

SPÉCIFICATION TECHNIQUE

**CEI
IEC**

TECHNICAL SPECIFICATION

TS 60034-17

Troisième édition
Third edition
2002-03

Machines électriques tournantes –

Partie 17:

Moteurs à induction à cage alimentés par convertisseurs – Guide d'application

Rotating electrical machines –

Part 17:

Cage induction motors when fed from converters – Application guide



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC/TS 60034-17:2002

Numérotation des publications

Depuis le 1er janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000. Ainsi, la CEI 34-1 devient la CEI 60034-1.

Editions consolidées

Les versions consolidées de certaines publications de la CEI incorporant les amendements sont disponibles. Par exemple, les numéros d'édition 1.0, 1.1 et 1.2 indiquent respectivement la publication de base, la publication de base incorporant l'amendement 1, et la publication de base incorporant les amendements 1 et 2.

Informations supplémentaires sur les publications de la CEI

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu par la CEI afin qu'il reflète l'état actuel de la technique. Des renseignements relatifs à cette publication, y compris sa validité, sont disponibles dans le Catalogue des publications de la CEI (voir ci-dessous) en plus des nouvelles éditions, amendements et corrigenda. Des informations sur les sujets à l'étude et l'avancement des travaux entrepris par le comité d'études qui a élaboré cette publication, ainsi que la liste des publications parues, sont également disponibles par l'intermédiaire de:

- Site web de la CEI (www.iec.ch)
- Catalogue des publications de la CEI

Le catalogue en ligne sur le site web de la CEI (http://www.iec.ch/searchpub/cur_fut.htm) vous permet de faire des recherches en utilisant de nombreux critères, comprenant des recherches textuelles, par comité d'études ou date de publication. Des informations en ligne sont également disponibles sur les nouvelles publications, les publications remplacées ou retirées, ainsi que sur les corrigenda.

- IEC Just Published

Ce résumé des dernières publications parues (http://www.iec.ch/online_news/justpub/jp_entry.htm) est aussi disponible par courrier électronique. Veuillez prendre contact avec le Service client (voir ci-dessous) pour plus d'informations.

- Service clients

Si vous avez des questions au sujet de cette publication ou avez besoin de renseignements supplémentaires, prenez contact avec le Service clients:

Email: custserv@iec.ch
Tél: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00

Publication numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series. For example, IEC 34-1 is now referred to as IEC 60034-1.

Consolidated editions

The IEC is now publishing consolidated versions of its publications. For example, edition numbers 1.0, 1.1 and 1.2 refer, respectively, to the base publication, the base publication incorporating amendment 1 and the base publication incorporating amendments 1 and 2.

Further information on IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC, thus ensuring that the content reflects current technology. Information relating to this publication, including its validity, is available in the IEC Catalogue of publications (see below) in addition to new editions, amendments and corrigenda. Information on the subjects under consideration and work in progress undertaken by the technical committee which has prepared this publication, as well as the list of publications issued, is also available from the following:

- IEC Web Site (www.iec.ch)
- Catalogue of IEC publications

The on-line catalogue on the IEC web site (http://www.iec.ch/searchpub/cur_fut.htm) enables you to search by a variety of criteria including text searches, technical committees and date of publication. On-line information is also available on recently issued publications, withdrawn and replaced publications, as well as corrigenda.

- IEC Just Published

This summary of recently issued publications (http://www.iec.ch/online_news/justpub/jp_entry.htm) is also available by email. Please contact the Customer Service Centre (see below) for further information.

- Customer Service Centre

If you have any questions regarding this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre:

Email: custserv@iec.ch
Tel: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00

SPÉCIFICATION TECHNIQUE

**CEI
IEC**

TECHNICAL SPECIFICATION

TS 60034-17

Troisième édition
Third edition
2002-03

Machines électriques tournantes –

Partie 17:

Moteurs à induction à cage alimentés par convertisseurs – Guide d'application

Rotating electrical machines –

Part 17:

Cage induction motors when fed from converters – Application guide

© IEC 2002 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

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 the publisher.

International Electrotechnical Commission, 3, rue de Varembé, PO Box 131, CH-1211 Geneva 20, Switzerland
Telephone: +41 22 919 02 11 Telefax: +41 22 919 03 00 E-mail: inmail@iec.ch Web: www.iec.ch



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

Q

Pour prix, voir catalogue en vigueur
For price, see current catalogue

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	4
INTRODUCTION.....	8
1 Domaine d'application.....	10
2 Références normatives	10
3 Caractéristiques du moteur	10
4 Spectre de fréquence de la tension et/ou des courants.....	12
5 Pertes supplémentaires	14
6 Déclassement du couple pendant le fonctionnement du convertisseur	16
7 Couples oscillatoires.....	18
8 Bruit d'origine magnétique	18
9 Durée de vie du système d'isolation	20
10 Courants parasites de paliers.....	20
11 Vitesse maximale de sécurité en fonctionnement	24
12 Correction du facteur de puissance	24
Figure 1 – Forme d'onde du courant de phase i_{phase} avec couplage en triangle pour une alimentation par convertisseur de source de courant (exemple théorique)	26
Figure 2 – Forme d'onde de la tension de phase u_{phase} avec couplage en triangle pour une alimentation par convertisseur de tension avec fréquence d'impulsion $f_p = 15 \times f_1$ (exemple)	26
Figure 3 – Influence de l'alimentation par convertisseur sur les pertes d'un moteur à induction à cage (désignation 315 M, conception N) en fonctionnement à couple et vitesse assignés.....	28
Figure 4 – Tension fondamentale U_1 en fonction de la fréquence de fonctionnement f_1 (voir l'article 6)	30
Figure 5 – Facteur de déclassement du couple d'un moteur à induction à cage de conception N, IC 0141 (refroidissement par autocirculation), avec alimentation par convertisseur de courant, en fonction de la fréquence de fonctionnement f_1 (exemple).....	30
Figure 6 – Courbe limite de tension d'impulsion admissible $\hat{U}_{LL}$ (incluant la réflexion et l'amortissement de la tension) entre bornes du moteur en fonction du temps de montée t_a	32
Figure 7 – Définition du temps de montée t_a de la tension aux bornes du moteur	32
Figure 8 – Flux en anneau y compris la tension d'arbre et le courant i_{circ} circulant résultant	34
Figure 9 – Modèle de circuit en mode commun et tension de palier u_{brg}	34

CONTENTS

FOREWORD.....	5
INTRODUCTION.....	9
1 Scope.....	11
2 Normative references.....	11
3 Characteristics of the motor.....	11
4 Frequency spectrum of voltage and/or currents.....	13
5 Additional losses.....	15
6 Torque derating during converter operation.....	17
7 Oscillating torques.....	19
8 Magnetically excited noise.....	19
9 Service life of the insulation system.....	21
10 Bearing currents.....	21
11 Maximum safe operating speed.....	25
12 Power factor correction.....	25
Figure 1 – Waveform of phase current i_{phase} in delta connection for current source converter supply (idealized example).....	27
Figure 2 – Waveform of phase voltage u_{phase} in delta connection for voltage source converter supply with pulse frequency $f_p = 15 \times f_1$ (example).....	27
Figure 3 – Influence of converter supply on the losses of a cage induction motor (frame size 315 M, design N) with rated values of torque and speed.....	29
Figure 4 – Fundamental voltage U_1 as a function of operating frequency f_1 (see clause 6).....	31
Figure 5 – Torque derating factor for cage induction motors of design N, IC 0141 (self-circulating cooling) for current source converter supply as a function of operating frequency f_1 (example).....	31
Figure 6 – Limiting curve of admissible impulse voltage $\hat{U}_{LL}$ (including voltage reflection and damping) at the motor terminals as a function of the rise time t_a	33
Figure 7 – Definition of the rise time t_a of the voltage at the motor terminals.....	33
Figure 8 – Ring flux including shaft voltage and resulting circulating current i_{circ}	35
Figure 9 – Common mode circuit model and bearing voltage u_{brg}	35

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES –

Partie 17: Moteurs à induction à cage alimentés par convertisseurs – Guide d'application

AVANT- PROPOS

- 1) La CEI (Commission Electrotechnique Internationale) 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. 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 intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les documents produits se présentent sous la forme de recommandations internationales. Ils sont publiés comme normes, spécifications techniques, rapports techniques ou guides et agréés comme tels par les Comités nationaux.
- 4) Dans le but d'encourager l'unification internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent à appliquer de façon transparente, dans toute la mesure possible, les normes internationales de la CEI dans leurs normes nationales et régionales. Toute divergence entre la norme de la CEI et la norme nationale ou régionale correspondante doit être indiquée en termes clairs dans cette dernière.
- 5) La CEI n'a fixé aucune procédure concernant le marquage comme indication d'approbation et sa responsabilité n'est pas engagée quand un matériel est déclaré conforme à l'une de ses normes.
- 6) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente spécification technique 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 d'établir 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 est encore en évolution d'un point de vue technique ou, pour toute autre raison, lorsqu'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 60034-17, qui est une spécification technique, a été établie par le comité 2 de la CEI: Machines tournantes.

Cette troisième édition annule et remplace la seconde édition parue en 1998 dont elle constitue une révision technique.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

ROTATING ELECTRICAL MACHINES –

**Part 17: Cage induction motors when fed from converters –
Application guide**

FOREWORD

- 1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the 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, the IEC publishes International Standards. 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. The 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 the 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 National Committees.
- 3) The documents produced have the form of recommendations for international use and are published in the form of standards, technical specifications, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.
- 5) The IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with one of its standards.
- 6) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this technical specification may be the subject of patent rights. The 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 60034-17, which is a technical specification, has been prepared by IEC technical committee 2: Rotating machinery.

This third edition cancels and replaces the second edition published in 1998 and constitutes a technical revision.

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

Projet d'enquête	Rapport de vote
2/1117A/CDV	2/1157A/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 3.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant 2005. A cette date, la publication sera

- reconduite;
- supprimée;
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

Le contenu des corrigenda de juin 2002 et avril 2003 a été pris en considération dans cet exemplaire.

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC TS 60034-17:2002

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

Enquiry draft	Report on voting
2/1117A/CDV	2/1157A/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 3.

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until 2005. At this date, the publication will be

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

The contents of the corrigenda of June 2002 and April 2003 have been included in this copy.

