % du couple et de la vitesse) exigent une analyse attentive de l'application.

Le premier groupe d'applications est celui des pompes, des ventilateurs et appareils similaires avec des charges variables, dont les couples augmentent sensiblement comme le carré de la vitesse de rotation du moteur. La puissance électrique d'entrée du moteur augmentera avec la troisième puissance de la vitesse, lorsque le débit volumique dans des conduits couverts et des buses n'est contrôlé qu'avec des registres et des dispositifs d'étranglement. Une commande à vitesse variable (VSD) peut ajuster la puissance électrique d'entrée de manière progressive et continue au débit volumique requis et les pertes sont réduites en conséquence. La commande traditionnelle de charge avec des moteurs à plusieurs vitesses, ou des arrangements de plusieurs moteurs fonctionnant en parallèle, doit être considérée, si elle peut remplir son office avec des coûts inférieurs et moins de pertes. Le coût/bénéfice d'une VSD est élevé, parce qu'une amélioration plus importante du rendement énergétique est possible.

Le deuxième groupe d'applications est celui des convoyeurs, des escalators, des appareils de levage et similaires dont les couples sont plus ou moins indépendants de la vitesse. Une commande à vitesse variable (VSD) peut continuellement ajuster la vitesse, pratiquement de l'arrêt à la pleine vitesse, sans paliers, et peut ainsi minimiser la puissance nécessaire. Les avantages de coût et de rendement sont moindres, comparés à ceux du premier groupe d'applications, parce que la variation de la puissance d'entrée est linéaire avec la vitesse.

Le troisième groupe d'applications inclut celles qui ont les variations minimales de charge et de vitesse, mais peut tirer bénéfice d'une VSD de manière différente, comme le démarrage et l'arrêt progressifs, ou une exigence de couple de démarrage élevé. L'avantage principal ne réside pas dans les améliorations du rendement énergétique, mais dans une usure moindre des machines considérées. Il existe d'autres solutions techniques de démarrage progressif disponibles et moins onéreuses. Cependant, comparées au démarrage progressif avec une commande à vitesse variable, ces méthodes ne sont pas économes en énergie.

Dans certaines applications, les moteurs sont surdimensionnés et fonctionnent de manière continue à charge partielle (par exemple, 50 % ou moins). Bien qu'un convertisseur à fréquence variable puisse améliorer le rendement énergétique en réduisant la tension d'entrée du moteur, un meilleur dimensionnement de celui-ci pour la charge adéquate serait plus rentable et économiserait encore plus d'énergie.

Sauf si des filtres sinusoïdaux additionnels sont utilisés, les moteurs fonctionnant à l'aide d'une commande à vitesse variable seront sujets à des pointes de tension sensiblement plus élevées que ceux fonctionnant directement sur le réseau. Aujourd'hui, la plupart des moteurs électriques industriels modernes fonctionnant sous des tensions d'alimentation allant jusqu'à 500 V ont un système d'isolation pouvant accepter ces tensions sans problème. En ce qui concerne les tensions d'alimentation plus élevées, il convient de considérer les moteurs conformes à la CEI 60034-25.

Lors de la rénovation d'anciens moteurs utilisés dans des applications existantes et équipés de convertisseurs à fréquence variable, il convient de prendre contact avec le fabricant. En outre, il est important de déterminer la vitesse maximale de sécurité en fonctionnement du moteur, dans le cas où la fréquence du réseau (50 Hz ou 60 Hz) doit être notablement dépassée avec une VSD. Ces informations sont normalement disponibles dans les catalogues ou dans la documentation des produits (manuels) (voir également les CEI 60034-1 et CEI 60034-17).

La commande à vitesse variable doit être choisie et configurée en se basant sur une connaissance claire des conditions de fonctionnement typiques:

- couples et vitesses requis par la machine entraînée;
- tout taux de réduction de puissance du moteur du fait de la méthode de refroidissement par air (auto ventilation ou ventilation forcée).

Il est important de faire correspondre étroitement les performances d'une commande à vitesse variable avec le profil de charge requis et les propriétés électriques du moteur, afin d'obtenir le bénéfice maximal.

5.10 Moteurs assignés pour 50 Hz et 60 Hz

Comme l'utilisation et les dimensions d'un moteur sont en fait liées au couple plutôt qu'à la puissance, la puissance de sortie théorique augmente linéairement avec la vitesse, c'est-à-dire de 20 % entre 50 Hz et 60 Hz.

Les pertes par effet Joule dans les bobinages sont dominantes, particulièrement dans les moteurs à induction de petites et moyennes dimensions. Fondamentalement, ces pertes restent constantes à 50 Hz et 60 Hz, tant que le couple est maintenu constant. Bien que les pertes de ventilation, de frottements et dans le fer augmentent avec la fréquence, celles-ci jouent généralement un rôle mineur dans les moteurs à 4 pôles ou plus. Ainsi, à 60 Hz, les pertes totales augmentent en fait moins que les 20 % d'augmentation de la puissance de sortie par rapport à 50 Hz. Par conséquent en termes relatifs (puissance d'entrée sur puissance de sortie) le rendement augmente.

Le Tableau 2 récapitule le texte précédent sous forme tabulaire.

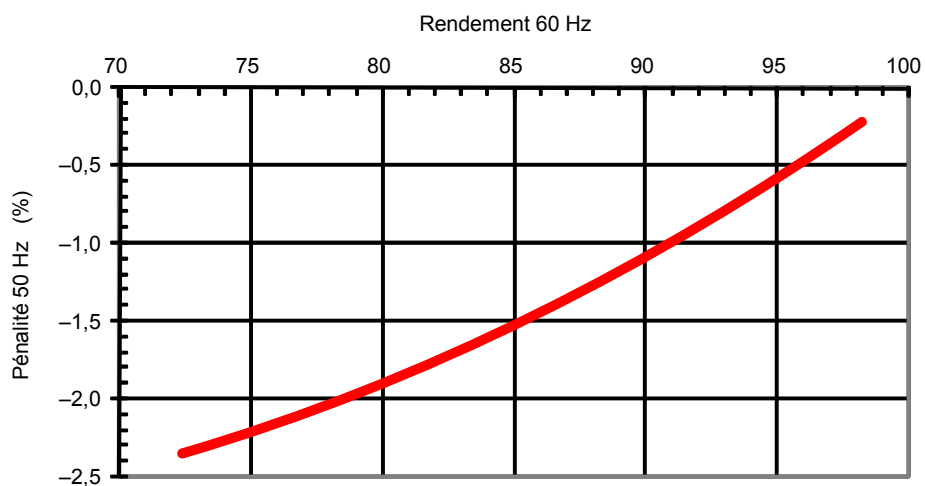
Tableau 2 – Calculs, donnés à titre d'exemple, du rendement d'un moteur fonctionnant à 50 Hz et à 60 Hz avec le même couple, en utilisant comme base une assignation de moteur à 50 Hz

	50 Hz	60 Hz
Couple	100 %	100 %
Vitesse	100 %	120 %
Puissance de sortie	100 %	120 %
Pertes (en % de la puissance de sortie)		
I^2R (pertes Joule)	20 %	20 %
Frottement et ventilation	4 %	$4 \times (1,2)^{1,5} = 5,25 \%$
Fer	4 %	$4 \times (1,2)^{1,5} = 5,25 \%$
Pertes totales	28 %	30,5 %
Puissance d'entrée	$100 + 28 = 128 \%$	$120 + 30,5 = 150,5 \%$
Rendement	$100/128 = 78,1 \%$	$120/150,5 = 79,7 \%$

Dans la pratique, les désignations de puissance de sortie à 60 Hz et à 50 Hz se conforment aux niveaux normalisés de puissance selon la CEI 60072. Par conséquent, une augmentation de 20 % de l'assignation de la puissance du moteur n'est pas toujours possible. Toutefois, l'avantage général des moteurs à 60 Hz reste applicable si la conception de ceux-ci est optimisée pour la fréquence d'alimentation plutôt que juste réassignée.

La différence de rendement du moteur entre 50 Hz et 60 Hz varie également avec le nombre de pôles et les dimensions physiques de celui-ci. En général, le rendement à 60 Hz des moteurs triphasés à induction à cage dans l'étendue de puissance de 0,75 kW à 370 kW est supérieur d'environ de 2,5 à 0,5 points respectivement, par rapport au rendement à 50 Hz. Seuls les gros moteurs 2 pôles peuvent avoir un rendement à 60 Hz légèrement inférieur, du fait de leur plus forte part de pertes de ventilation et de frottement.

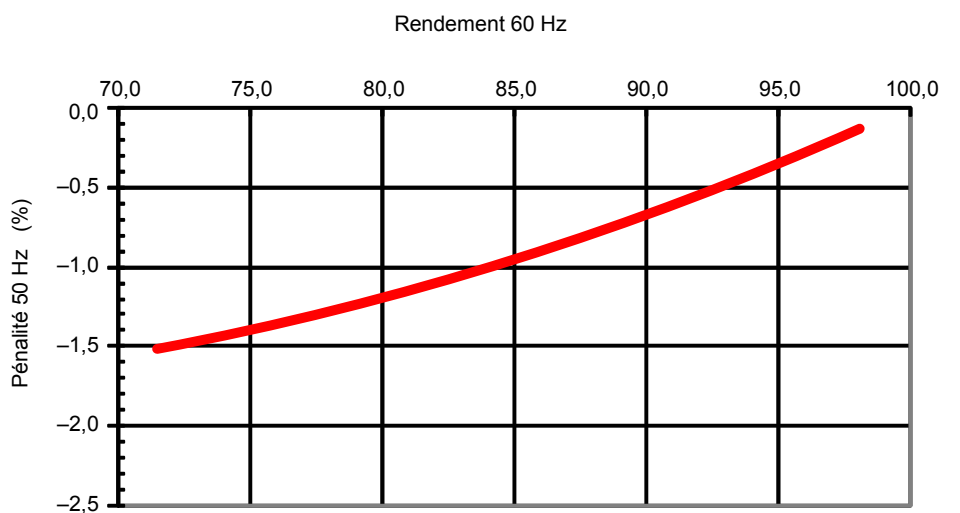
Lorsqu'un moteur est assigné pour un fonctionnement à 50 Hz ou à 60 Hz avec sensiblement le même flux magnétique et sensiblement le même couple (c'est-à-dire 20 % plus de puissance de sortie à 60 Hz, par exemple 400 V / 50 Hz / 3,0 kW et 460 V / 60 Hz / 3,7 kW), le rendement à 60 Hz est généralement meilleur qu'à 50 Hz (voir la Figure 5).