INTRODUCTION

Les caractéristiques de performance et les données de fonctionnement des entraînements par moteurs à induction à cage alimentés par convertisseurs dépendent du système complet, comprenant le réseau d'alimentation, le convertisseur, le moteur à induction, la transmission mécanique et l'équipement de commande. Chacun de ces composants existe dans de nombreuses variantes techniques. Toutes les valeurs citées dans cette spécification technique sont donc données uniquement à titre indicatif.

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

Dans la pratique courante, les entraînements sont de plus en plus fréquemment constitués de composants produits par différents constructeurs. L'objet de la présente spécification technique est d'expliquer et de quantifier, autant que possible, les critères de sélection des composants et leur influence sur les caractéristiques de performance de l'entraînement.

INTRODUCTION

The performance characteristics and operating data for drives with converter-fed cage induction motors are influenced by the complete system, comprising supply system, converter, induction motor, mechanical shafting and control equipment. Each of these components exists in numerous technical types. Any values quoted in this technical specification are thus indicative only.

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

To an increasing extent it is practice that drives consist of components produced by different manufacturers. The object of this technical specification is to explain and quantify, as far as possible, the criteria for the selection of components and their influence on the performance characteristics of the drive.

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC TS 60034-17:2002

Without watermark

MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES –

Partie 17: Moteurs à induction à cage alimentés par convertisseurs – Guide d'application

1 Domaine d'application

La présente spécification technique traite du fonctionnement en régime établi des moteurs à induction à cage, compris dans le domaine d'application de la CEI 60034-12, lorsqu'ils sont alimentés par convertisseurs. Elle couvre le fonctionnement dans toute la plage de réglage de vitesse, mais ne traite ni du démarrage, ni des phénomènes transitoires.

Seuls les convertisseurs de type indirect sont pris en considération. Ce type comprend les convertisseurs à courant continu imposé dans le circuit intermédiaire (convertisseurs de source de courant) et les convertisseurs à tension de courant continu imposée (convertisseurs de source de tension) soit du type pleine onde, soit du type à commande par impulsions, sans restriction sur le nombre d'impulsions, leur largeur ou leur fréquence. Pour les besoins de la présente spécification technique, un convertisseur peut comporter tout type d'interrupteur électronique, comme par exemple des transistors (bipolaires ou MOSFET), des IGBT, des thyristors, des thyristors GTO, etc., avec des électroniques de commande analogiques ou numériques.

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 60034-1:1999, *Machines électriques tournantes – Partie 1: Caractéristiques assignées et caractéristiques de fonctionnement*

CEI 60034-6:1991, *Machines électriques tournantes – Partie 6: Méthodes de refroidissement (Code IC)*

CEI 60034-12:1980, *Machines électriques tournantes – Douzième partie: Caractéristiques de démarrage des moteurs triphasés à induction à cage à une seule vitesse pour des tensions d'alimentation inférieures ou égales à 660 V*

Amendement 1 (1992)

Amendement 2 (1995)

CEI 60072 (toutes les parties), *Dimensions et séries de puissances des machines électriques tournantes*

3 Caractéristique du moteur

Le courant de sortie d'un convertisseur de source de courant traverse l'enroulement stator du moteur pendant la période de commutation. C'est pourquoi une connaissance du circuit équivalent du moteur est nécessaire à la conception du circuit de commutation.

Dans le cas de convertisseurs de source de tension, une connaissance du circuit équivalent du moteur n'est pas normalement nécessaire à la conception du circuit de commutation, mais les impédances harmoniques du moteur influencent notablement les pertes causées par les harmoniques.

ROTATING ELECTRICAL MACHINES –

Part 17: Cage induction motors when fed from converters – Application guide

1 Scope

This technical specification deals with the steady-state operation of cage induction motors within the scope of IEC 60034-12, when fed from converters. It covers the operation over the whole speed setting range, but does not deal with starting or transient phenomena.

Only indirect type converters are dealt with. This type comprises converters with impressed direct current in the intermediate circuit (current source converters) and converters with impressed d.c. voltage (voltage source converters), either of the block type or the pulse controlled type, without restriction on pulse number, pulse width or pulse frequency. For the purpose of this technical specification, a converter may include any type of electronic switching device, for example transistors (bipolar or MOSfet), IGBTs, thyristors, GTO-thyristors, etc. with analog or digital control electronics.

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 60034-1:1999, *Rotating electrical machines – Part 1: Rating and performance*

IEC 60034-6:1991, *Rotating electrical machines – Part 6: Methods of cooling (IC Code)*

IEC 60034-12:1980, *Rotating electrical machines – Part 12: Starting performance of single-speed three-phase cage induction motors for voltages up to and including 660 V*

Amendment 1 (1992)

Amendment 2 (1995)

IEC 60072 (all parts), *Dimensions and output series for rotating electrical machines*

3 Characteristics of the motor

The output current of a current source converter passes through the stator winding of the motor during the commutating period. Therefore, a knowledge of the motor equivalent circuit is important for the design of the commutating circuits.

In the case of voltage source converters, a knowledge of the motor equivalent circuit is not normally important for the design of the commutating circuit, but the harmonic impedances of the motor greatly influence the losses caused by harmonics.

Les conditions ci-dessus sont importantes pour l'aptitude de l'entraînement au fonctionnement de base. Si des détails sont exigés sur les couples additionnels (en particulier les couples oscillatoires) et sur les pertes supplémentaires qui se produisent lors du fonctionnement du convertisseur, dans ce cas, cela nécessitera une connaissance des paramètres du circuit équivalent du moteur dans l'étendue du spectre harmonique.

Un circuit équivalent du moteur, valable de façon générale, ne peut être spécifié en raison des variantes existantes de conception des moteurs à induction à cage de conception N (par exemple utilisation de rotors à barres en cuivre à encoches profondes et de rotors à double-cage en aluminium) et en raison de la large bande de fréquences des harmoniques les plus importants (largeur de bande de 0 à 30 kHz). En règle générale, il n'est pas permis, pour le calcul des couples et des pertes dues aux harmoniques, d'utiliser les grandeurs à partir du circuit équivalent en fonctionnement en régime établi à la fréquence du réseau (par exemple avec les inductances de fuite en fonctionnement normal). Le constructeur du moteur peut fournir les valeurs appropriées pour le circuit équivalent uniquement si le spectre de fréquence des courants et/ou des tensions produits par le convertisseur est connu.

4 Spectre de fréquence de la tension et/ou des courants

En ce qui concerne le déclassement nécessaire du couple et les couples oscillatoires excités par des harmoniques, il est important de connaître le résidu harmonique relatif des tensions et/ou des courants du moteur comparé à celui qui se produit lors d'un fonctionnement sous une tension d'alimentation sinusoïdale.

La figure 1 montre la forme d'onde caractéristique du courant de phase d'un moteur dans le cas d'un entraînement à convertisseur de source de courant. Les harmoniques créés sont d'ordre $n = 5; 7; 11; 13...$ Le résidu harmonique relatif dépend principalement des durées de commutation qui peuvent différer dans divers entraînements.

La figure 2 montre la forme d'onde caractéristique de la tension entre bornes d'un moteur en fonctionnement avec une séquence synchronisée d'impulsions, cette onde présentant des harmoniques d'ordre $n = 5; 7; 11; 13...$

Dans le cas des convertisseurs de tension, diverses formes d'impulsions sont utilisées (et peuvent être modifiées dans la plage de réglage de la fréquence). Il n'est donc pas possible d'établir une quelconque règle générale sur les effets des harmoniques. Pour des règles précises, il est nécessaire de connaître le résidu harmonique de la tension de sortie du convertisseur et les répercussions sur le moteur doivent être étudiées.

Des séquences asynchrones d'impulsions, souvent utilisées, produisent la superposition d'oscillations de fréquences:

$$f = n \times f_p \pm \Delta n \times f_1$$

où $n = 0, 1, 2, 3, ...$ et $\Delta n = 1, 2, 3, ...$ sont respectivement des multiplicateurs de la fréquence d'impulsion f_p et de la fréquence fondamentale f_1 . Il existe aussi des principes de commande où aucune fréquence d'impulsion définie n'est utilisée.

Pour les convertisseurs à commande par impulsions, le résidu harmonique à basses fréquences peut être maintenu bas, tandis que les harmoniques prépondérants (qui sont proches de la fréquence d'impulsion) apparaissent à des valeurs de fréquence relativement hautes, sans grande conséquence en raison des inductances d'enroulement du moteur.

En 6.2.1 de la CEI 60034-1, l'immunité en interférence des moteurs à induction à cage est exprimée au moyen d'une seule valeur numérique, appelée facteur harmonique de tension:

The above conditions are relevant for the basic operation capability of the drive. If details are required of the additional torques (in particular oscillating torques) and of the additional losses, which occur during converter operation, then a knowledge of the equivalent circuit parameters of the motor covering the harmonic spectrum will be necessary.

Due to the existing design variants of cage induction motors with design N (e.g. copper deep-bar rotors and aluminium double-cage rotors are used) and due to the wide frequency range of the most important harmonics (band width from 0 up to 30 kHz), a generally valid motor equivalent circuit cannot be specified. As a rule it is not admissible to use the quantities from the equivalent circuit for steady-state operation at system frequency (e.g. with leakage inductances for normal running) in order to calculate torques and losses due to harmonics. The motor manufacturer may provide appropriate values of the equivalent circuit only if the frequency spectrum of currents and/or voltages generated by the converter is known.

4 Frequency spectrum of voltage and/or currents

With respect to the necessary torque derating and to the oscillating torques excited by harmonics, it is important to know the relative harmonic content of motor voltages and/or currents compared with those during operation on a sinusoidal supply voltage.

Figure 1 shows the typical waveform of the motor phase current in the case of a current source converter drive. The produced harmonics are of the order $n = 5; 7; 11; 13...$. The relative harmonic content depends mainly on the commutating time interval which may differ in different drives.

Figure 2 shows the typical waveform of the motor line-to-line voltage for operation with a synchronised pulse pattern where the harmonics are of the order $n = 5; 7; 11; 13...$

In the case of voltage source converters a variety of pulse patterns is in use (which may be varied within the frequency setting range). Hence it is not possible to make global statements on the effects of the harmonics. For definite statements the harmonic content of the converter output voltage has to be known and its consequences on the motor shall be studied.

Asynchronous pulse patterns, as applied in many cases, produce superimposed oscillations of the frequencies:

$$f = n \times f_p \pm \Delta n \times f_1$$

where $n = 0, 1, 2, 3, ...$ and $\Delta n = 1, 2, 3, ...$ are multiplying factors of the pulse frequency f_p and of the fundamental frequency f_1 , respectively. There are also control schemes where no definite pulse frequency is used.

With pulse controlled converters, the content of harmonics with low frequencies can be kept low, while the dominant harmonics (which are near the pulse frequency) will occur at relatively large frequency values, not having much effect due to the motor winding inductances.

In 6.2.1 of IEC 60034-1 the interference immunity of cage induction motors is expressed by one single numerical value, called the harmonic voltage factor:

$$HVF = \sqrt{\sum \left(\frac{u_n^2}{n} \right)}$$

Dans cette formule, les harmoniques sont pondérés principalement en rapport avec l'échauffement de l'enroulement. Malheureusement, ce facteur n'est pas utile dans le cas d'alimentation par convertisseur. Les moteurs couverts par la CEI 60034-1 présentent de telles différences de conception des parties actives que le facteur de déclassement doit être déterminé pour chaque moteur par le constructeur du moteur.

5 Pertes supplémentaires

Les harmoniques de tension et courant d'un moteur à induction à cage alimenté par convertisseur provoquent des pertes supplémentaires fer et Joule dans le stator et le rotor. Les pertes fer supplémentaires dépendent des amplitudes et surtout des fréquences des harmoniques des tensions de phase. Des pertes fer supplémentaires indépendantes de la charge sont importantes dans des moteurs alimentés par convertisseurs de source de tension. Des pertes fer supplémentaires indépendantes de la charge sont pratiquement négligeables dans des moteurs alimentés par convertisseurs de source de courant.

Un autre type de pertes fer, dites pertes par commutation, existe lors du fonctionnement avec convertisseurs de source de courant. Le rapide changement des flux de fuite lors de la période de commutation génère des courants de Foucault dans les dents du stator et du rotor. Il n'y a pas de pertes par commutation dans le cas d'un fonctionnement à partir de convertisseurs de source de tension car les courants de commutation ne circulent pas dans les enroulements du moteur.

Les pertes supplémentaires d'enroulement dans le rotor dépendent de la conception du rotor (géométrie des encoches). Les rotors avec des déplacements de courant prononcés sont particulièrement sensibles à ces pertes. Dans le cas des convertisseurs de source de tension, la réactance de fuite est l'élément de conception le plus important, puisqu'elle limite les courants harmoniques qui sont à l'origine des pertes. Les pertes supplémentaires du rotor ne dépendent pas de la charge en cas de fonctionnement à partir d'un convertisseur de source de tension. A l'opposé, en cas de convertisseur de source de courant, elles dépendent de la charge.

Il n'existe pas de méthode simple pour calculer les pertes supplémentaires et aucune règle générale ne peut être établie au sujet de leur valeur. Leur dépendance par rapport aux différentes grandeurs physiques est très complexe. De même, il existe une grande variété à la fois de convertisseurs (par exemple convertisseurs de source de tension et convertisseurs de courant avec différentes fréquences et formes d'impulsion) et de moteurs (par exemple nature de l'enroulement, inclinaison, géométrie des encoches).

Les colonnes de la figure 3 montrent, à titre d'exemple, l'allure des pertes calculées d'un moteur spécifique (désignation 315 M, voir la CEI 60072; conception N, voir la CEI 60034-12) alimenté par différents convertisseurs présentant différents résidus harmoniques ainsi que par une alimentation sinusoïdale. L'exemple illustre l'importance relative des différents types de pertes pour les systèmes de convertisseurs les plus largement utilisés actuellement. Cette comparaison ne peut pas être étendue à d'autres moteurs à induction à cage alimentés par convertisseurs, ni à d'autres types de convertisseurs (avec des schémas de modulation et des fréquences d'impulsions différents). Pour faciliter la comparaison dans la figure 3, dans le cas de fonctionnement avec convertisseur, on a pris l'hypothèse de fondamentaux des tensions et courants égaux à ceux aux conditions assignées.

$$\text{HVF} = \sqrt{\sum \left(\frac{u_n^2}{n} \right)}$$

In this equation, the harmonics are weighed mainly with respect to the temperature rise of the winding. Unfortunately this factor offers no advantage in relation to the converter supply. Motors within the scope of IEC 60034-1 differ to such an extent in the design of their active parts that individual derating factors have to be determined by the motor manufacturer.

5 Additional losses

Harmonics of voltage and current in a cage induction motor supplied from a converter cause additional iron and winding losses in the stator and the rotor. The additional iron losses depend on the amplitudes and especially on the frequencies of the phase voltage harmonics. Additional load-independent iron losses are important in motors fed by voltage source converters. Additional load-independent iron losses are nearly negligible in motors fed by current source converters.

Another kind of iron losses, the so-called commutation losses, exist for operation from current source converters. The fast change of the leakage fluxes during the commutation interval generates eddy currents in the teeth of stator and rotor. There are no commutation losses in case of operation from voltage source converters because the commutation currents do not flow through the motor windings.

The additional winding losses in the rotor depend on the rotor design (slot geometry). Rotors with pronounced current displacement are especially sensitive to these losses. In the case of voltage source converters, the leakage reactance is the most important design feature since it limits the harmonic currents which are responsible for the losses. The additional losses do not depend on the load when supplied from a voltage source converter. On the other hand, with a current source converter they are load-dependent.

There is no simple method to calculate the additional losses, and no general statement can be made about their value. Their dependence upon the different physical quantities is very complex. Also there is a great variety both of converters (e.g. I- and voltage source converters with different pulse frequencies and pulse patterns) and of motors (e.g. kind of winding, skewing, slot geometry).

The columns in figure 3 show, as an example, the calculated loss composition of a specific motor (frame size 315 M, see IEC 60072; design N, see IEC 60034-12) when supplied both from different converters with different harmonic content and from a sinusoidal supply. The example illustrates the relative importance of the different types of losses for the converter systems most widely used today. The comparison cannot be transferred to other converter-fed cage induction motors and other types of converters (with different modulation schemes and pulse frequencies). To facilitate comparison in figure 3, the fundamental voltages and currents during converter operation are assumed to be the same as under rated conditions.

6 Déclassement du couple pendant le fonctionnement du convertisseur

Quand le moteur est alimenté par un convertisseur à fréquence assignée, le couple disponible est généralement inférieur au couple assigné dans le cas d'une tension sinusoïdale. La réduction dépend à la fois de l'échauffement dû aux pertes supplémentaires et du rapport entre la tension de sortie du convertisseur à la fréquence assignée du moteur et la tension assignée du moteur.

La courbe en trait plein de la figure 4 est relative à un convertisseur qui donne le même flux fondamental dans le moteur qu'une alimentation sinusoïdale. Le fabricant du moteur peut déterminer l'échauffement pour ce point de fonctionnement si le spectre harmonique du convertisseur est connu. Cet échauffement dépend de la conception individuelle du moteur et du mode de refroidissement (IC 01 ou IC 0141; voir la CEI 60034-6). Lorsqu'on détermine le facteur de déclassement, la réserve thermique d'un moteur particulier est importante. En prenant en compte tous ces éléments, le facteur de déclassement à la fréquence assignée se situe généralement entre 0,8 et 1,0.

Fréquemment, dans la pratique, les caractéristiques assignées du convertisseur n'impliquent pas que le flux fondamental à fréquence assignée soit égal à celui obtenu sous une alimentation sinusoïdale. Cela conduit à une modification supplémentaire du couple dont la valeur dépend des paramètres individuels.

Le fait d'être à l'intérieur de la plage de réglage en dessous de la vitesse synchrone à la fréquence assignée du moteur, en appliquant une loi $U_1/f_1 = \text{constante}$, conduit à un couple maximal constant si la résistance de l'enroulement du stator est négligeable devant la réactance du moteur. Pour compenser l'effet de la résistance du stator du moteur, certains convertisseurs sont conçus pour présenter une caractéristique conforme à la ligne mixte de la figure 4. A basse vitesse, les couples obtenus sont supérieurs à ceux obtenus en l'absence d'une telle compensation.

Au-dessus du point de fonctionnement 1,0 p.u. de tension et fréquence de la figure 4, la tension de sortie du convertisseur est généralement constante quand la fréquence augmente (plage de réduction du flux). Si ceci est aussi le cas à l'intérieur de la plage de fonctionnement en fréquence, alors le facteur de déclassement sera modifié par la diminution rapide de la capacité de couple, de manière semblable à la caractéristique de la figure 5 au-dessus de $f_1/f_N = 1,0$.

La figure 5 montre un exemple de courbe de déclassement pour un moteur typique alimenté par un convertisseur de source de courant. La courbe avec entraînement par convertisseur de source de tension a une forme similaire. Une telle courbe peut être fournie par le constructeur du moteur si le spectre harmonique et les caractéristiques tension-fréquence du convertisseur sont connues. En raison des modes particuliers de refroidissement (IC 01 ou IC 411) et de ventilation (refroidissement par autocirculation ou refroidissement indépendant), il n'est pas possible de fournir une courbe qui s'applique à tous les cas. En général, cependant, les moteurs alimentés à partir de convertisseurs à commande par impulsions (fréquence d'impulsion dans la plage des kHz) exigent de plus faibles déclassements de couple que ceux alimentés à partir de convertisseurs pleine onde. Normalement, le déclassement est réduit lorsque la fréquence d'impulsion augmente.

6 Torque derating during converter operation

When the motor is supplied from a converter at rated frequency the available torque is usually less than the rated torque on a sinusoidal voltage. The reduction depends both on the temperature rise due to the additional losses and the ratio of the converter output voltage at the motor rated frequency to the rated voltage of the motor.

The full-line curve in figure 4 refers to a converter producing the same fundamental motor flux as a sinusoidal supply. The motor manufacturer can determine the temperature rise for this operating point if the harmonic spectrum of the converter is known. The temperature rise depends on the individual motor design and the type of cooling (IC 01 or IC 0141, see IEC 60034-6). When determining the derating factor, the thermal reserve of the particular motor is important. Taking all these influences into account, the derating factor at rated frequency typically ranges from 0,8 to 1,0.