IEC 704/10

Figure 5 – Réduction représentative du rendement énergétique, en points de %, relative aux moteurs basse tension 4 pôles, entre 50 Hz et 60 Hz, au même couple (puissance à 60 Hz augmentée de 20 %)

En variante, lorsqu'un moteur est assigné pour un fonctionnement à 50 Hz, ou à 60 Hz avec sensiblement le même flux magnétique et la même puissance de sortie (c'est-à-dire 20 % de réduction de couple à 60 Hz, par exemple 400 V / 50 Hz / 5,5 kW et 460 V / 60 Hz / 5,5 kW), le rendement à 60 Hz est toujours supérieur du fait que l'utilisation du moteur est réduite (voir la Figure 6).



IEC 705/10

Figure 6 – Réduction représentative du rendement énergétique, en points de %, relative aux moteurs basse tension 4 pôles, entre 50 Hz et 60 Hz, à la même puissance de sortie (couple à 60 Hz réduit de 20 %)

Pour ces raisons, les courbes limites de la CEI 60034-30, pour les différentes classes de rendement (IE1, IE2, IE3), sont généralement plus élevées pour les moteurs à 60 Hz que pour des moteurs à 50 Hz.

5.11 Moteurs assignés pour différentes tensions ou une gamme de tensions

Une variation du rendement en fonction de la tension est une caractéristique inhérente aux moteurs. Le fonctionnement du moteur à des tensions substantiellement différentes de la tension assignée aura comme conséquence un changement de rendement de celui-ci et un échauffement.

Généralement le rendement des petits moteurs est davantage affecté par l'écart de tension que celui des plus gros moteurs.

5.12 Moteurs assignés pour un fonctionnement à des fréquences différentes de 50/60 Hz

Les moteurs assignés pour un fonctionnement aux fréquences autres que la fréquence du réseau (50 Hz ou 60 Hz) ne sont pas classés selon les classes de rendement de la CEI 60034-30.

La classe de rendement IE4, telle que définie à l'Annexe A du présent document, est la seule classe applicable à ces moteurs.

5.13 Rendement des convertisseurs à fréquence variable

Les convertisseurs de fréquence ont généralement un niveau de rendement énergétique élevé. À l'instar des moteurs, leur rendement tombe à la charge partielle (voir la Figure 7).

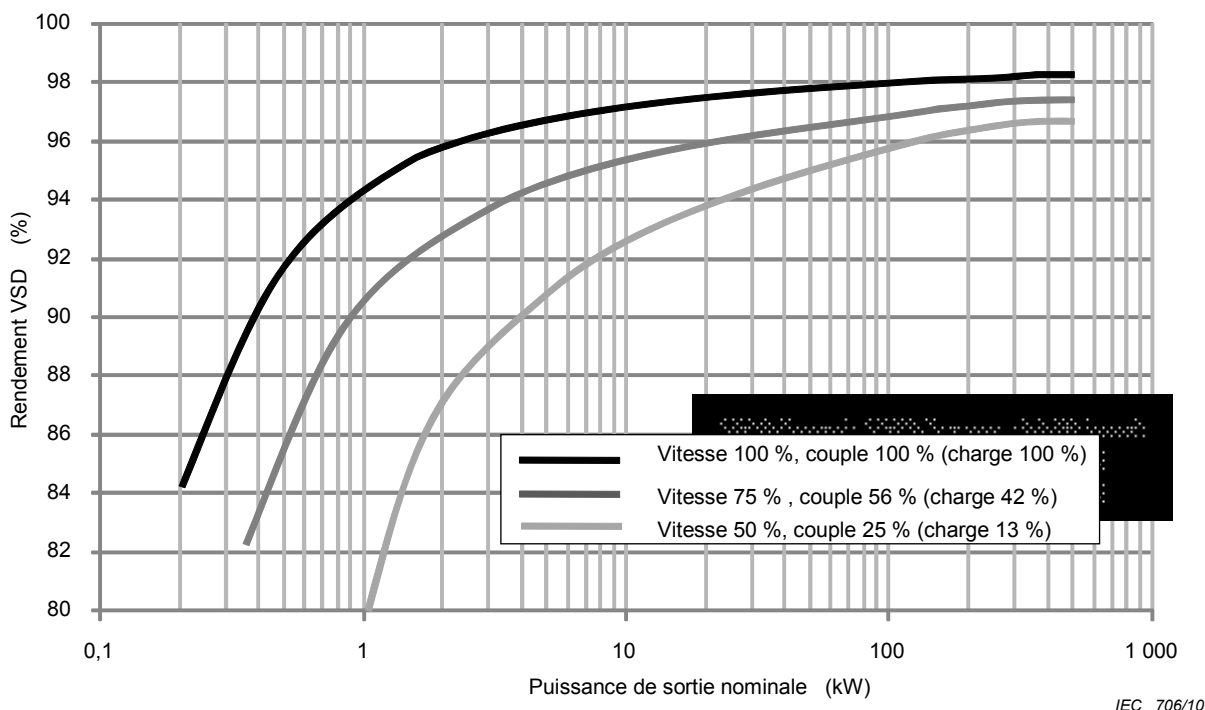


Figure 7 – Rendement représentatif des convertisseurs de type triphasé indirect, source de tension, avec un dispositif frontal passif, pour des pourcentages de charge représentatifs des pompes, des ventilateurs et des compresseurs

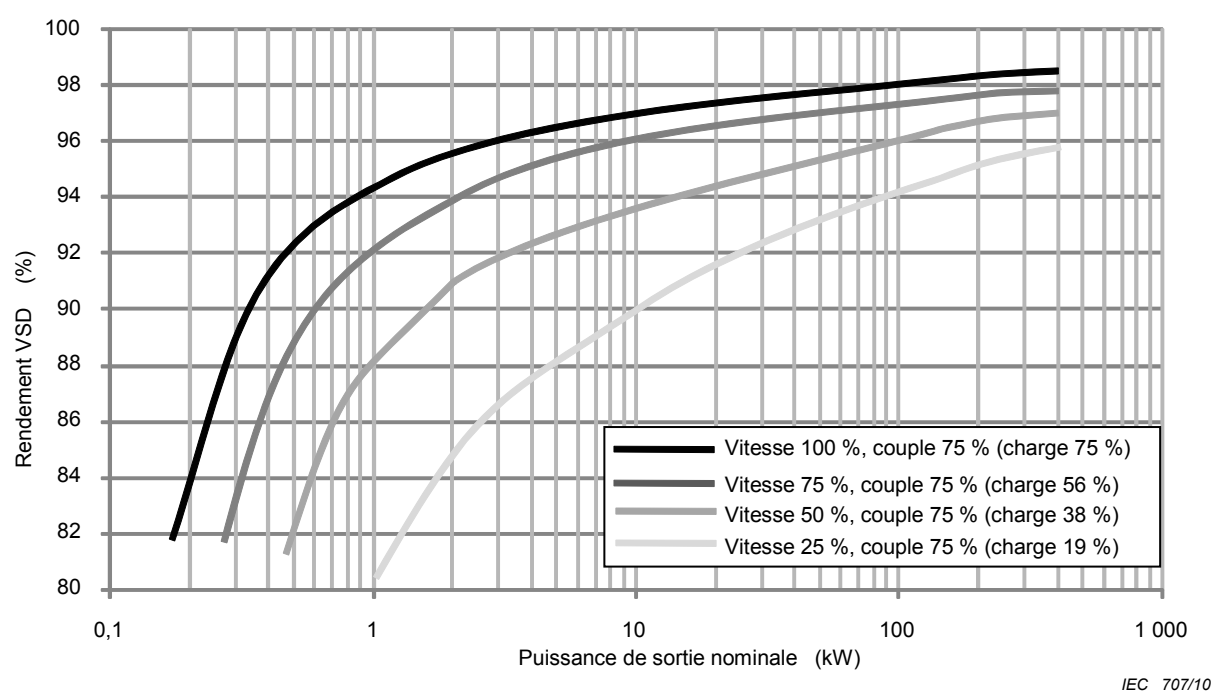


Figure 8 – Rendement représentatif des convertisseurs de type triphasé indirect, source de tension, avec un dispositif frontal passif, pour des pourcentages de charge représentatifs d'un couple constant

Le Tableau 3 donne les composantes de perte d'un convertisseur de fréquence pour le type industriel le plus courant (convertisseurs de fréquence indirects basse tension du type source de tension, avec redresseurs triphasés non contrôlés à diodes comme convertisseur côté ligne) dans la gamme des puissances de sortie de 1 kW à 100 kW:

Tableau 3 – Distribution de perte pour des convertisseurs basse tension

	% de pertes typiques de convertisseurs à dispositif frontal passif	Facteurs affectant ces pertes
Pertes de commutation (étage de sortie)	30 à 50	Courant moteur et fréquence de commutation.
Pertes des redresseurs côté ligne	20 à 25	Courant de ligne (presque proportionnel à la puissance du moteur).
Pertes directes (étage de sortie)	15 à 20	Courant moteur.
Pertes internes du circuit de commande (microcontrôleur, alimentation interne, afficheur, clavier, bus de communications, entrées /sorties numériques et analogiques ...)	5 à 20	Sensiblement constantes.
Pertes de commutation (convertisseur côté ligne/ dispositif frontal actif uniquement)	-	Courant de ligne et fréquence de commutation (presque proportionnel à la puissance du moteur).
Pertes composées (convertisseur côté ligne/ dispositif frontal actif uniquement)	-	Courant de ligne (presque proportionnel à la puissance du moteur).

Une diminution du rendement du convertisseur peut conduire à une tension de sortie réduite à destination du moteur. Celle-ci peut empêcher le moteur d'atteindre sa vitesse maximale et/ou nécessiter un fonctionnement avec un champ plus faible, ce qui diminuera le rendement du moteur.

5.14 Facteur de puissance d'un convertisseur de fréquence

Le facteur de puissance d'un convertisseur à liaison à courant continu dépend uniquement de la conception du redresseur d'entrée du convertisseur. La conception du moteur ou sa charge n'influence pas le facteur de puissance du convertisseur.

En raison du taux d'harmoniques du courant d'entrée des convertisseurs de fréquence, il faut analyser le facteur de puissance total, λ , :

$$\text{Facteur de puissance } \lambda = \frac{|Puissance \text{ active } P|}{Puissance \text{ apparente } S}$$

Le facteur de puissance peut être ajusté pratiquement à l'unité en utilisant un convertisseur comportant un convertisseur actif côté ligne (dispositif frontal actif).