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

Within the speed setting range below the synchronous speed at motor rated frequency, applying a $U_1/f_1 = \text{constant}$ law leads to a constant pull-out torque if the stator winding resistance is negligible in comparison with the motor reactances. To compensate for the effect of the motor stator resistance, some converters are designed to have a characteristic in accordance with the dash line in figure 4. At low speeds higher torques are generated than in the absence of such a compensation.

Above the 1,0 p.u. operation point of voltage and frequency in figure 4, the converter output voltage is generally constant as the frequency increases (field weakening range). In the event of this occurring within the frequency operating range then the derating factor will change with a rapid reduction in torque capability similar to the characteristic shown in figure 5 above $f_1/f_N = 1,0$.

Figure 5 shows an example of a derating curve for a typical motor supplied by a current source converter. The curve of a voltage source converter drive is of similar shape. Such a curve can be declared by the motor manufacturer, if the harmonic spectrum and the voltage-frequency characteristics of the converter are known. With respect to the different cooling (IC 01 or IC 411) and ventilation methods (self-circulation cooling or independent cooling) it is not possible to produce a curve which applies to all cases. In general, however, motors supplied from pulse-controlled converters (pulse frequency in the kHz range) require smaller torque reductions than those supplied from block converters. The derating is normally reduced as the pulse frequency increases.

7 Couples oscillatoires

Les couples asynchrones (permanents) générés par les harmoniques ont peu d'effet sur le fonctionnement de l'entraînement. Cependant, ceci n'est pas applicable aux couples oscillatoires qui produisent des vibrations de torsion dans le système mécanique.

Dans le cas de moteurs à induction triphasés alimentés par convertisseurs de source de courant hexaphasés, les couples oscillatoires à 6 et 12 fois la fréquence fondamentale (f_1) sont importants en pratique; leur amplitude est de l'ordre de 15 % (fréquence $6 \times f_1$) et de 5 % (fréquence $12 \times f_1$) du couple assigné. Un calcul précis des vitesses critiques de torsion peut être conseillé, particulièrement pour les entraînements dont les éléments de transmission ne sont que légèrement amortis.

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

8 Bruit d'origine magnétique

En raison des harmoniques, le mécanisme de création du bruit magnétique devient plus complexe que pour un fonctionnement avec une alimentation sinusoïdale. Un calcul préalable sûr du bruit magnétique qui se produit lors du fonctionnement du convertisseur d'un moteur à induction à cage n'est pas possible actuellement. En particulier, des résonances peuvent apparaître en certains points de la plage de vitesse.

En cas d'alimentation d'un moteur par un convertisseur de source de courant, des tonalités supplémentaires à excitation magnétique sont produites par des harmoniques de courant. L'amplitude de chaque harmonique est inversement proportionnelle à son ordre. Les fréquences des forces d'excitation de bruit sont séparées des fréquences naturelles des parties actives du stator. Ainsi, le niveau des incréments de bruit se situe dans la même gamme pendant le fonctionnement du moteur à flux constant et courants constants. L'incrément est influencé seulement dans une moindre mesure par les dispositifs de commande du convertisseur ou par la conception du moteur. Selon l'expérience, le niveau de bruit pondéré A augmente dans la plage comprise entre 1 dB et 6 dB pendant un fonctionnement à fréquence inférieure ou égale à la fréquence assignée comparé avec un fonctionnement sur une alimentation sinusoïdale à tension assignée et à fréquence assignée. La limite supérieure de l'augmentation est applicable aux moteurs avec un niveau de bruit faible pendant le fonctionnement sur une tension sinusoïdale.

En cas d'alimentation d'un moteur par un convertisseur de source de tension, des tonalités supplémentaires à excitation magnétique sont produites par des harmoniques de tension. Les fréquences sont proches de la fréquence d'impulsion du convertisseur ou de ses multiples et peuvent être proches des fréquences naturelles des parties actives du stator. Les amplitudes des forces d'excitation de bruit varient beaucoup avec la stratégie de commande du convertisseur. Lorsque la fréquence d'impulsion est fixée, il existe des impulsions brèves élevées dans le spectre. Par contraste, lorsque la séquence d'impulsions est commandée en ligne, pratiquement aucune impulsion brève n'est visible dans le spectre. De ce fait, une augmentation du niveau de bruit pondéré A varie plus largement comparé avec un fonctionnement sur une alimentation sinusoïdale à la tension assignée et à la fréquence assignée que pour les moteurs alimentés par convertisseurs de source de courant. Conformément à l'expérience, l'augmentation à flux constant est susceptible de se situer dans la plage comprise entre 1 dB et 15 dB.

7 Oscillating torques

The asynchronous (time-constant) torques generated by harmonics have little effect on the operation of the drive. However, this does not apply to the oscillating torques, which produce torsional vibrations in the mechanical system.

In the case of three-phase induction motors supplied from current source converters in a six pulse circuit the oscillating torques with 6 and 12 times the fundamental frequency (f_1) are of practical importance; their amplitudes are in the order of 15 % (frequency $6 \times f_1$) and 5 % (frequency $12 \times f_1$) of the rated torque. A careful calculation of the critical torsional speeds is advisable, particularly for drives with transmission elements which are only slightly damped.

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

8 Magnetically excited noise

Due to harmonics the excitation mechanism for magnetic noise becomes more complex than for operation on a sinusoidal supply. A reliable precalculation of magnetic noise which occurs during converter operation of cage induction motors is not possible at present. In particular, resonance may occur at some points in the speed range.

When supplying a motor by a current source converter, additional magnetically excited tones are generated by the current harmonics. The amplitude of each harmonic is inversely proportional to its order. The frequencies of the noise exciting forces are apart from the natural frequencies of the active parts of the stator. Thus the level of the noise increments is in the same range during motor operation at constant flux and constant currents. The increment is influenced only little by the control devices of the converter or the design of the motor. According to experience the A-weighted noise level increases in the range of 1 dB to 6 dB for operation up to rated frequency compared with operation on a sinusoidal supply at rated voltage and rated frequency. The upper limit of the increase is applicable to motors with a low noise level during operation on a sinusoidal voltage.

When supplying a motor by a voltage source converter, additional magnetically excited tones are generated by the voltage harmonics. The frequencies are close to the pulse frequency of the converter or multiples of it and can be close to the natural frequencies of the active parts of the stator. The amplitudes of the noise exciting forces vary much with the control strategy of the converter. When the pulse frequency is fixed there are high spikes in the spectrum. By contrast, when the pulse pattern is controlled online, practically no spikes are visible in the spectrum. Therefore the A-weighted noise level increase varies more widely compared with operation on a sinusoidal supply at rated voltage and rated frequency than for current source converter supplied motors. According to experience the increase at constant flux is likely to be in the range 1 dB to 15 dB.

9 Durée de vie du système d'isolation

Le système d'isolation du moteur est soumis à des contraintes diélectriques plus élevées que celles existant dans le cas d'une alimentation à courants et tensions sinusoïdaux. Dans le cas d'alimentation par convertisseur de source de courant, des pointes de tension se produisent dans le moteur pendant la période de commutation, soumettant l'isolation principale et l'isolation entre spires à des contraintes. Les gradients de tension qui créent des contraintes dans l'isolation entre spires, particulièrement sur les bobines d'entrées, sont importants dans le cas d'alimentation par convertisseur de source de tension.

La contrainte diélectrique de l'isolation de l'enroulement est déterminée par la tension de crête, le temps de montée et la fréquence des impulsions créées par le convertisseur, les caractéristiques et la longueur des câbles de connexion entre convertisseur et moteur, la technique de fabrication de l'enroulement et par les autres paramètres du système. En particulier, la répartition des tensions entre les différents éléments de l'enroulement et la terre est un élément fondamental pour cette évaluation.

Des moteurs à enroulements aléatoires à fils ronds émaillés supportent généralement les tensions d'impulsion de la figure 6 aux bornes sans réduction notable de la durée de vie.

La combinaison d'onduleurs à commutation rapide avec des câbles provoque des tensions de crête du fait des effets de ligne de transmission. Pour des moteurs assignés à des tensions inférieures ou égales à 500 V à courant alternatif, il convient que le système d'isolation fournisse typiquement une durée de vie satisfaisante en étant soumis à des tensions de crête, comme l'illustre la figure 6.

Pour des moteurs à tensions supérieures à 500 V à courant alternatif jusqu'à 690 V à courant alternatif, alimentés par un onduleur à commutation rapide, des filtres et/ou un système d'isolation augmentés conçus pour limiter le temps de montée et/ou les tensions de crête peuvent être exigés.

La notion de temps de montée est fondée sur la définition suivante qui prend en compte les phénomènes transitoires dans l'enroulement (voir figure 7).

La plage de tension Δu est la différence entre les valeurs instantanées de la tension immédiatement avant et après l'impulsion de tension. Cette impulsion s'achève à l'instant où la tension atteint son premier maximum. Le temps de montée t_a est défini comme l'intervalle de temps pendant lequel la tension varie de 10 % à 90 % de la plage totale de tension Δu .

Etant donné les interdépendances complexes, une conception soignée de l'entraînement complet est suggérée. Parfois, l'emploi de filtres à la sortie du convertisseur est nécessaire.

10 Courants parasites de paliers

Au cours du fonctionnement du convertisseur, des courants parasites de palier peuvent être provoqués par deux sortes de tension:

- **Tension d'arbre**
- La notion de tension d'arbre est appliquée à une tension, qui est induite dans la boucle conductrice comprenant l'arbre, les paliers, les flasques et les logements (voir la figure 8), par un flux en anneau dans la culasse stator. Des irrégularités dans la culasse (par exemple des perforations en queue d'aronde pour fixer le noyau, les gaines de ventilation, les anisotropies magnétiques des stratifications) peuvent provoquer un flux en anneau. Le flux en anneau peut être augmenté par un composant à séquence zéro des courants stator (appelés courants de mode commun), dont l'amplitude dépend du système de mise à la terre du moteur. Une crête de courant apparaît à tous instants, lorsque l'un des éléments semiconducteurs est commuté, généralement six fois par période de la fréquence d'impulsion.

9 Service life of the insulation system

The insulation system of the motor is subjected to higher dielectric stresses than in the case of supply with sinusoidal voltages and currents. In the case of supply from current source converters, peaks in the motor voltage occur during the commutation interval which stress the main and interturn insulation. The voltage gradients which stress the interturn insulation, particularly that of the line coils, are of importance in the case of supply from voltage source converters.

The dielectric stress of the winding insulation is determined by the peak voltage, rise time and frequency of the impulses produced by the converter, the characteristics and the length of the connection leads between the converter and motor, the winding construction and other system parameters. Especially the voltages between the different parts of the winding and the ground represent a significant basis of evaluation.

Motors with random wound windings with enamelled round wires will typically endure the pulse voltages of figure 6 at the terminals without significant reduction of lifetime.

The combination of fast switching inverters with cables will cause peak voltages due to transmission line effects. For motors rated at voltages less than or equal to 500 V a.c. the insulation system should typically give satisfactory life when subjected to peak voltages shown in figure 6.

For motors rated over 500 V a.c. up to 690 V a.c., supplied from a fast switching inverter, an enhanced insulation system and/or filters designed to limit the rise time and/or peak voltages may be required.

The term rise time is based on the following definition which takes into account the transient phenomena within the winding (see figure 7).

The voltage range Δu is the difference between the instantaneous values of the voltage directly before and after the voltage impulse. This impulse is finished at the instant when the voltage has reached its first maximum. The rise time t_a is defined as the interval during which the voltage changes from 10 % to 90 % of the whole voltage range Δu .

In view of the complex interrelations, a careful design of the complete drive is suggested. Sometimes the use of filters at the converter output is necessary.

10 Bearing currents

During converter operation bearing currents may be caused by two different kinds of voltages:

- **Shaft voltage**

The term shaft voltage is applied to a voltage, which is induced in the conducting loop comprising the shaft, the bearings, the end shields and the housing (see figure 8), by a ring flux in the stator yoke. Irregularities within the yoke (e.g. dovetailed punchings to clamp the core, ventilation ducts, magnetic anisotropies of the laminations) may cause a ring flux. The ring flux may be increased by a zero-sequence component of the stator currents (so-called common mode currents), the magnitude of which depends on the earthing system of the motor. A current spike appears at all instants, when one of the semiconductor elements is switched, generally six-times per period of the pulse frequency.

- **Tension de palier**

La notion de tension de palier est appliquée à une tension à couplage capacitif au jeu radial du palier (voir la figure 9). La tension de palier est provoquée à l'origine par une tension alternative entre le potentiel moyen de l'enroulement stator et le noyau stator mis à la terre (appelée tension en mode commun) qui est inhérente à l'algorithme de commande des convertisseurs PWM. La tension en mode commun est constituée en particulier de composants de trois fois la fréquence du système, de trois fois la fréquence de base aux bornes de sortie du convertisseur et de la fréquence d'impulsion. Sa valeur de crête se situe dans la plage de 50 % de la tension à courant continu dans le circuit intermédiaire du convertisseur. En fonction des capacités entre l'enroulement stator et le rotor, entre le rotor et le logement et la capacité du palier lui-même, un pourcentage spécifique de la tension en mode commun peut être mesuré au niveau du jeu radial des paliers. De ce fait, la caractéristique de temps de la tension de palier est une réplique de la tension en mode commun.

S'il est prévu de mesurer la tension d'arbre ou la tension de palier pendant le fonctionnement du convertisseur, il convient de prendre des précautions appropriées, et des câbles de mesure sous écran et une instrumentation spécifiques doivent être utilisés.

En cas de fonctionnement d'un moteur à *tension sinusoïdale*, la tension de palier est pratiquement zéro. Si la tension d'arbre ne dépasse pas approximativement 500 mV (crête), aucun dispositif de protection n'est nécessaire d'après une expérience prolongée. Des tensions d'arbre supérieures à 500 mV approximativement (crête) peuvent produire des courants circulants dans la boucle conductrice indiquée ci-dessus, ce qui peut détruire les paliers dans une période de temps relativement courte. L'isolation d'un palier, de préférence à l'extrémité sans entraînement, est suffisante pour éviter les courants circulants à travers les paliers et finalement dans les paliers du matériel entraîné. L'isolation des paliers n'est ni nécessaire ni coutumière dans le cas de moteurs dans le domaine d'application de cette spécification, lorsqu'ils fonctionnent à une tension d'alimentation sinusoïdale et qu'ils sont fabriqués selon les règles de l'art courantes.

Au cours du *fonctionnement du convertisseur de source de courant (convertisseur pleine onde)*, il n'existe aucune tension de palier. La tension d'arbre est augmentée légèrement du fait des harmoniques des tensions/courants d'alimentation. La même limite d'approximation supérieure de 500 mV (crête) que pour l'alimentation sinusoïdale est recommandée.

Pendant le *fonctionnement du convertisseur de source de tension*, la tension d'arbre et les tensions de palier existent simultanément. Des gradients élevés de la tension de palier peuvent entraîner des courants de palier capacitifs (appelés courants du/dt). De plus, des courants de décharge de courte durée (appelés courants EDM¹) se produisent si la tension de palier dépasse sa valeur de claquage. Le taux de répétition des courants EDM augmente avec les valeurs croissantes de tension de palier et de fréquence d'impulsion. Les deux sortes de courants provoqués par la tension de palier circulent le long du trajet des capacités indiquées ci-dessus, respectivement le long du système de mise à la terre du moteur, mais non à travers les deux paliers.

En fonction de la fréquence d'impulsion, du temps de montée des impulsions et des caractéristiques assignées du moteur, la tension d'arbre contient la crête de la haute fréquence dépassant éventuellement 10 V, ce qui peut provoquer la perforation de la couche de lubrification des paliers. Mais le composant de la fréquence fondamentale produit une emf. De ce fait, le spectre de fréquence des courants circulants contient surtout la fréquence fondamentale et sa 3^{ème} harmonique. La circulation de courant peut être soutenue par le composant de la fréquence fondamentale, même lorsque son amplitude est inférieure à 500 mV (crête), dans la mesure où un moteur à faible tension d'arbre à l'alimentation sinusoïdale est avantageux pour éviter les courants circulants à l'alimentation du convertisseur.

¹ EDM = Usage par décharge électrostatique.

- **Bearing voltage**

The term bearing voltage is applied to a capacitively coupled voltage at the radial clearance of the bearing (see figure 9). The bearing voltage is caused originally by an alternating voltage between the mean potential of the stator winding and the grounded stator core (so-called common mode voltage), which is inherent to the control algorithm of PWM converters. The common mode voltage consists in particular of components of three-times the system frequency, of three-times the basic frequency at the output terminals of the converter and of the pulse frequency. Its peak value is in the range of 50 % of the d.c. voltage in the intermediate circuit of the converter. Depending on the capacitances between the stator winding and the rotor, between the rotor and the housing and the capacitance of the bearing itself, a specific percentage of the common mode voltage can be measured at the radial clearance of the bearings. Thus the time characteristic of the bearing voltage is a replication of the common mode voltage.

If it is intended to measure the shaft voltage or the bearing voltage during converter operation, appropriate precautions should be taken and specific instrumentation and shielded measuring cables have to be used.

When operating a motor at *sinusoidal voltage*, the bearing voltage is practically zero. If the shaft voltage does not exceed approximately 500 mV (peak), no protective devices are necessary according to experience of long standing. Shaft voltages above approximately 500 mV (peak) may produce circulating currents in the conducting loop indicated above, which may destroy the bearings within a relatively short period of time. Insulation of one bearing, preferably at the non-drive end, is sufficient to avoid circulating currents through both bearings and eventually through bearings of the driven equipment. The insulation of bearings is neither necessary nor customary in case of motors within the scope of this specification, when operated at sinusoidal supply voltage and fabricated according to the current state of the art.

During *current source converter (block-converter) operation* no bearing voltage is existent. The shaft voltage is increased slightly caused by the harmonics of the supplying voltages/currents. The same approximate upper limit 500 mV (peak) as for sinusoidal supply is recommended.

During *voltage source converter operation* shaft voltage and bearing voltages exist simultaneously. High gradients of the bearing voltage may result in capacitive bearing currents (so-called du/dt currents). In addition short-time discharging currents (so-called EDM¹ currents) arise if the bearing voltage exceeds its breakdown value. The repetition rate of the EDM currents increases with increasing values of bearing voltage and pulse frequency. Both kinds of currents caused by bearing voltage flow along the path of the capacitances indicated above respectively along the grounding system of the motor, but not through both bearings.

Depending on the pulse frequency, the rise time of the pulses and the motor rating, the shaft voltage contains peak of high frequency, possibly in excess of 10 V which may cause the puncture of the lubrication film of the bearings. But the component of fundamental frequency produces an emf. Thus the frequency spectrum of the circulating currents predominantly contains the fundamental frequency and its 3rd harmonic. The current flow may be sustained by the component of fundamental frequency, even when its amplitude is less than 500 mV (peak), in so far as a motor with low shaft voltage at sinusoidal supply is advantageous to avoid circulating currents at converter supply.

¹ EDM = Electrostatic Discharge Machining.

Conformément aux mesures, généralement la tension de palier se situe dans la plage de 10 V à 30 V (crête). Une interdépendance entre les courants circulants et la tension de palier ne pourrait pas être reconnue.

L'expérience met en évidence les éléments suivants:

- Les moteurs dans le domaine d'application de cette spécification et avec les numéros de châssis jusqu'à et y compris 315 connaissent rarement une défaillance de palier provoquée par le fonctionnement du convertisseur. Cependant, la contrainte diélectrique sur les paliers varie largement selon le type de l'algorithme de commande du convertisseur. Cependant, lorsque l'on utilise des convertisseurs ayant une fréquence d'impulsion supérieure à 10 kHz et une tension de sortie supérieure à 400 V efficaces, il convient de prendre en considération l'utilisation de l'isolation de palier.
- Pour les machines du domaine d'application de cette spécification avec les numéros de châssis supérieurs à 315, il est recommandé:
 - d'utiliser un convertisseur avec un filtre conçu pour réduire le composant à séquence zéro des tensions de phase (appelées tensions en mode commun);
 - ou de réduire les du/dt de la tension;
 - ou encore d'isoler le ou les paliers du moteur.
- L'isolation du roulement à billes peut être obtenue au moyen du remplacement par un palier isolé de mêmes dimensions. Il est rarement nécessaire d'isoler les deux paliers du moteur. Dans un tel cas, l'examen de l'ensemble du système d'entraînement par un expert est hautement recommandé et il convient d'y inclure la machine entraînée (isolation du couplage) et le système de mise à la terre (éventuellement l'utilisation d'un balai de mise à la terre).