On peut donner les exemples représentatifs suivants les types de convertisseurs les plus courants pour moteurs basse tension (convertisseur indirect du type source de tension avec redresseur monophasé ou triphasé non contrôlé à diodes comme convertisseur côté ligne):

- convertisseur monophasé: $\lambda \approx 0,58$ (pour $P_N \approx 0,5$ kW)
- convertisseur triphasé: $\lambda \approx 0,64$ (pour $P_N \approx 2$ kW)
- convertisseur triphasé avec inductance de lissage en ligne: $\lambda \approx 0,92$ (pour $P_N \approx 2$ kW)
- convertisseur triphasé avec liaison courant continu "pauvre" (petit condensateur continu): $\lambda \approx 0,94$ (pour $P_N \approx 1...10$ kW)

Du fait que les convertisseurs de fréquence améliorent le facteur de puissance du côté ligne uniquement, il est plus éconergétique d'installer le convertisseur aussi près que possible du moteur (installation décentralisée).

6 Environnement

6.1 Performance de démarrage

Les moteurs éconergétiques à induction à cage sont généralement construits avec davantage de matériau actif, c.-à-d. une longueur de noyau plus grande et/ou un plus grand diamètre de noyau, afin d'obtenir un meilleur rendement. Pour ces raisons, la performance de démarrage des moteurs éconergétiques diffère légèrement des moteurs de rendement inférieur.

En moyenne, le courant à rotor bloqué augmente de 10 % à 15 % pour des moteurs d'une classe de rendement énergétique par rapport aux moteurs de la classe juste supérieure, à la même puissance de sortie. Cette différence dépend individuellement du principe de construction du moteur et il convient de la vérifier avec le fabricant, lors du remplacement des moteurs dans une installation existante. Les moteurs comportant un rotor cuivre ont généralement un courant à rotor bloqué plus élevé comparé aux moteurs à rotor aluminium. On doit s'assurer que le dispositif de protection de la commande est correctement dimensionné et réglé. Voir également la CEI 60034-12.

Généralement, le couple minimal moyen pendant le démarrage des moteurs éconergétiques est également accru d'environ de 10 % à 20 % par classe de rendement, pour une même assignation de puissance de sortie (voir la CEI 60034-12).

Les moteurs comportant un rotor cuivre ont généralement un plus faible couple minimal pendant le démarrage comparé aux moteurs à rotor aluminium.

Le fabricant doit s'assurer, par des mesures de conception appropriées, de répondre aux caractéristiques de performance de démarrage, telles que définies par la CEI 60034-12 (typiquement, conception N).

6.2 Vitesse de fonctionnement et glissement

Généralement, les moteurs avec un rendement élevé ont une vitesse de fonctionnement élevée, c'est-à-dire un glissement réduit comparé à celui des moteurs de rendement inférieur. En moyenne, le glissement est réduit de quelques 20 % à 30 % en passant d'une classe de rendement à la classe juste supérieure, pour des moteurs de même puissance de sortie assignée.

Les moteurs comportant un rotor cuivre ont généralement un plus faible glissement aux vitesses de fonctionnement élevées par rapport aux moteurs à rotor aluminium.

6.3 Effets de la qualité de l'alimentation et de la variation de tension et de fréquence

Le fonctionnement en dehors des conditions de tension et de fréquence assignées peut diminuer le rendement et le facteur de puissance, et peut compromettre d'autres caractéristiques de performance. La même situation est vraie lorsque l'on fait fonctionner le moteur sous une tension non sinusoïdale. L'effet d'une variation de tension d'alimentation, de la forme d'onde, ou de la fréquence sur les caractéristiques du facteur de puissance et du rendement du moteur dépend de la conception individuelle du moteur (voir la Figure 9).

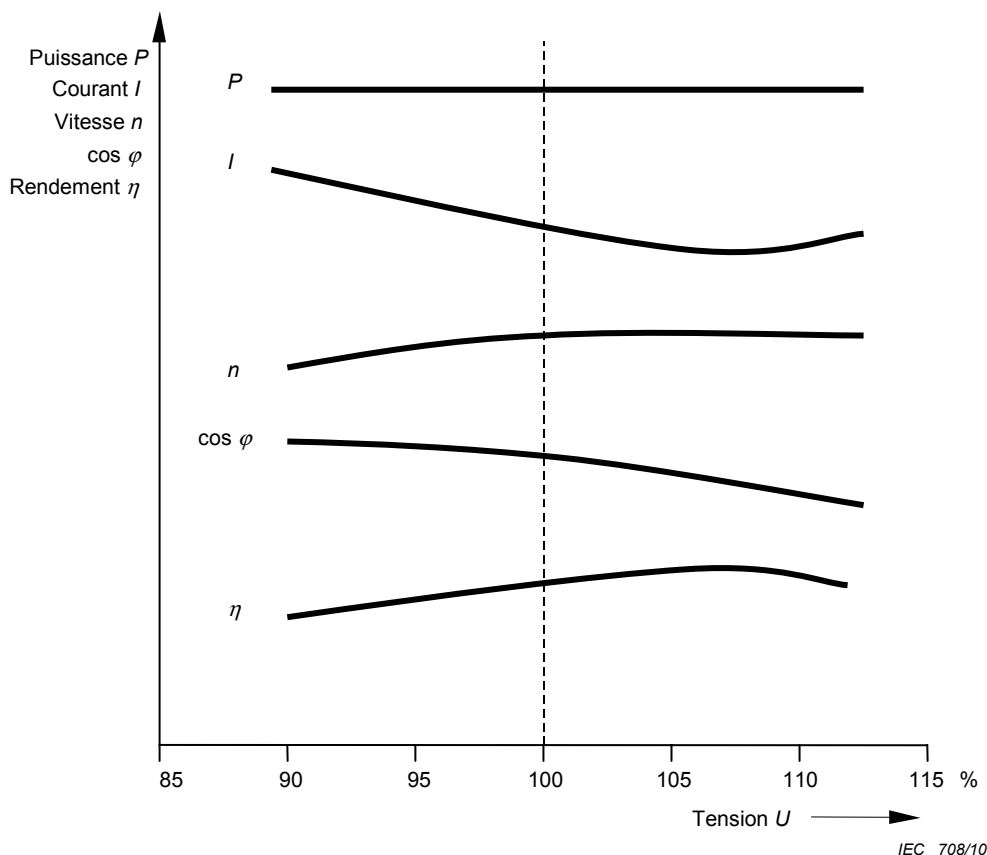


Figure 9 – Variations représentatives du courant, de la vitesse, du facteur de puissance et du rendement, en fonction de la tension, pour une puissance de sortie constante

La CEI 60034-1 donne les variations de tension et de fréquence admissibles pendant le fonctionnement.

6.4 Effets du déséquilibre des tensions

Des tensions équilibrées du réseau triphasé d'alimentation du moteur sont essentielles au bon fonctionnement du système. Par exemple, un déséquilibre des tensions de 3,5 % peut augmenter les pertes du moteur d'approximativement 20 %. Pour cette raison, il convient que les charges monophasées branchées sur un réseau d'alimentation triphasé soient scrupuleusement allouées de façon que le déséquilibre des tensions aux bornes du moteur soit maintenu aussi faible que possible.

Pour plus de détails, voir la CEI 60034-26.

6.5 Effets de la température ambiante

Le rendement assigné du moteur est toujours donné pour une température ambiante de référence normalisée de 25 °C (voir la CEI 60034-2-1). Le fonctionnement sous des températures ambiantes inférieures augmentera le rendement, alors que le fonctionnement sous les températures ambiantes supérieures le diminuera.

7 Applications

7.1 Généralités

La puissance mécanique de sortie des moteurs standards, classée par taille de carcasse, n'est pas normalisée de manière internationale. Cependant, des normes nationales existent bien (par exemple, EN 50347 et NEMA MG1), et elles sont largement reconnues. Il est donc avantageux, pour la rénovation des moteurs électriques standards dans les applications existantes, d'avoir des moteurs éconergétiques avec les mêmes tailles de carcasse et les mêmes puissances de sortie, qui n'exigeront pas d'importants réaménagements des équipements entraînés.

Lorsque le dispositif entraîné par un moteur électrique produit un niveau relativement constant et continu de travail utile, le souci principal pour le choix du moteur est son rendement à la charge assignée. Cependant, nombre d'applications sont cycliques par nature. Dans ces cas, des techniques particulières à l'application peuvent être utilisées pour obtenir des économies d'énergie substantielles.

D'autres applications demandent une absorption d'énergie intermittente ou continue. Il existe encore des techniques qui récupéreront un pourcentage significatif d'énergie, qui sinon serait gaspillée.

Quelques uns de ces cas sont donnés ci-dessous, pour illustrer la technologie mise à la disposition de l'utilisateur. Il convient de consulter le fabricant du moteur pour déterminer la solution la plus efficace.

7.2 Economies d'énergie par commande de vitesse (commandes à vitesse variable, VSD)

Dans de nombreuses applications, d'importantes économies d'énergie peuvent être générées en modifiant la vitesse du moteur, selon la demande de charge de l'application. Ceci est généralement réalisé en utilisant une commande à vitesse variable (VSD).

Les pertes supplémentaires dans le convertisseur de fréquence peuvent être facilement compensées par l'amélioration globale du rendement de l'application.

De nombreuses applications de pompes et de ventilateurs comportent actuellement une commande de débit ou de pression réalisée au moyen de dispositifs d'étranglement ou de contournement. Les soupapes d'étranglement et de dérivation sont en fait des régulateurs de puissance série et parallèle accomplissant leur fonction en dissipant la différence entre l'énergie fournie par la source et l'énergie absorbée désirée.

Ces pertes peuvent être réduites de manière significative en contrôlant le débit ou la pression en ajustant la vitesse de la pompe ou du ventilateur avec une commande à vitesse variable.

7.3 Dimensionnement correct du moteur

Les moteurs éconergétiques sont particulièrement utiles dans les applications présentant un nombre élevé d'heures de fonctionnement à plus des $\frac{3}{4}$ de la pleine charge.

Afin d'éviter de nombreuses heures de fonctionnement à des charges inférieures à 50 % conduisant à un plus faible rendement, il convient de dimensionner le système selon la charge de pointe et le couple de démarrage requis.

Du fait que les moteurs ont un meilleur rendement, leur température d'utilisation est plus basse et leur capacité de surcharge est en général plus élevée, lorsqu'on la compare aux moteurs standards. Par conséquent, le surdimensionnement du moteur pour des demandes occasionnelles de pointes de puissance est rarement requis et certainement non rentable.

Lorsqu'un remplacement de moteur standard par un moteur de rendement élevé est envisagé dans des applications existantes, il convient d'évaluer correctement la demande de puissance et le dimensionnement de celui-ci.

7.4 Application en service continu

Les économies d'énergie réalisables d'une classe de rendement énergétique à la classe juste supérieure sont la conséquence d'une réduction des pertes d'environ 15 % à 20 % (voir la Figure 10). La période de récupération des coûts d'investissement supplémentaires associée aux moteurs à "haut" rendement ou à rendement "premium" peut facilement être calculée en tenant compte du rendement global du moteur et du coût énergétique total.