11 Vitesse maximale de sécurité en fonctionnement

Si l'on prévoit de faire fonctionner un moteur à des vitesses supérieures à sa vitesse assignée, la vitesse maximale de sécurité en fonctionnement est fournie en 8.5 de la CEI 60034-1. Selon la conception du moteur, le fonctionnement à des vitesses supérieures peut être admissible, mais il convient que le constructeur en vérifie la possibilité.

En cas de fonctionnement à des vitesses supérieures à la vitesse assignée, les niveaux de bruit et de vibration augmenteront. Il peut aussi être nécessaire d'affiner l'équilibrage pour un fonctionnement acceptable au-dessus de la vitesse assignée.

Le fonctionnement prolongé à des vitesses proches de la vitesse maximale de sécurité peut causer une réduction notable de la durée de vie des paliers. De plus, ceci peut affecter les joints d'arbre et/ou la périodicité de regraissage (ou la durée de vie de la graisse en cas de paliers à graissage permanent).

12 Correction du facteur de puissance

Il n'est pas recommandé d'utiliser des condensateurs de puissance en vue de la correction du facteur de puissance du côté de la charge d'une alimentation électronique connectée à un moteur à induction. L'application appropriée de tels condensateurs nécessite une analyse du moteur, de l'alimentation de puissance électronique et des caractéristiques de charge en fonction de la vitesse pour éviter la surexcitation potentielle du moteur, la résonance harmonique et la surtension du condensateur. Pour de telles applications, il convient de consulter le fabricant d'entraînements.

According to measurements, typically, the bearing voltage is in the range of 10 V to 30 V (peak). An interrelation between circulating currents and bearing voltage could not be recognised.

Experience shows:

- Motors within the scope of this specification and with frame numbers up to and including 315 seldom experience bearing failure caused by converter operation. Nevertheless the dielectric stress on the bearings varies widely with the type of the control algorithm of the converter. However when using converters having a pulse frequency greater than 10 kHz and an output voltage greater than 400 V r.m.s., consideration should be given to the use of bearing insulation.
- For machines within the scope of this specification and with frame numbers above 315, it is recommended either:
 - to use a converter with a filter designed to reduce the zero-sequence component of the phase voltages (so-called common mode voltage);
 - or to reduce the du/dt of the voltage;
 - or to insulate the motor bearing(s).
- The insulation of a ball bearing can be achieved by replacement with an insulated bearing of the same dimensions. The need to insulate both motor bearings is seldom necessary. In such a case the examination of the whole drive system by an expert is highly recommended and should include the driven machine (insulation of the coupling) and the grounding system (possibly use of an earthing brush).

11 Maximum safe operating speed

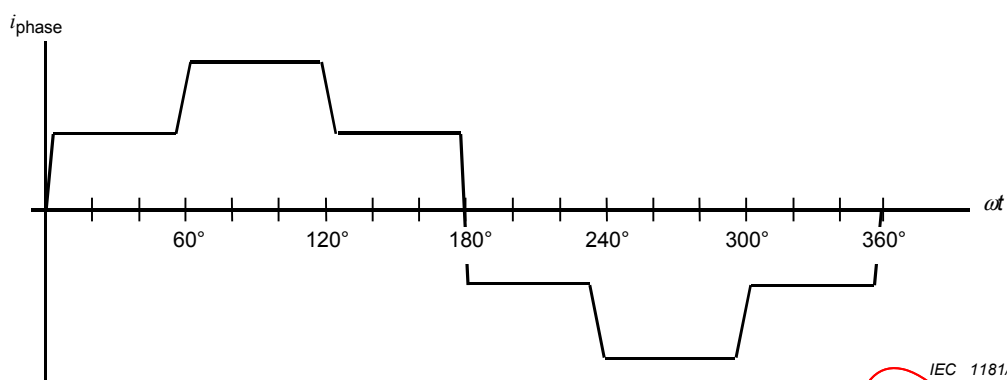
If a motor is intended to be operated at speeds above its rated speed, the maximum safe operating speed is obtained from 8.5 of IEC 60034-1. Depending on the motor design, the operation at higher speeds may be allowable, but this possibility should be verified by the manufacturer.

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

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

12 Power factor correction

The use of power capacitors for power factor correction on the load side of an electronic power supply connected to an induction motor is not recommended. The proper application of such capacitors requires an analysis of the motor, electronic power supply and load characteristics as a function of speed to avoid potential over-excitation of the motor, harmonic resonance and capacitor overvoltage. For such applications the drive manufacturer should be consulted.



IEC 1181/03

Figure 1 – Forme d'onde du courant de phase i_{phase} avec couplage en triangle pour une alimentation par convertisseur de source de courant (exemple théorique)



IEC 1182/03

Figure 2 – Forme d'onde de la tension entre bornes u_{LL} pour une alimentation par convertisseur de tension avec fréquence d'impulsion $f_p = 30 \times f_1$ (exemple)

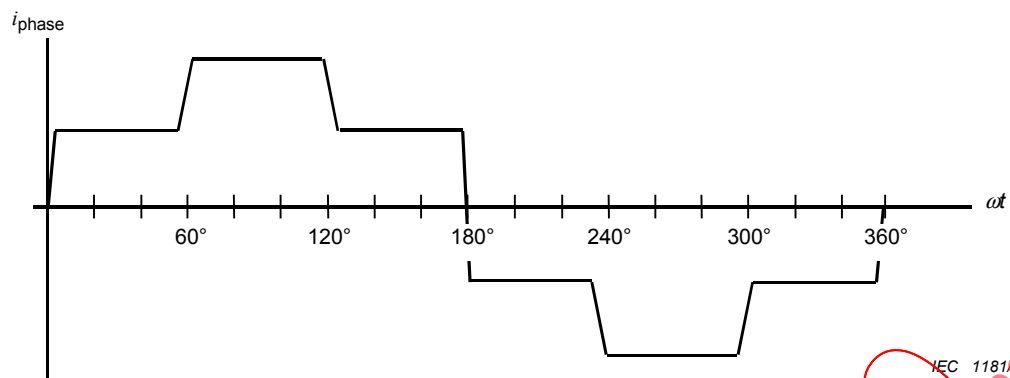


Figure 1 – Waveform of phase current i_{phase} in delta connection for current source converter supply (idealized example)

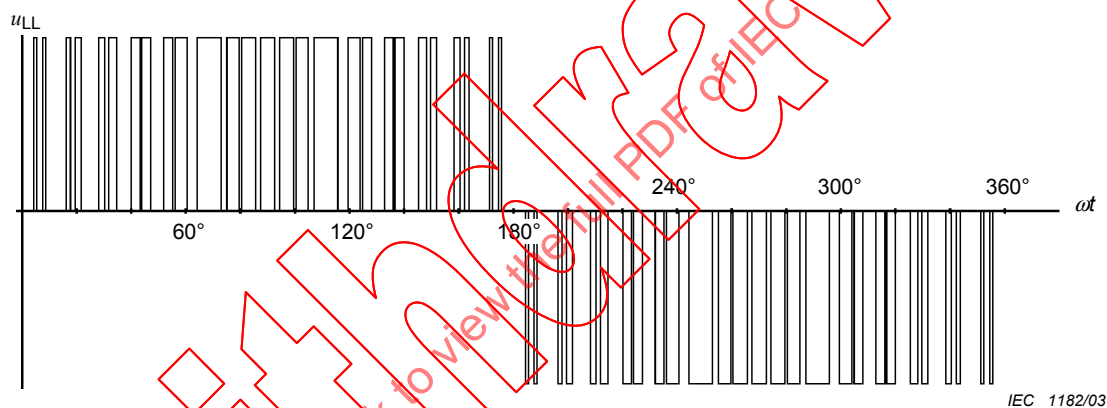


Figure 2 – Waveform of line-to-line voltage u_{LL} for voltage source converter supply with pulse frequency $f_p = 30 \times f_1$ (example)

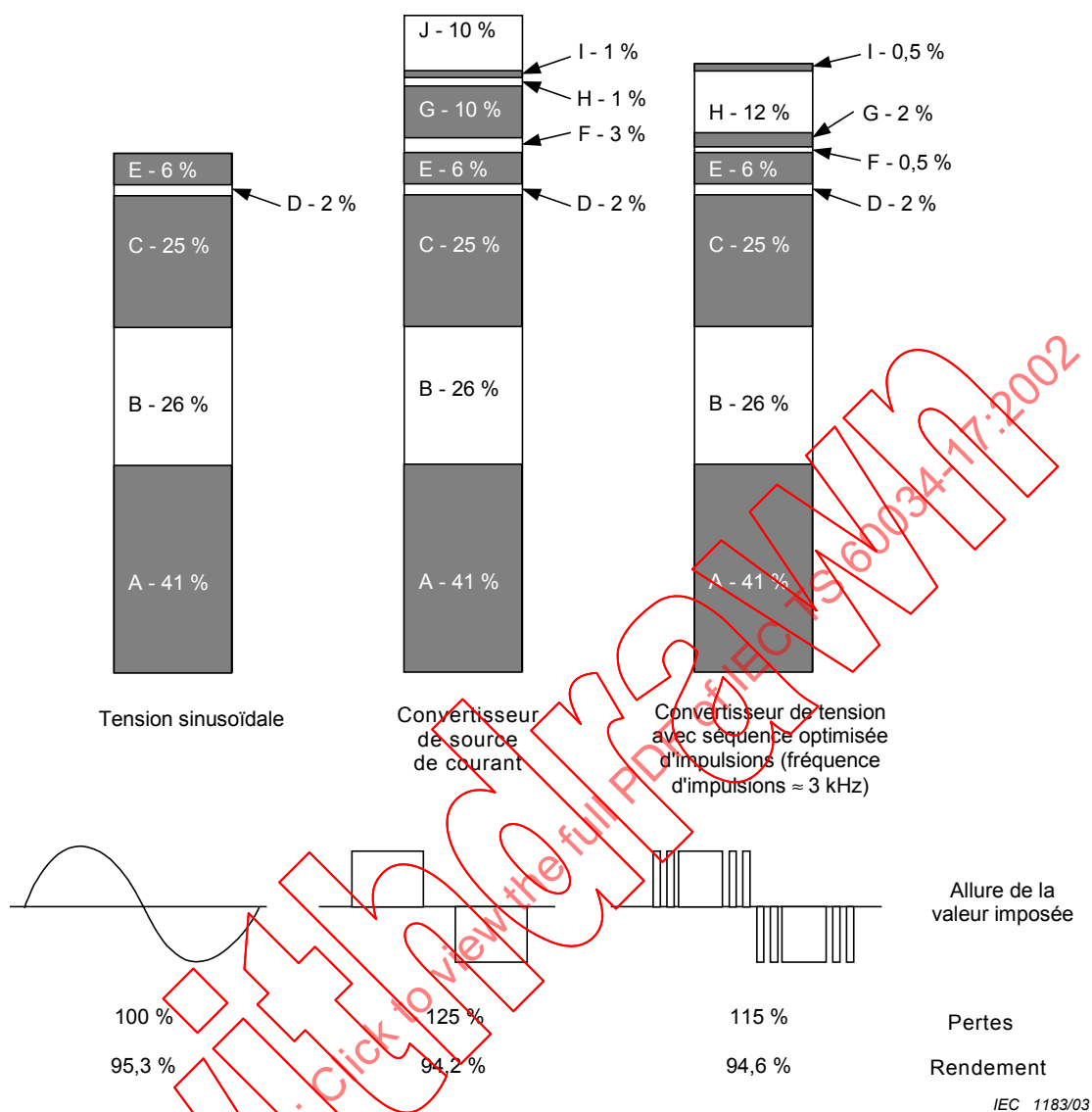


Figure 3 – Influence de l'alimentation par convertisseur sur les pertes d'un moteur à induction à cage (désignation 315 M, conception N) en fonctionnement à couple et vitesse assignés

Pertes dues aux harmoniques	Pertes dues à la fréquence fondamentale
J – Pertes par commutation	E – Pertes par friction
I – Pertes supplémentaires en charge	D – Pertes supplémentaires en charge
H – Pertes fer	C – Pertes fer
G – Pertes Joule au rotor	B – Pertes Joule au rotor
F – Pertes Joule au stator	A – Pertes Joule au stator

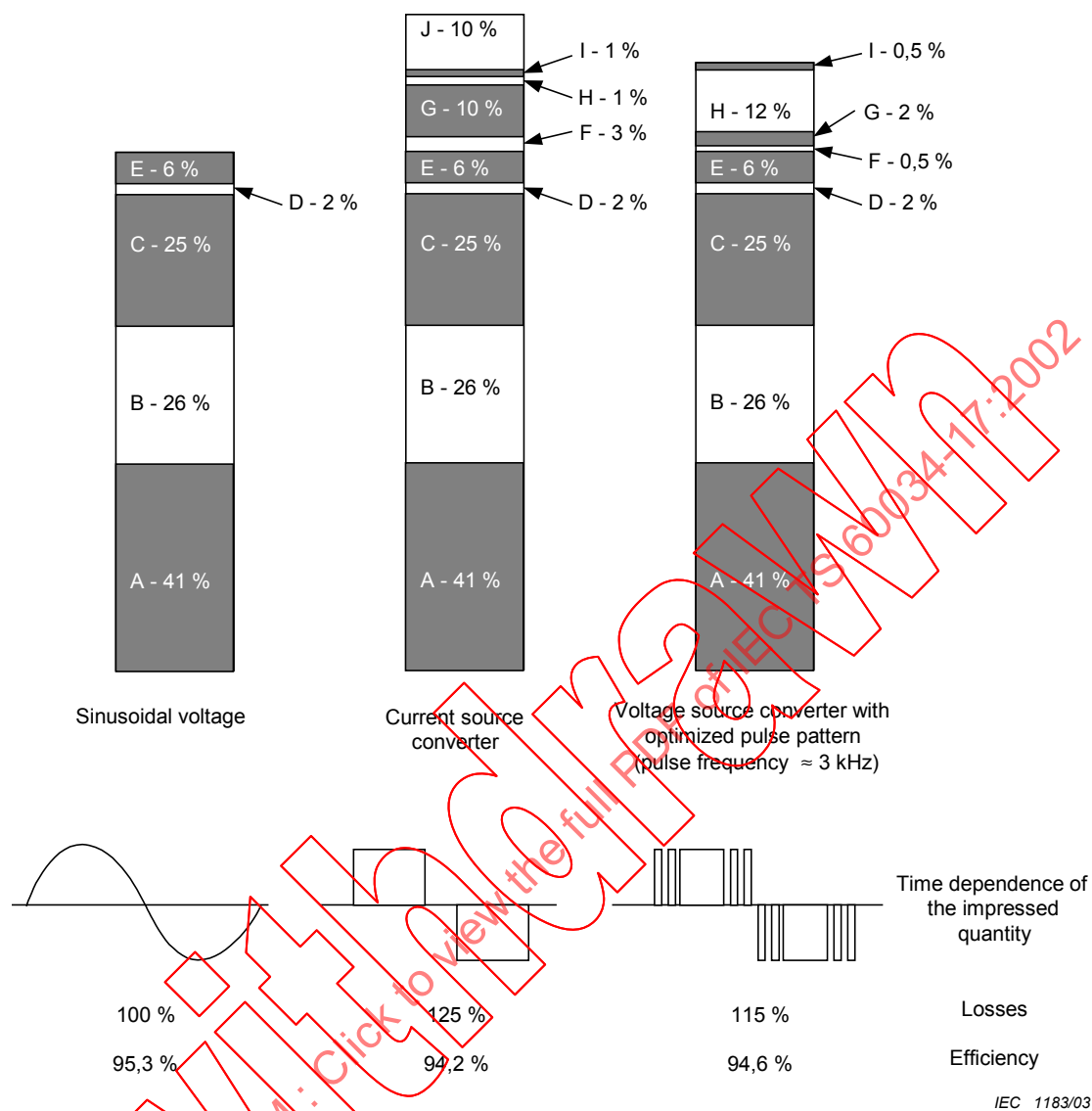


Figure 3 – Influence of converter supply on the losses of a cage induction motor (frame size 315 M, design N) with rated values of torque and speed

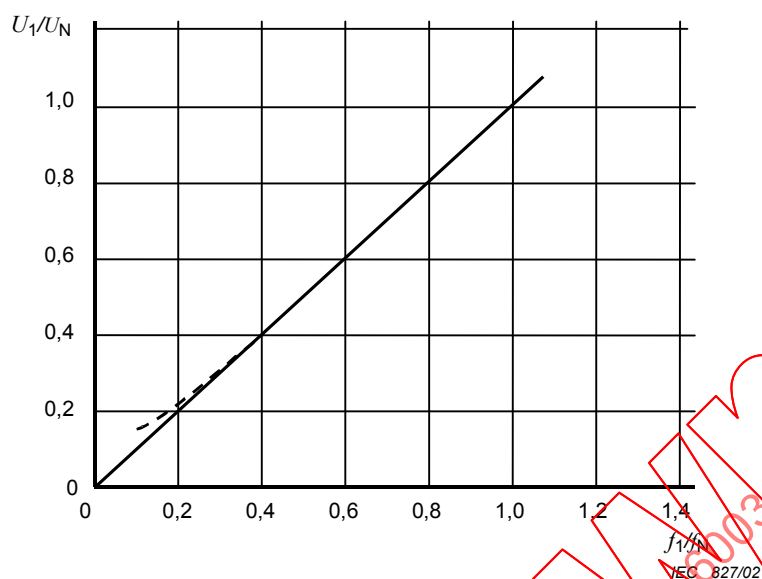


Figure 4 – Tension fondamentale U_1 en fonction de la fréquence de fonctionnement f_1 (voir l'article 6)

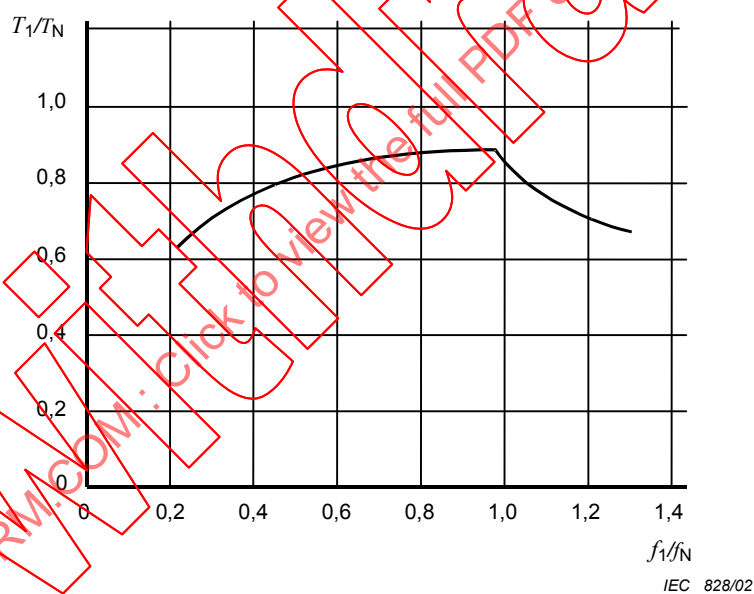


Figure 5 – Facteur de déclassement du couple d'un moteur à induction à cage de conception N, IC 0141 (refroidissement par autocirculation), avec alimentation par convertisseur de courant, en fonction de la fréquence de fonctionnement f_1 (exemple)

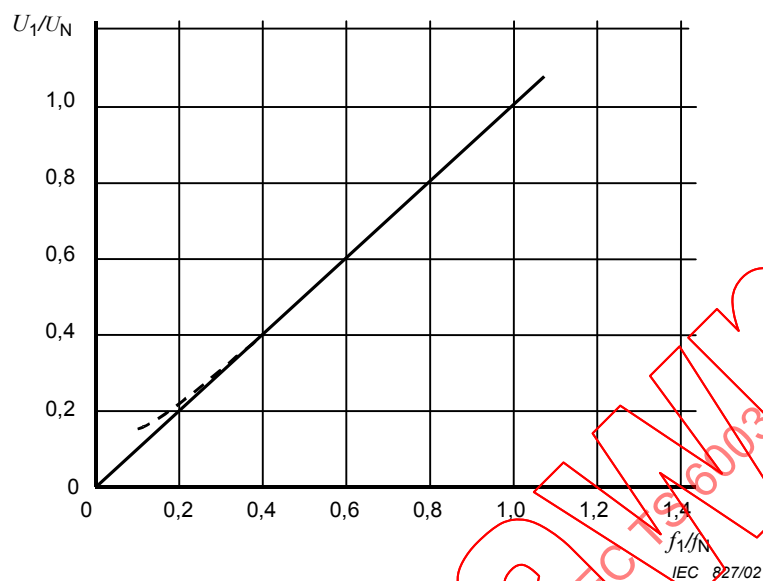


Figure 4 – Fundamental voltage U_1 as a function of operating frequency f_1 (see clause 6)