Le diagramme suivant illustre les économies d'énergie, en % de l'énergie électrique consommée par le moteur, rapportées à la puissance de sortie assignée du moteur, en passant de la classe IE la plus basse à une autre classe plus élevée.

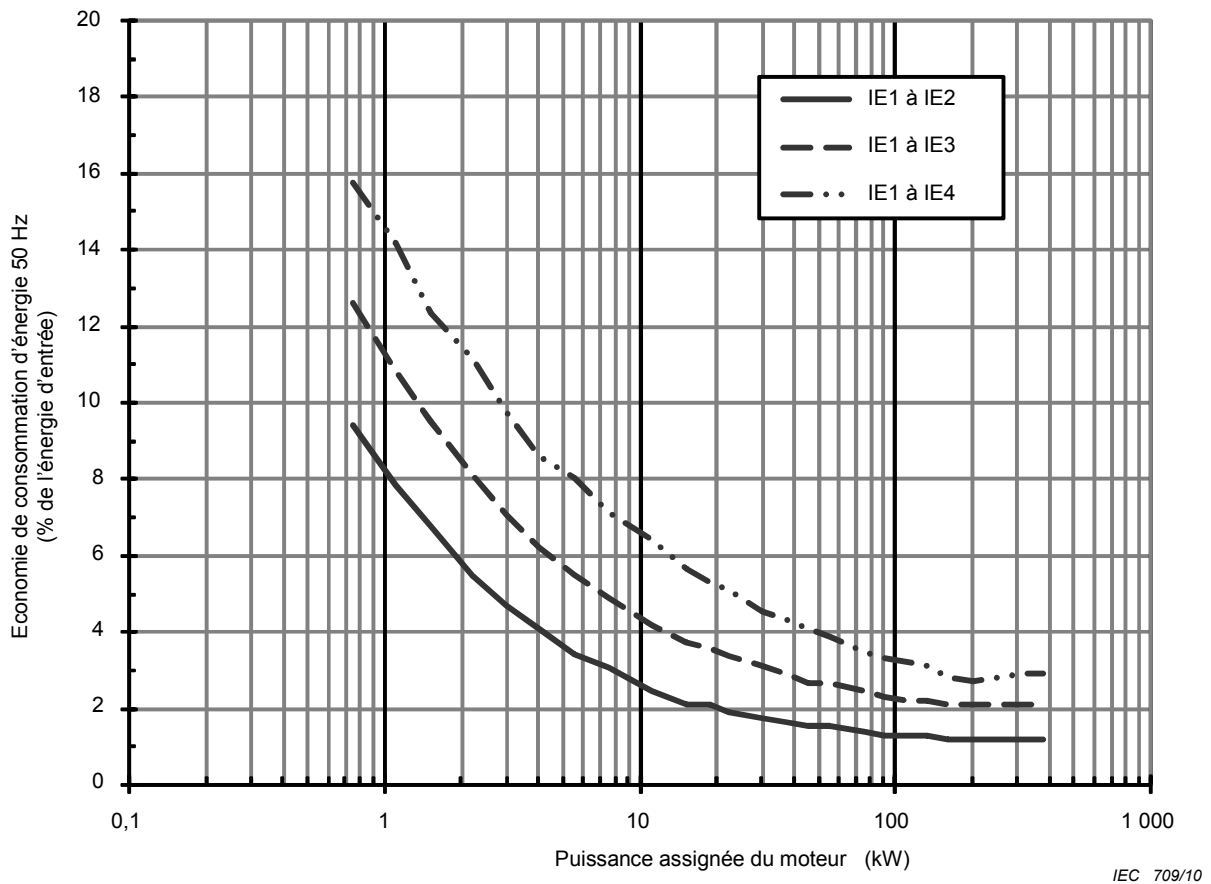


Figure 10 – Economies potentielles d'énergie par amélioration du rendement en fonction des classes pour des moteurs fonctionnant à leur charge assignée

7.5 Applications impliquant de longues périodes de fonctionnement à faible charge

Différentes méthodes ont été proposées pour diminuer la tension appliquée au moteur en réponse à la charge entraînée, le but étant de réduire les pertes de magnétisation pendant les périodes où la pleine capacité du couple moteur n'est pas requise. Le contrôleur de facteur de puissance est l'un de ces dispositifs classique. Le contrôleur de facteur de puissance est un dispositif ajustant la tension appliquée au moteur pour approcher un facteur de puissance préétabli.

Ces contrôleurs de facteur de puissance peuvent, par exemple, être d'une utilisation bénéfique pour des moteurs de puissance assignée inférieure à 3 kW, fonctionnant pendant de longues périodes sous de faibles charges, où les pertes de magnétisation représentent un pourcentage relativement élevé des pertes totales. Des précautions doivent être prises en fonction de l'application de ces contrôleurs. Des économies ne sont obtenues que dans le cas où le moteur commandé est mis en fonctionnement à faible charge pendant des périodes prolongées.

Une attention particulière doit être portée lorsque l'on considère leur utilisation avec des moteurs de puissance assignée supérieure à 3 kW. Il est probable qu'un moteur représentatif de 7,5 kW ait des pertes à vide de l'ordre de 4 % ou 5 %, relativement à sa puissance de sortie assignée. Dans cette gamme de puissances, les pertes de magnétisation pouvant être économisées ne peuvent pas égaler les pertes supplémentaires dues à la distorsion de la forme d'onde de tension introduite par le contrôleur de facteur de puissance.

7.6 Applications impliquant des charges négatives

Les charges négatives résultent généralement d'une perte d'énergie, si une certaine forme de freinage dissipatif est utilisée. On peut donner comme exemples de charges négatives: la décélération des charges à forte inertie, les bancs d'essai d'absorption, les dérouleurs, les bancs de transformation en continu, et les transporteurs (convoyeurs) descendants. Dans ces différents cas, l'énergie peut être économisée en utilisant des dispositifs de récupération d'énergie.

7.7 Applications pour lesquelles le couple résistant augmente avec la vitesse (pompes, ventilateurs, compresseurs, etc.)

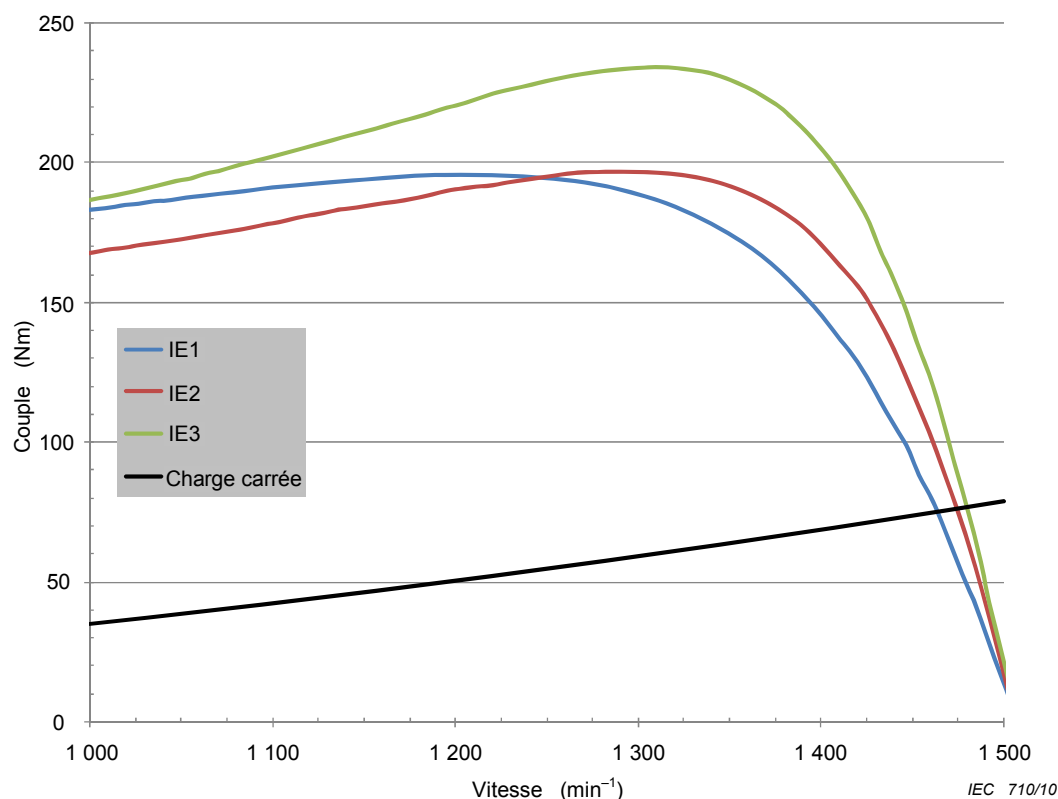


Figure 11 – Couples représentatifs en fonction des courbes de vitesse pour des moteurs triphasés à induction à cage, 4 pôles de 11 kW et charges représentatives en fonction des courbes de vitesse pour des charges variant comme le carré de la vitesse

En règle générale, les moteurs à haut rendement à induction à cage ont un faible glissement (voir le Tableau 4), c'est-à-dire une vitesse de rotation plus élevée que des moteurs de moins bon rendement. Lorsque le couple de l'application est une fonction du carré de la vitesse, comme dans les pompes, les ventilateurs, les compresseurs etc., l'augmentation de la vitesse conduira à une augmentation de la puissance de sortie (couple), qui pourrait, dans certains cas, contrecarrer les bénéfices de l'amélioration du rendement énergétique (voir la Figure 11).

Tableau 4 – Exemple de variations du rendement, de la vitesse et du couple demandé en fonction de la classe de rendement énergétique, pour trois moteurs de 11 kW, 50 Hz dans la même application

	eff %	n min ⁻¹	T Nm	P_{sortie} kW	$P_{\text{entrée}}$ kW
IE1	87,6	1464	75,4	11,559	13,195
IE2	89,8	1474	76,4	11,792	13,131
IE3	91,4	1480	77,1	11,948	13,073

Par conséquent, dans ces applications, lorsqu'un moteur de faible rendement est remplacé, en rénovation, par un moteur de rendement plus élevé, il convient de ne pas réduire la puissance d'entrée autant que la comparaison des rendements des deux moteurs le permettrait.

En réalité, dans certains cas, la puissance d'entrée du moteur éconergétique peut augmenter par rapport à celle du moteur à plus faible rendement.

7.8 Applications impliquant des démarrages et des arrêts fréquents et/ou un freinage mécanique

Généralement, la conception des moteurs éconergétiques réduit les pertes Joule (I^2R) du fait d'une utilisation réduite, c'est-à-dire par surdimensionnement du moteur, et/ou en améliorant le matériau conducteur du rotor (par exemple, cuivre coulé sous pression au lieu d'aluminium).