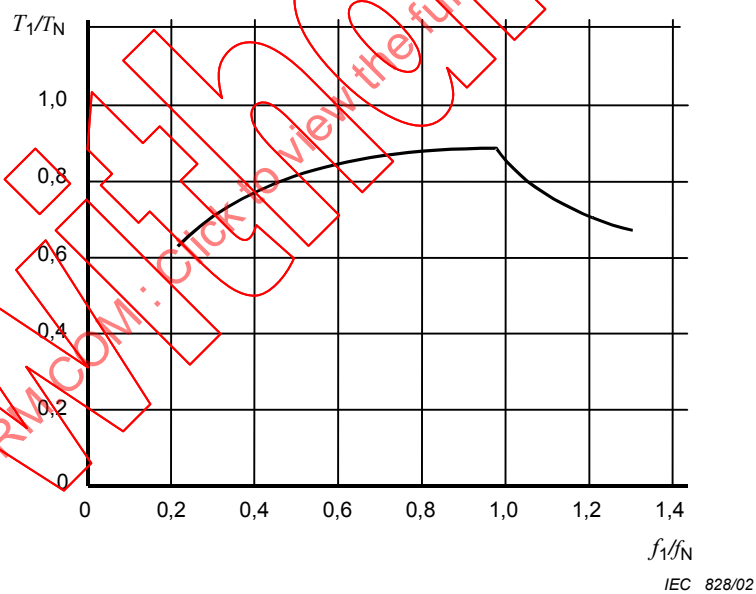


Figure 5 – Torque derating factor for cage induction motors of design N, IC 0141 (self-circulating cooling) for current source converter supply as a function of operating frequency f_1 (example)

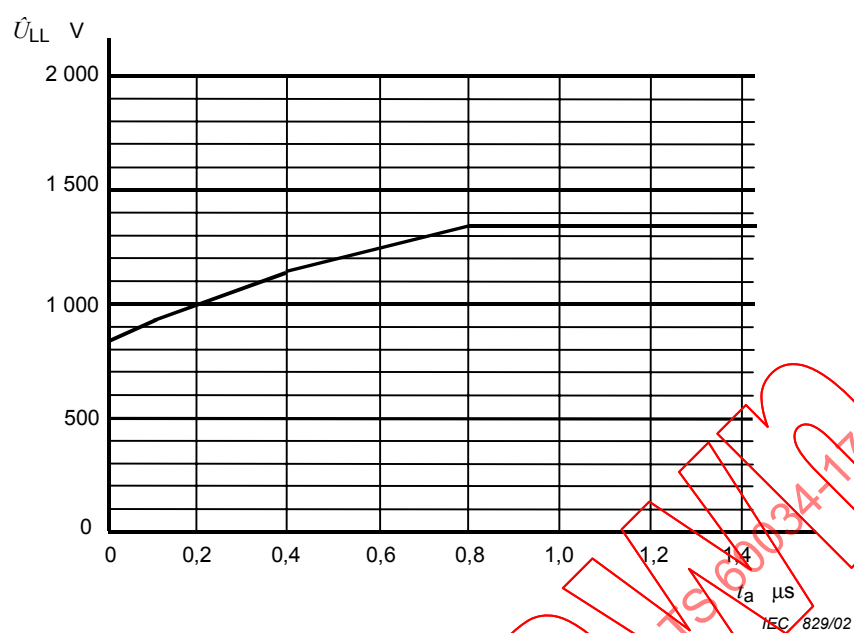


Figure 6 – Courbe limite de tension d'impulsion admissible $\hat{U}_{LL}$ (incluant la réflexion et l'amortissement de la tension) entre bornes du moteur en fonction du temps de montée t_a

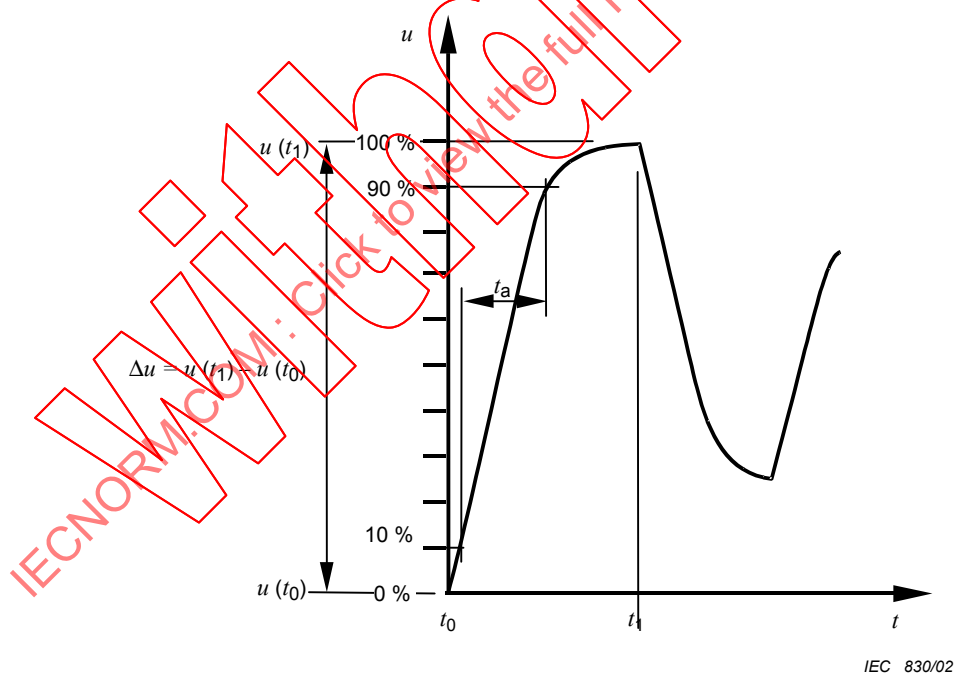


Figure 7 – Définition du temps de montée t_a de la tension aux bornes du moteur

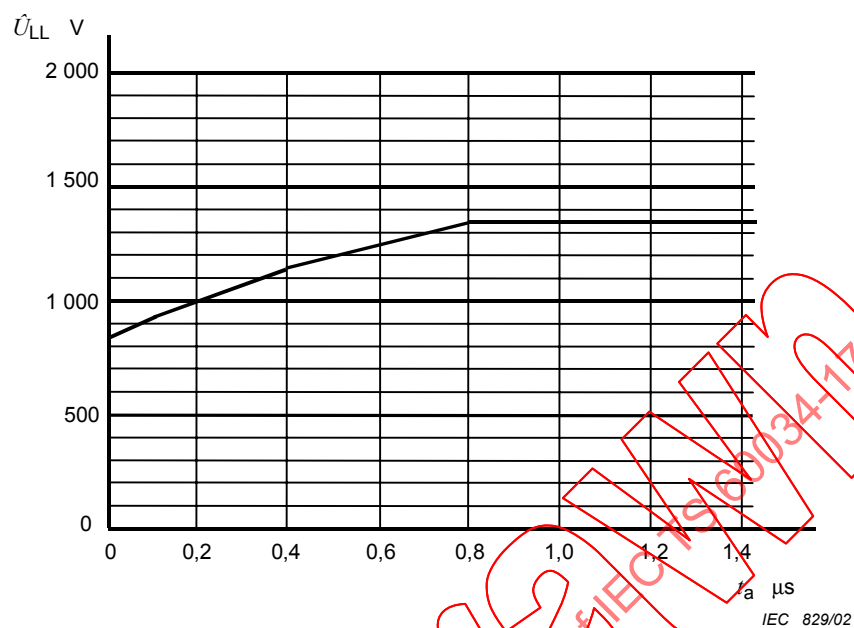


Figure 6 – Limiting curve of admissible impulse voltage $\hat{U}_{LL}$ (including voltage reflection and damping) at the motor terminals as a function of the rise time t_a

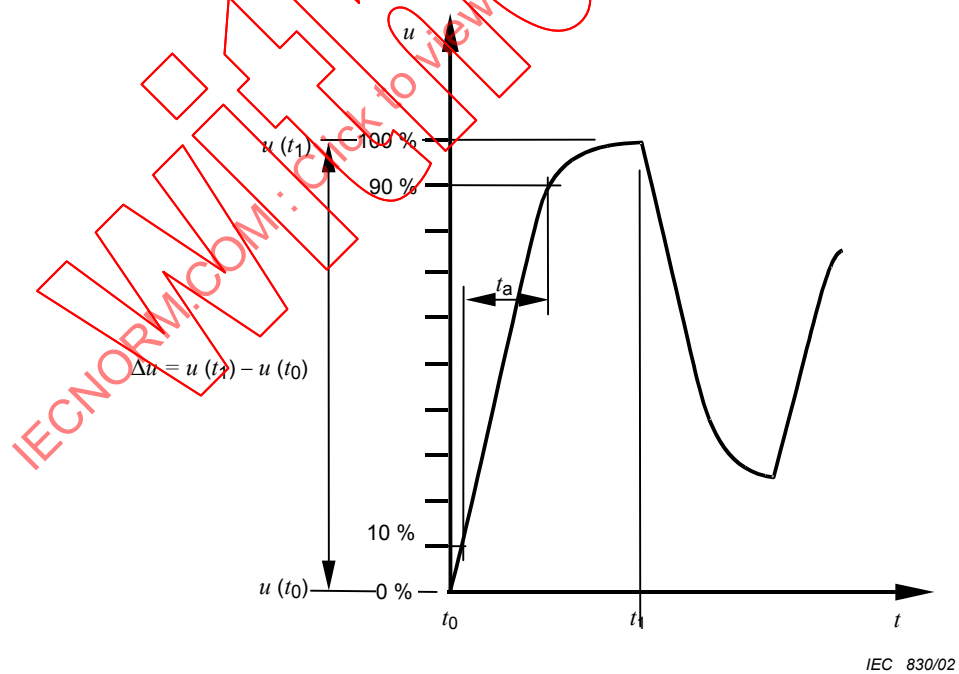


Figure 7 – Definition of the rise time t_a of the voltage at the motor terminals