Cependant, les deux concepts conduisent automatiquement à l'augmentation de l'inertie du rotor lorsque l'on compare les moteurs éconergétiques aux moteurs à plus faible rendement de même puissance de sortie assignée.

Dans les applications où les démarrages et les arrêts fréquents sont nécessaires, l'augmentation de l'inertie du rotor augmentera le temps de démarrage et la consommation de puissance pendant celui-ci. Elle réduira également le nombre de démarrages admissibles par heure, limitant probablement, de ce fait, les capacités de l'application.

En outre, lorsque le freinage est réalisé par un système mécanique, l'usure du disque de frein, ainsi que le temps de freinage augmenteront pour les moteurs dont le rotor a une inertie plus élevée.

Les pertes de démarrage peuvent être considérablement réduites et le nombre admissible de démarrages par heure augmenté, en utilisant un convertisseur de fréquence pour faire démarrer le moteur au lieu d'un démarrage direct sur le réseau. Toutefois, l'inconvénient général des moteurs éconergétiques dans ce domaine d'applications subsiste.

NOTE Un dispositif de démarrage progressif réduira les couples au démarrage, mais ne réduira ni les pertes, ni n'améliorera le rendement.

7.9 Applications impliquant des atmosphères explosives de gaz ou de poussières

Certaines restrictions de conception existent pour les moteurs électriques en atmosphères explosives de gaz ou de poussières.

Les moteurs avec des enveloppes antidéflagrantes ("d") (conformes à la CEI 60079-1) ou de mode de protection "n" (conformes à la CEI 60079-15) ne sont pas généralement concernés.

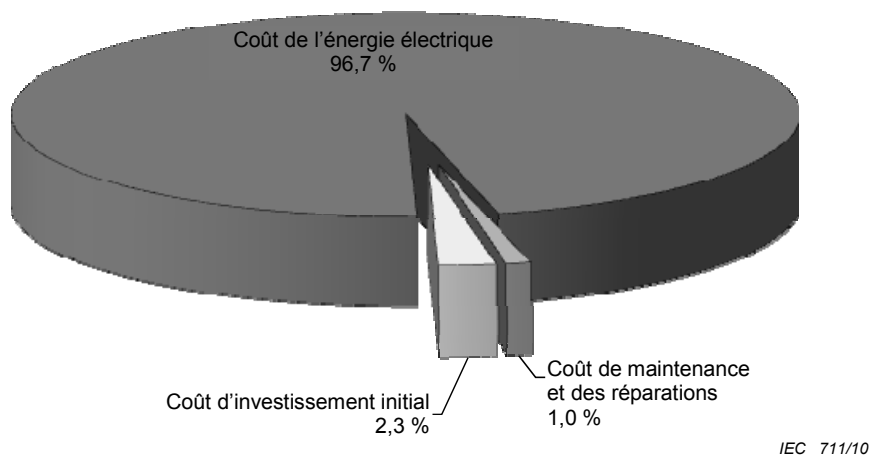
Les moteurs avec protection par "sécurité augmentée ("e")" (conformes à la CEI 60079-7) pourraient être limités par les exigences de durée t_E , d'entrefer, de courant de démarrage, etc. Leur niveau de rendement énergétique et leur classification de rendement peuvent être réduits.

Les moteurs construits pour une utilisation en atmosphères de poussières explosives avec protection contre l'inflammation des poussières par enveloppe "t" ou "tD" (conformes à la CEI 60079-31 ou à la CEI 61241-1) ont des joints d'arbre supplémentaires. Leur niveau de rendement énergétique pourrait être réduit.

8 Aspects économiques

8.1 Pertinence vis-à-vis des utilisateurs

L'utilisateur veut un système motorisé fiable et rentable. Le coût d'achat initial du moteur est peu élevé comparé aux frais de fonctionnement pendant la phase d'exploitation. Les frais de fonctionnement des moteurs électriques sont généralement supérieurs à 90 % du coût global de possession (voir la Figure 12).



NOTE Source: EuP Lot 11, 2008, voir Bibliographie.

Figure 12 – Cycle de vie sur 15 ans d'un moteur IE3, 11 kW, fonctionnant à pleine charge, 4 000 h de fonctionnement par an

Les moteurs de rendement plus élevé sont plus onéreux en raison de leur meilleure qualité de production et du matériel supplémentaire utilisé. Le surcoût dépend de la puissance, de la taille et du type de moteur. Entre IE1 et IE2, quelques 10 % à 15 % doivent être ajoutés au montant des matériaux actifs requis (acier, cuivre), entre IE2 et IE3, il faut encore ajouter 10 % à 15 %. De plus, des matériaux de qualité supérieure peuvent être nécessaires. Par conséquent, l'augmentation typique de prix pourrait être comprise entre 10 % et 30 % par classe de rendement. En comparant les rendements des moteurs, on doit prendre en considération non seulement l'augmentation de ceux-ci, mais également les facteurs de puissance respectifs.

Dans les cas de remplacements et de nouvelles installations, les utilisateurs sont confrontés à une décision d'achat complexe, car elle implique de considérer les coûts d'exploitation, ainsi que le coût d'achat initial, pour différentes possibilités du projet. En cas de remplacement, il convient également d'évaluer la possibilité de réparer le moteur.

Pour déterminer la faisabilité économique d'installer des moteurs éconergétiques, on doit estimer les économies d'énergie annuelles totales relativement au surcoût de ces moteurs par rapport aux moteurs existants ou standard.

Deux méthodes sont généralement utilisées pour aider à la prise de décision:

- récupération directe (période de remboursement);
- coût du cycle de vie.

8.2 Coût d'achat initial

Le coût d'achat initial comprend la planification, l'installation et le prix d'achat du moteur, et des équipements supplémentaires, comme les variateurs de vitesse.

Pour chaque comparaison de coûts, on doit définir une situation de référence. Dans les pays appliquant les MPES¹ (normes minimales de performance énergétique) la situation de référence est représentée par le moteur avec le niveau de rendement respectif; dans les pays sans exigence obligatoire, celle-ci est représentée par le moteur standard le plus souvent utilisé sur un marché donné. Ensuite, un dossier du projet doit être élaboré avec des moteurs de rendement plus élevé jusqu'à IE3.

Le coût des variateurs de vitesse doit être ajouté au coût du projet, s'ils sont considérés comme envisageables pour le type donné de machines et leur fonctionnement.

En cas de remplacement du fait d'une défaillance, aucun coût ne doit être pris en considération pour le moteur existant. En cas de remplacement prématuré, une valeur résiduelle, correspondant au temps de fonctionnement perdu, peut être incluse dans le calcul du prix d'achat.

8.3 Frais d'exploitation

Les frais d'exploitation comprennent l'électricité, la maintenance et les réparations.

La prévision de consommation d'électricité est calculée sur la base des trois éléments suivants:

- indice annuel moyen de charge (par exemple, voir la Figure 13);
- rendement du moteur pour cet indice moyen de charge;
- heures de fonctionnement sur un an.

Pour les moteurs à vitesse constante, ces éléments peuvent être facilement estimés avec une bonne précision. Pour le calcul des systèmes comportant des moteurs à charge variable et l'éventuelle utilisation de commandes à vitesse variable (VSD), les calculs de l'indice moyen de charge, des heures de fonctionnement respectives et des rendements moteur plus celui de la commande à vitesse variable, doivent être basés sur un profil de charge représentatif. Si un profil de charge mesuré pertinent de systèmes existants n'est pas disponible, un profil moyen doit être pris comme hypothèse (exemple):

¹ MPES = *Minimum Energy Performance Standards*, en anglais.

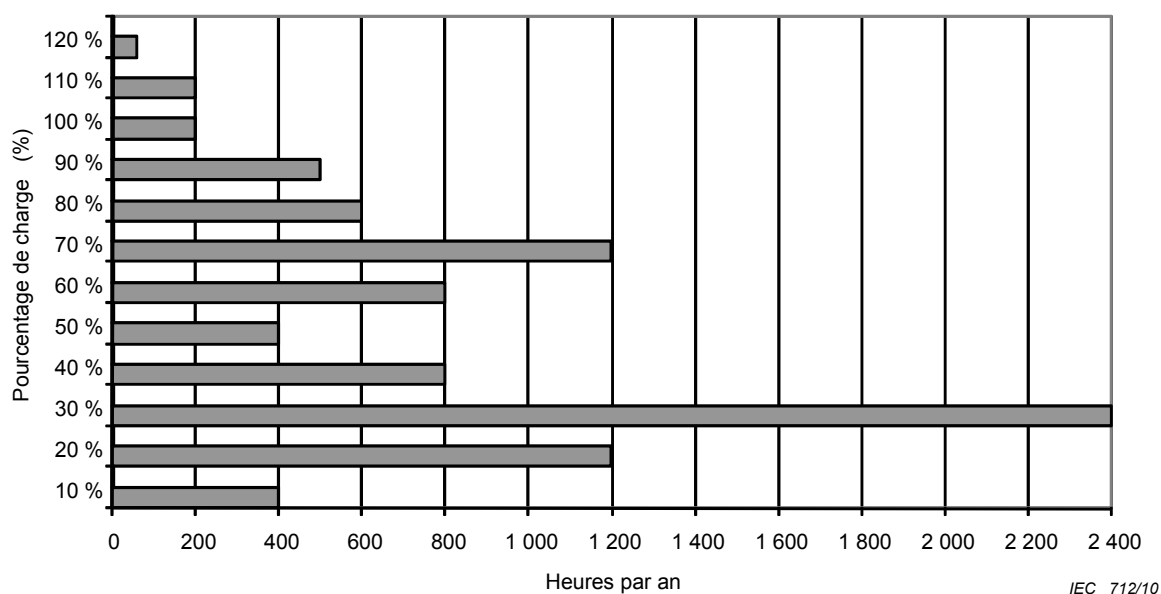


Figure 13 – Exemple d'un profil d'indice de charge: pourcentage de charge rapporté au nombre d'heures de fonctionnement par an

Les frais d'exploitation concernant l'électricité se composent généralement des trois éléments d'un tarif ou d'un contrat de fourniture avec le réseau public local de distribution:

- le prix de l'énergie électrique (kWh) consommée (tenant compte des tarifs jour/nuit, saisonniers et autres);
- le coût de la charge de pointe payé (kW) prenant en compte les pointes de 15 min;
- le coût du facteur de puissance non corrigé (kVA).

Des variations locales des éléments de coût ci-dessus et de structure doivent être prises en considération, ainsi que les remises, les impôts et taxes, et les futures hausses de prix durant le cycle de vie attendu technique du moteur (temps pendant lequel la machine peut typiquement fonctionner, en incluant des réparations) ou de l'application (le plus faible étant considéré). Les éléments de coûts fixes inclus dans les tarifs ne sont pas pris en considération, car ils ne sont pas affectés par les améliorations du rendement énergétique.

Les coûts de maintenance et de réparation sont à ajouter aux coûts de l'électricité. Leur valeur doit être estimée sur la base de l'expérience connue des équipements installés, en l'occurrence du coût par heure de fonctionnement des moteurs de différentes puissances de sortie, de leur vitesse et de leur fonctionnement annuel.

Pour ce qui concerne l'analyse du coût du cycle de vie, la durée de vie pendant laquelle les frais d'exploitation sont à acquitter doit également être évaluée. Si aucune donnée tirée de l'expérience d'installations relative à un parc de moteurs n'est disponible, les données techniques moyennes de durée de vie suivantes peuvent être utilisées (voir le Tableau 5):

Tableau 5 – Durées de vie moyennes de moteurs électriques

	Puissance assignée du moteur			
	kW			
	0,75 – 1,1	1,1 – 11	11 – 110	110 – 370
Durée de vie moyenne (années)	10	12	15	20

La durée de vie réelle dépend du nombre d'heures annuelles de fonctionnement, des cycles et de l'indice de charge, et de la fiabilité du moteur, de la qualité de la maintenance et des réparations. Du fait que des frais d'exploitation, particulièrement le coût de l'électricité, sont de loin l'élément dominant du calcul de coût, il convient de les soumettre à une analyse de sensibilité. Un ou plusieurs éléments des frais d'exploitation sont modifiés pour vérifier si les résultats sont "robustes" ou non. Le syntagme "résultat robuste" signifie que les différentes variantes des périodes de récupération ou des coûts de cycle de vie ne modifient pas leur séquence dans la comparaison. Souvent les hypothèses relatives au nombre d'heures annuelles de fonctionnement sont les éléments les plus critiques et il convient donc de les faire varier.

8.4 Coût de rebobinage

Indépendamment du coût d'achat initial et des frais d'exploitation, le coût de réparation des moteurs défaillants est également pris en considération dans la prise de décision.

A la suite d'une défaillance ou du grillage d'un moteur les possibilités suivantes doivent être considérées:

- a) rebobiner le moteur défaillant;
- b) acheter un nouveau moteur de rendement standard;
- c) acheter un moteur éconergétique.

En supposant que le moteur défaillant puisse être rebobiné, l'approche de coût initial la plus faible sera de faire rebobiner le moteur selon les spécifications d'origine. Cependant, suivant les techniques utilisées par les différents ateliers de rebobinage, une diminution du rendement de l'ordre de 1,0 à 2,5 points en % peut avoir lieu (par exemple, les températures de chauffage utilisées pour enlever les vieux enroulements peuvent modifier des propriétés des tôles feuilletées en acier ou le nouveau fil de cuivre des enroulements peut changer les pertes cuivre du stator).

Dans ce cas, une comparaison est à faire entre l'utilisation d'un moteur rebobiné (coût de rebobinage + frais d'exploitation plus élevés dus à la baisse du rendement) et acheter un nouveau moteur éconergétique (avec un prix plus élevé, car de meilleure qualité et des frais d'exploitation plus faibles, du fait d'un rendement plus élevé). Outre ceci, l'indice de charge, le nombre d'heures annuelles de fonctionnement, le coût de l'électricité, sont aussi à considérer pour déterminer un coût précis.

8.5 Période de récupération

La méthode de récupération directe est basée sur la comparaison de l'investissement supplémentaire pour des moteurs de rendement plus élevé (et peut-être des commandes à vitesse variable (VSD) et tout autre équipement améliorant le rendement) et des frais d'exploitation annuels inférieurs.

L'utilisateur doit avoir connaissance les éléments suivants:

- le prix d'achat des différentes variantes du projet pour des moteurs de différentes classes de rendement et pour les commandes à vitesse variable,
- le temps de fonctionnement annuel,
- le coût de l'électricité,
- les dispositions prévoyant des réductions de taxes/d'impôts,
- les remises du réseau public de distribution d'électricité.

L'utilisateur peut ensuite calculer les frais d'exploitation et comparer la période de récupération en fonction des différentes variantes proposées pour le projet. Pendant les périodes de récupération allant jusqu'à un an, il n'est généralement pas exigé de tenir compte des coûts de l'inflation, de la maintenance, de la main d'œuvre et de l'augmentation des prix

de l'énergie. Toutefois, si la période de récupération est supérieure à un an, les éléments précédents ne peuvent pas être négligés. L'utilisateur peut alors choisir la solution ayant la période de récupération la plus courte.

L'utilisateur peut également avoir une période de récupération maximale prédéfinie pour son installation, généralement entre 2 ans et 5 ans. Cette période est considérablement plus courte que la durée de vie prévue du système motorisé. Cela signifie qu'après une courte période de récupération, le moteur continue à fonctionner jusqu'à la fin de sa durée de vie technique, sans remboursement du coût d'investissement supplémentaire. Pendant cette phase de fin de vie "dorée", le moteur génère un profit.

8.6 Coût du cycle de vie

Dans l'analyse du coût du cycle de vie, la somme des coûts de tous les éléments des trois phases, pour différentes variantes du projet, est comparée à la situation de référence:

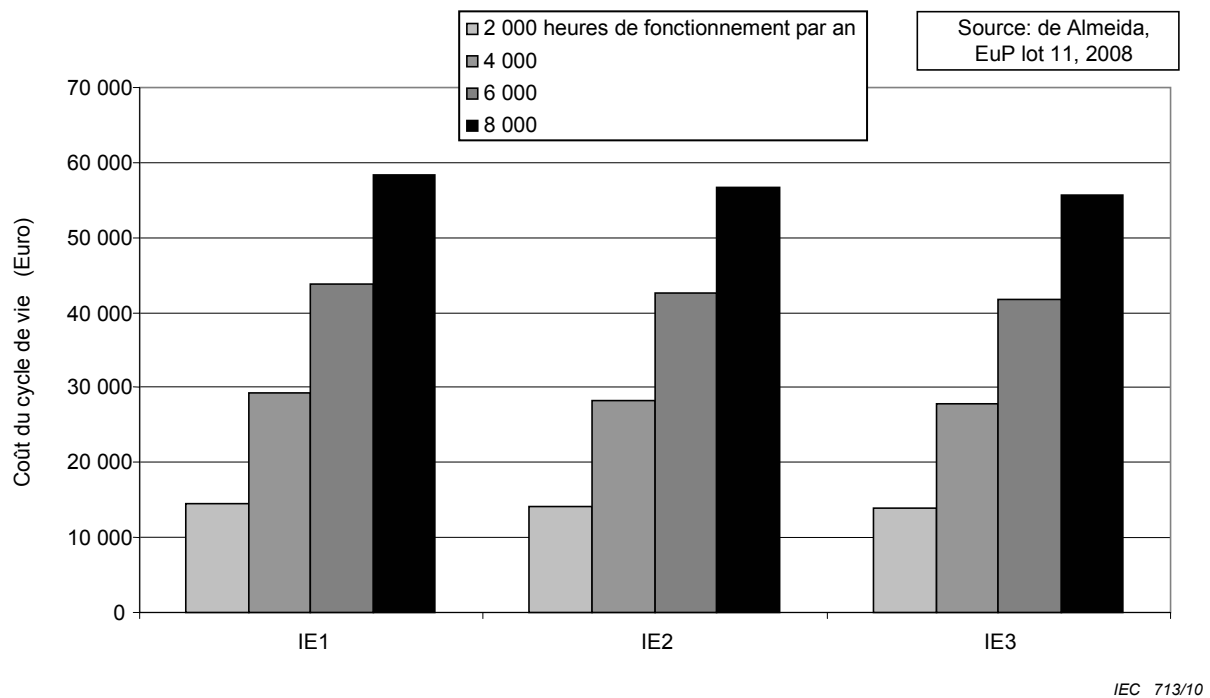
- le coût d'achat initial (ou de réparation), de la planification et de l'installation;
- la phase d'utilisation avec le coût de fonctionnement (énergie, maintenance et réparations);
- la phase de fin de vie, avec le coût de dépose et de recyclage.

Pour un calcul précis, une analyse de la valeur actualisée des flux de trésorerie (DCF) doit être faite en tenant compte des taux d'intérêt et des taux d'inflation. L'utilisateur doit avoir connaissance des prix d'achat des moteurs des différentes classes de rendement et des commandes à vitesse variable, du temps de fonctionnement annuel, du coût de l'électricité, et également de la durée de vie prévue et du coût moyen de maintenance et de réparation.

Le coût de fin de vie est généralement négligé dans le calcul, car le recyclage des matériaux du moteur compense le coût final de démantèlement et de transport.

L'utilisateur peut choisir la variante du projet présentant le coût de cycle de vie le plus avantageux. Le moindre coût de celui-ci est le choix le plus approprié pour l'utilisateur. Dans le cas d'investissements plus importants, ces éléments peuvent aider à faire le choix des projets optimaux.

De récentes études en Europe (EuP 2008: Figure 14) confirment que les nouveaux moteurs IE3 entre 1,1 kW et 110 kW ont des coûts de cycle de vie inférieurs à ceux des moteurs IE1 ou IE2, s'ils ont plus de 2 000 h de fonctionnement par an.



NOTE Source: EuP Lot 11, 2008, voir Bibliographie.

Figure 14 – Analyse du coût du cycle de vie d'un moteur de 11 kW fonctionnant à pleine charge

Les incidences sur l'environnement des moteurs de rendement élevé et des commandes à vitesse variables ont également été estimées dans plusieurs études. Le coût du matériel supplémentaire utilisé dans la production des équipements éconergétiques est répercuté dans leur prix d'achat plus élevé. Les études confirment que, si le coût de cycle de vie est inférieur pour les moteurs à haut rendement, ceci est également vrai lorsque l'on considère l'incidence sur l'environnement.

9 Maintenance

Un moteur électrique a généralement besoin de peu d'entretien, la maintenance appropriée est donc souvent oubliée. Il existe un certain nombre d'anomalies courantes qui ont un effet néfaste sur la performance d'un moteur:

- a) ventilation insuffisante;
- b) températures ambiantes élevées;
- c) défaut d'alignement mécanique;
- d) mauvaise application d'une courroie trapézoïdale;
- e) mauvaise lubrification;
- f) humidité excessive;
- g) contamination;
- h) surcharge permanente;
- i) tension anormale;
- j) déséquilibre de tension extrême (fonctionnement en monophasé).

Une ventilation insuffisante ou des températures ambiantes élevées entraînent une résistance plus élevée dans les enroulements. En moyenne, le rendement d'un moteur va décroître de

0,2 à 1,0 point en %, de la température ambiante à sa température de fonctionnement. De plus, les élévations excessives de température provoquées par une maintenance ou une application inadéquate réduit la durée de vie opérationnelle du moteur et augmente la consommation d'énergie.

Parfois, des frottements supplémentaires se développent graduellement dans la machine entraînée. Ceux-ci peuvent être provoqués par une accumulation de poussières sur un ventilateur, l'usure des pièces, le mauvais alignement des engrenages ou des courroies, ou la lubrification insuffisante de la machine entraînée. Ces conditions font que la machine entraînée devient moins efficace, ce qui réduit le rendement du système et augmente la consommation d'énergie. Pour assurer un fonctionnement efficace continu et une longue vie au moteur, il convient d'établir un programme régulier de maintenance des moteurs et des équipements entraînés.

Annexe A (informative)

Rendement super premium (IE4)

Pour information, nous donnons ci-après les limites nominales proposées relatives au rendement "super-premium". Dans la CEI 60034-30 les termes "super-premium" et "IE4" sont avancés pour rendre compte d'une réduction des pertes d'approximativement 15 % par rapport à IE3. La définition exacte est proposée dans cette Annexe.

La classe de rendement énergétique IE4 n'est pas limitée aux moteurs triphasés à induction à cage, comme les classes IE1, IE2 et IE3 de la CEI 60034-30. A contrario, la classe IE4 est prévue pour être utilisée avec tous les types de moteurs électriques, en particulier les machines alimentées par un convertisseur (moteurs du type à induction à cage et autres types, comme les moteurs synchrones à aimants permanents, etc.).

Du fait que la fréquence du réseau et le nombre de pôles des machines alimentées par un convertisseur ne sont pas directement liés à la vitesse, ces moteurs sont en général assignés pour une gamme de vitesses et sont classés par couples plutôt que par puissances. Par conséquent, les limites IE4 sont classées par couples et données pour différentes gammes de vitesses. La Figure A.1 donne des exemples de courbes de rendement.

NOTE 1 Il convient que les utilisateurs soient conscients du fait que les convertisseurs de fréquence ont également un rendement associé, ce qui réduira le rendement du système (moteur plus convertisseur).

NOTE 2 Voir la CEI 60034-2-3 relative à la détermination du rendement des moteurs alimentés par un convertisseur (en préparation).

Toutefois, il n'est pas demandé de caractériser le moteur sur la totalité de sa gamme de vitesses de 801 min⁻¹ à 3 600 min⁻¹, ni pour une assignation de couple constant sur toute la gamme de vitesses assignées.

Les limites nominales du rendement "super-premium" peuvent généralement être calculées pour le couple assigné T_N , en utilisant la formule suivante:

$$\eta_n = A \times \left[\log_{10} \left(\frac{T_N}{1 \text{ Nm}} \right) \right]^3 + B \times \left[\log_{10} \left(\frac{T_N}{1 \text{ Nm}} \right) \right]^2 + C \times \log_{10} \left(\frac{T_N}{1 \text{ Nm}} \right) + D$$

où A , B , C , D sont des coefficients d'interpolation (voir Tableau A.1, ci-dessous).

NOTE 3 L'équation et les coefficients d'interpolation ont été mathématiquement définis pour obtenir la courbe la plus proche pour les limites de rendement nominales souhaitées. Ils n'ont pas de signification physique.

Le rendement résultant (%) est arrondi à la décimale la plus proche, c'est-à-dire xx,x %.

Les rendements nominaux IE4 pour les couples supérieurs à 2 000 Nm sont égaux aux limites pour 2 000 Nm. Les rendements nominaux IE4 pour les puissances de sortie supérieures à 400 kW ne sont pas définis.

Lorsque plusieurs couples et vitesses (gammes) sont assignés, il convient de calculer les limites nominales du rendement conformément à la présente Norme et de les appliquer individuellement pour chaque combinaison de couple(s) assigné(s) du moteur et de vitesse assignée (gammes).

Pour des moteurs assignés par la puissance P_N plutôt que par le couple, il convient d'utiliser la formule suivante pour déterminer T_N :

$$T_N = \frac{P_N}{n_N} \cdot \frac{60 \cdot 1000}{2\pi}$$

Il convient d'arrondir le couple résultant à la valeur la plus proche de la série des nombres normaux R10, voir l'ISO 3.

Afin de maintenir la compatibilité avec les moteurs à une seule vitesse, 2, 4 et 6 pôles, fonctionnant directement sur le réseau, le Tableau A.3 est donné pour convertir couple et vitesse en niveaux de puissance standard. Sur cette base, le Tableau A.4 donne les limites nominales de rendement IE4 pour une alimentation en 50 Hz et le Tableau A.5 pour une alimentation en 60 Hz.

Tableau A.1 – Coefficients d'interpolation

Code IE	Coefficients	De 801 min ⁻¹ à 1 000 min ⁻¹ max 2 000 Nm	De 1 001 min ⁻¹ à 1 200 min ⁻¹ max 2 000 Nm	De 1 201 min ⁻¹ à 1 500 min ⁻¹ max 2 000 Nm	De 1 501 min ⁻¹ à 1 800 min ⁻¹ max 2 000 Nm	De 1 801 min ⁻¹ à 3 000 min ⁻¹ max 1 250 Nm	De 3 001 min ⁻¹ à 3 600 min ⁻¹ max 1 000 Nm
IE4	A	0,2824	0,1901	0,1846	0,1648	0,2116	0,2227
	B	-3,8439	-2,9242	-2,7433	-2,4976	-2,6695	-2,7262
	C	17,4628	13,6953	12,7473	11,6595	11,3369	11,1625
	D	70,2209	76,1961	77,9565	79,7787	80,8449	81,2267

Pour une utilisation plus facile, les limites nominales du Tableau A.2 peuvent être appliquées en fonction des niveaux discrets de couple.

Tableau A.2 – Limites nominales (%) pour le rendement "super-premium" (IE4)

T _N Nm	De 801 min ⁻¹ à 1 000 min ⁻¹	De 1 001 min ⁻¹ à 1 200 min ⁻¹	De 1 201 min ⁻¹ à 1 500 min ⁻¹	De 1 501 min ⁻¹ à 1 800 min ⁻¹	De 1 801 min ⁻¹ à 3 000 min ⁻¹	De 3 001 min ⁻¹ à 3 600 min ⁻¹
2,5	76,6	81,2	82,6	84,0	84,9	85,3
3,2	78,0	82,3	83,7	85,0	85,9	86,1
4,0	79,4	83,4	84,7	85,9	86,7	87,0
5,0	80,6	84,4	85,6	86,8	87,5	87,8
6,3	81,9	85,4	86,5	87,6	88,3	88,5
8	83,1	86,3	87,4	88,4	89,1	89,2
10	84,1	87,2	88,1	89,1	89,7	89,9
12,5	85,1	88,0	88,9	89,8	90,3	90,5
16	86,2	88,8	89,7	90,5	91,0	91,1
20	87,1	89,5	90,3	91,1	91,5	91,6
25	87,9	90,1	90,9	91,6	92,1	92,1
32	88,7	90,8	91,5	92,2	92,5	92,6
40	89,5	91,4	92,1	92,7	93,0	93,0
50	90,2	92,0	92,6	93,2	93,4	93,4
63	90,8	92,5	93,1	93,6	93,8	93,8
80	91,5	93,0	93,6	94,1	94,2	94,1
100	92,0	93,4	94,0	94,4	94,5	94,4
125	92,5	93,8	94,3	94,8	94,8	94,7
160	93,1	94,2	94,7	95,1	95,1	95,0

T_N Nm	De 801 min ⁻¹ à 1 000 min ⁻¹	De 1 001 min ⁻¹ à 1 200 min ⁻¹	De 1 201 min ⁻¹ à 1 500 min ⁻¹	De 1 501 min ⁻¹ à 1 800 min ⁻¹	De 1 801 min ⁻¹ à 3 000 min ⁻¹	De 3 001 min ⁻¹ à 3 600 min ⁻¹
200	93,5	94,5	95,0	95,4	95,4	95,2
250	93,9	94,8	95,3	95,6	95,6	95,4
315	94,3	95,1	95,6	95,9	95,8	95,6
400	94,6	95,4	95,8	96,1	96,0	95,7
500	94,9	95,6	96,0	96,3	96,2	95,9
630	95,2	95,8	96,2	96,5	96,3	96,0
800	95,4	96,0	96,4	96,6	96,4	96,1
1000	95,6	96,1	96,5	96,7	96,5	96,2
1250	95,8	96,2	96,6	96,8	96,6	-
1600	96,0	96,3	96,7	96,9	-	-
2000	96,1	96,4	96,8	97,0	-	-
2500	96,1	96,4	96,8	-	-	-
3150	96,1	96,4	-	-	-	-
4000	96,1	-	-	-	-	-

**Tableau A.3 – Puissance normalisée en kW associée
au couple et à la vitesse, pour les moteurs
fonctionnant directement sur le réseau**

T_N Nm	50 Hz 6 pôles (De 801 min ⁻¹ à 1 000 min ⁻¹)	60 Hz 6 pôles (De 1 001 min ⁻¹ à 1 200 min ⁻¹)	50 Hz 4 pôles (De 1 201 min ⁻¹ à 1 500 min ⁻¹)	60 Hz 4 pôles (De 1 501 min ⁻¹ à 1 800 min ⁻¹)	50 Hz 2 pôles (De 1 801 min ⁻¹ à 3 000 min ⁻¹)	60 Hz 2 pôles (De 3 001 min ⁻¹ à 3 600 min ⁻¹)
2,5	-	-	-	-	0,75	-
3,2	-	-	-	-	-	1,1
4,0	-	-	-	0,75	1,1	1,5
5,0	-	-	0,75	-	1,5	-
6,3	-	0,75	-	1,1	-	2,2
8	0,75	-	1,1	1,5	2,2	-
10	1,1	1,1	1,5	-	3	3,7
12,5	-	1,5	-	2,2	4	-
16	1,5	-	2,2	-	-	5,5
20	2,2	2,2	3	3,7	5,5	7,5
25	-	-	4	-	7,5	-
32	3	3,7	-	5,5	-	11
40	4	-	5,5	7,5	11	15
50	5,5	5,5	7,5	-	15	18,5
63	-	7,5	-	11	18,5	22
80	7,5	-	11	15	22	30
100	-	11	15	18,5	30	37
125	11	15	18,5	22	37	45
160	15	18,5	22	30	45	55
200	18,5	22	30	37	55	75

T_N Nm	50 Hz 6 pôles (De 801 min ⁻¹ à 1 000 min ⁻¹)	60 Hz 6 pôles (De 1 001 min ⁻¹ à 1 200 min ⁻¹)	50 Hz 4 pôles (De 1 201 min ⁻¹ à 1 500 min ⁻¹)	60 Hz 4 pôles (De 1 501 min ⁻¹ à 1 800 min ⁻¹)	50 Hz 2 pôles (De 1 801 min ⁻¹ à 3 000 min ⁻¹)	60 Hz 2 pôles (De 3 001 min ⁻¹ à 3 600 min ⁻¹)
250	22	30	37	45	75	90
315	30	37	45	55	90	110
400	37	45	55	75	110 / 132	150
500	45	55	75	90	160	185
630	55	75	90	110	200	220 / 250
800	75	90	110	150	250	300
1000	90 / 110	110	132 / 160	185	315	335 / 375
1250	132	150	200	220 / 250	355 / 375	-
1600	160	185	250	300	-	-
2000	200	220 / 250	315	335 / 375	-	-
2500	250	300 / 335	355 / 375	-	-	-
3150	315	375	-	-	-	-
4000	355 / 375	-	-	-	-	-

**Tableau A.4 – Limites nominales pour le rendement super premium (IE4)
pour les moteurs fonctionnant directement sur le réseau 50 Hz**

P_N kW	2 pôles 50 Hz	4 pôles 50 Hz	6 pôles 50 Hz
0,75	84,9	85,6	83,1
1,1	86,7	87,4	84,1
1,5	87,5	88,1	86,2
2,2	89,1	89,7	87,1
3	89,7	90,3	88,7
4	90,3	90,9	89,5
5,5	91,5	92,1	90,2
7,5	92,1	92,6	91,5
11	93,0	93,6	92,5
15	93,4	94,0	93,1
18,5	93,8	94,3	93,5
22	94,2	94,7	93,9
30	94,5	95,0	94,3
37	94,8	95,3	94,6
45	95,1	95,6	94,9
55	95,4	95,8	95,2
75	95,6	96,0	95,4
90	95,8	96,2	95,6
110	96,0	96,4	95,6
132	96,0	96,5	95,8
160	96,2	96,5	96,0
200	96,3	96,6	96,1
250	96,4	96,7	96,1

P_N kW	2 pôles 50 Hz	4 pôles 50 Hz	6 pôles 50 Hz
315	96,5	96,8	96,1
355	96,6	96,8	96,1
375 (400)	96,6	96,8	96,1

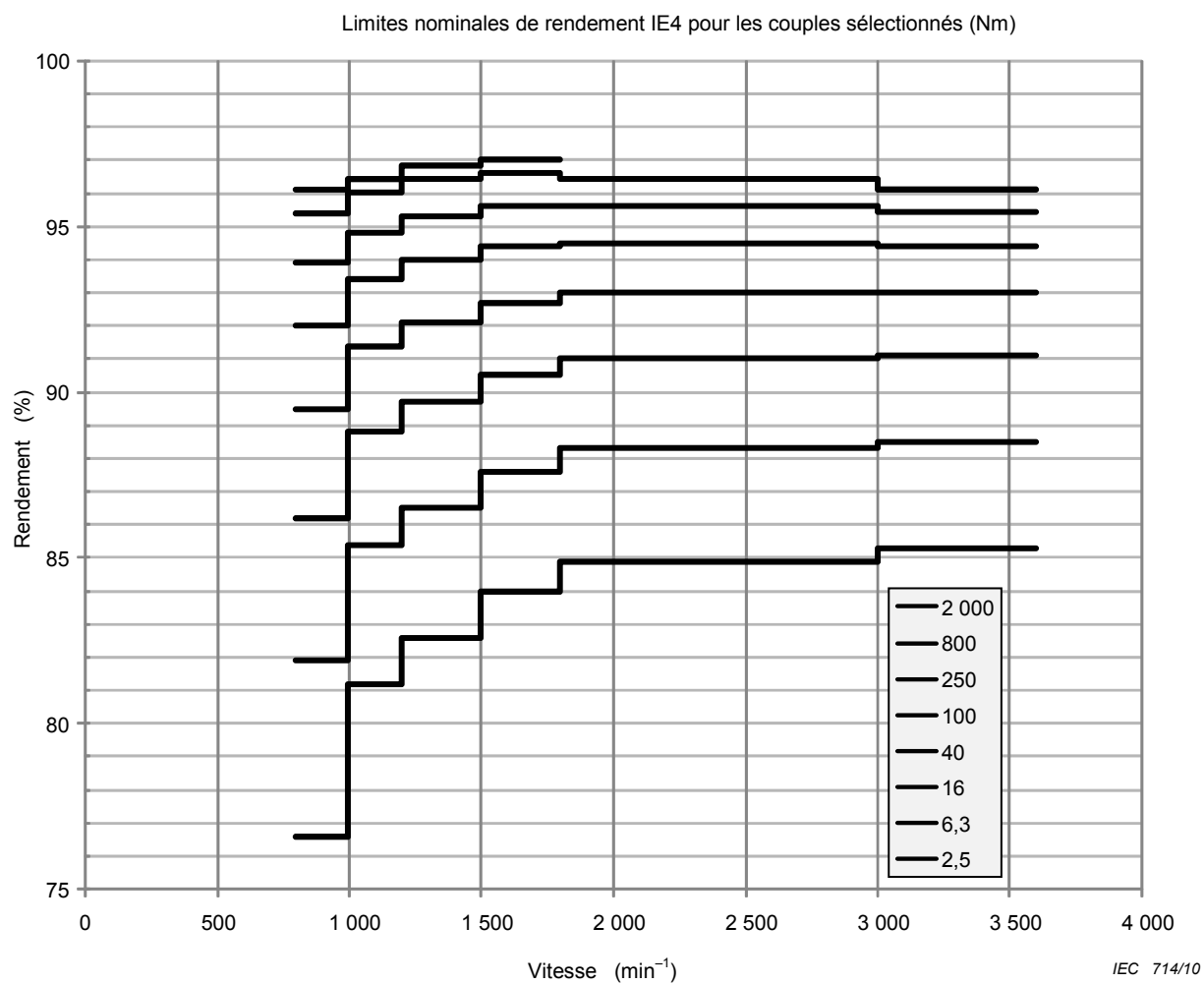
**Tableau A.5 – Limites nominales pour le rendement super premium (IE4)
pour les moteurs fonctionnant directement sur le réseau 60 Hz**

P_N kW	2 pôles 60 Hz	4 pôles 60 Hz	6 pôles 60 Hz
0,75	-	85,9	85,4
1,1	86,1	87,6	87,5 ^a
1,5	87,0	88,4	88,5 ^a
2,2	88,5	89,8	89,5
3,7	89,9	91,1	90,8
5,5	91,1	92,2	92,0
7,5	91,6	92,7	92,5
11	92,6	93,6	93,4
15	93,0	94,1	93,8
18,5	93,4	94,4	94,2
22	93,8	94,8	94,5
30	94,1	95,1	94,8
37	94,4	95,4	95,1
45	94,7	95,6	95,4
55	95,0	95,9	95,6
75	95,2	96,1	95,8
90	95,4	96,3	96,0
110	95,6	96,5	96,1
150	95,7	96,6	96,2
185	95,9	96,7	96,3
220	96,0	96,8	96,4
250	96,0	96,8	96,4
300	96,1	96,9	96,4
335	96,2	97,0	96,4
375	96,2	97,0	96,4

^a En raison des discontinuités des courbes IE3, 60 Hz, pour les moteurs 6 pôles avec des puissances de sortie de 1,1 kW, 1,5 kW et 2,2 kW, les valeurs limites IE4 dérivées des courbes lissées (Tableau A.2) sont légèrement inférieures aux valeurs IE3 (87,5 % pour 1,1 kW et 88,5 % pour 1,5 kW).

En appliquant les valeurs limites de rendement IE4 aux moteurs entrants dans le domaine d'application de la CEI 60034-30, on doit s'assurer que le niveau de rendement énergétique IE3 requis est également satisfait.

Par conséquent, les limites de rendement du Tableau A.5 pour 60 Hz, moteurs 6 pôles 1,1 kW et 1,5 kW, sont légèrement supérieures aux limites dérivées du Tableau A.2.

**Figure A.1 – Limites de rendement IE4**

Bibliographie

CEI 60034-2-1:2007, *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)*

CEI 60034-2-3, *Rotating electrical machines – Part 2-3: Specific test methods for determining losses and efficiency of converter-fed AC motors* (disponible en anglais uniquement)²

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

CEI/TS 60034-17, *Machines électriques tournantes – Partie 17: Moteurs à induction à cage alimentés par convertisseurs – Guide d'application*

CEI TS 60034-25, *Rotating electrical machines – Part 25: Guidance for the design and performance of a.c. motors specifically designed for converter supply* (disponible en anglais uniquement)

CEI 60034-26, *Machines électriques tournantes – Partie 26: Effets d'un système de tensions déséquilibrées sur les caractéristiques de fonctionnement des moteurs à cage asynchrones triphasés*

CEI 60072-1, *Dimensions et séries de puissances des machines électriques tournantes – Partie 1: Désignation des carcasses entre 56 et 400 et des brides entre 55 et 1080*

CEI 60079-0, *Atmosphères explosives – Partie 0: Matériel – Exigences générales*

CEI 60300-3-3, *Gestion de la sûreté de fonctionnement – Part 3-3: Guide d'application – Évaluation du coût du cycle de vie* (disponible en anglais seulement)

IEC 61241-1, *Matériels électriques pour utilisation en présence de poussières combustibles – Partie 1: Protection par enveloppes «tD»* (retirée)

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

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

ISO 3, *Nombres normaux – Séries de nombres normaux*

EN 50347, *Moteurs à induction triphasés à usage général de dimensions et puissances normales – Désignation des carcasses entre 56 et 315 et des brides entre 65 et 740*

NEMA ICS7.1, *Safety Standards for Construction and Guide for Selection, Installation, and Operation of Adjustable-Speed Drive Systems* (disponible en anglais uniquement)

NEMA MG1, *Motors and Generators* (disponible en anglais uniquement)

NEMA MG10, *Energy Management Guide For Selection and Use of Fixed Frequency Medium AC Squirrel-Cage Polyphase Induction Motors* (disponible en anglais uniquement)

² En préparation.

NEMA MG11, *Energy Management Guide For Selection and Use of Single-Phase Motors* (disponible en anglais uniquement)

IEEE 112-1996, IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators

DE ALMEIDA, ANIBAL, et al. *Energy-using Products Directive*, Preparatory Studies, Lot 11: Motors, Coimbra Portugal, February 2008 (disponible en anglais uniquement)

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

3, rue de Varembé
PO Box 131
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

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