

SPÉCIFICATION TECHNIQUE

**CEI
IEC**

TECHNICAL SPECIFICATION

TS 60034-17

Quatrième édition
Fourth edition
2006-05

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 60034-17:2006

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 (www.iec.ch/searchpub) 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 (www.iec.ch/online_news/justpub) 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 (www.iec.ch/searchpub) 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 (www.iec.ch/online_news/justpub) 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

Quatrième édition
Fourth edition
2006-05

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 2006 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

S

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 dues aux harmoniques	16
6 Déclassement du couple pendant le fonctionnement du convertisseur	22
7 Couples oscillatoires.....	24
8 Bruit d'origine magnétique	26
9 Durée de vie du système d'isolation	28
10 Courants parasites de paliers.....	32
11 Installation (câblage, mise à la terre, liaison équipotentielle).....	38
12 Vitesse maximale de sécurité en fonctionnement.....	38
13 Correction du facteur de puissance.....	40
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 idéalisé)	12
Figure 2 – Forme d'onde de la tension entre bornes u_{LL} pour une alimentation par convertisseur de source de tension avec fréquence de commutation $f_s = 30 \times f_1$ (exemple).....	14
Figure 3 – Exemple de dépendance des pertes du moteur dues aux harmoniques P_h , liées aux pertes P_1 à la fréquence de fonctionnement f_1 , sur la fréquence de commutation f_s en cas d'alimentation par convertisseur de source de tension	16
Figure 4 – 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.....	20
Figure 5 – Tension fondamentale U_1 en fonction de la fréquence de fonctionnement f_1	22
Figure 6 – Facteur de déclassement du couple d'un moteur à induction à cage de conception N, IC 0141 (refroidissement par auto-circulation), avec alimentation par convertisseur de source de courant, en fonction de la fréquence de fonctionnement f_1 (exemple)	24
Figure 7 – 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_r	30
Figure 8 – Définition du temps de montée d'impulsion t_r de la tension aux bornes du moteur	30
Figure 9 – Flux en anneau y compris la tension d'arbre et le courant i_{circ} circulant résultant ...	32
Figure 10 – Modèle de circuit en mode commun et tension de palier u_{brg}	36

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 Losses caused by harmonics.....	17
6 Torque derating during converter operation.....	23
7 Oscillating torques.....	25
8 Magnetically excited noise.....	27
9 Service life of the insulation system.....	29
10 Bearing currents.....	33
11 Installation (cabling, grounding, bonding).....	39
12 Maximum safe operating speed.....	39
13 Power factor correction.....	41
Figure 1 – Waveform of phase current i_{phase} in delta connection for current source converter supply (idealized example).....	13
Figure 2 – Waveform of line-to-line voltage u_{LL} for voltage source converter supply with switching frequency $f_s = 30 \times f_1$ (example).....	15
Figure 3 – Example for the dependence of the motor losses caused by harmonics P_h , related to the losses P_{f1} at operating frequency f_1 , on the switching frequency f_s in case of voltage source converter supply.....	17
Figure 4 – 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.....	21
Figure 5 – Fundamental voltage U_1 as a function of operating frequency f_1	23
Figure 6 – 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).....	25
Figure 7 – 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_r	31
Figure 8 – Definition of the peak rise time t_r of the voltage at the motor terminals.....	31
Figure 9 – Ring flux including shaft voltage and resulting circulating current i_{circ}	33
Figure 10 – Common mode circuit model and bearing voltage u_{brg}	37

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES –

**Partie 17: Moteurs à induction à cage alimentés
par convertisseurs – 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 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'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. 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 n'a prévu aucune procédure de marquage valant indication d'approbation et n'engage pas sa responsabilité pour les équipements déclarés conformes à une de ses Publications.
- 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 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 d'études 2 de la CEI: Machines tournantes.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

ROTATING ELECTRICAL MACHINES –

**Part 17: Cage induction motors when fed from converters –
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 provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with an IEC Publication.
- 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 60034-17, which is a technical specification, has been prepared by IEC technical committee 2: Rotating machinery.

Cette quatrième édition annule et remplace la troisième édition parue en 2002 et constitue une révision technique.

Les modifications principales par rapport à l'édition précédente concernent une adaptation des parties principales aux derniers développements de la technologie. Les articles concernés sont:

- article 4 en ce qui concerne les différents types de convertisseurs,
- article 5: amélioration pour couvrir l'état de l'art actuel,
- article 7: inclusion des couples pulsatoires causés par les ondulations du courant dans le circuit intermédiaire,
- article 8: révision complète,
- article 10: révision complète,
- article 11: complètement nouveau, l'installation n'était pas couverte par les éditions précédentes.

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

Projet d'enquête	Rapport de vote
2/1348/DTS	2/1373/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.

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

This fourth edition cancels and replaces the third edition published in 2002 and constitutes a technical revision.

The main changes with respect to the previous edition concern an adaptation of major parts to the latest developments of the technology. The relevant clauses are:

- Clause 4 with respect to different kinds of converters;
- Clause 5: improvement to cover the actual state of the art;
- Clause 7: inclusion of pulsating torques caused by ripples of the current in the intermediate circuit;
- Clause 8: complete revision;
- Clause 10: complete revision;
- Clause 11: totally new, installation was not covered by the previous editions.

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

Enquiry draft	Report on voting
2/1348/DTS	2/1373/PVC

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.

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until the maintenance result 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

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

INTRODUCTION

Les caractéristiques de performance et les données de fonctionnement des entraînements par moteurs à induction à cage alimentés par convertisseurs dépendent du système d'entraînement 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 fabricants. 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.

La présente spécification technique traite des moteurs compris dans le domaine d'application de la CEI 60034-12, c'est-à-dire des moteurs triphasés à induction à cage fabriqués en série à basse tension, qui sont conçus à l'origine pour l'alimentation réseau, couvrant les exigences de conception N ou de conception H. Les moteurs qui sont conçus spécifiquement pour une alimentation par convertisseur sont couverts par la CEI 60034-25.

INTRODUCTION

The performance characteristics and operating data for drives with converter-fed cage induction motors are influenced by the complete drive system, comprising supply system, converter, induction motor, mechanical shafting and control equipment. Each of these components exists in numerous technical variations. 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.

The technical specification deals with motors within the scope of IEC 60034-12, i.e. low-voltage series-fabricated three-phase cage induction motors, which are designed originally for mains supply, covering the design N or design H requirements. Motors which are specifically designed for converter supply are covered by IEC 60034-25.

IECNORM.COM :: Click to view the full PDF of IEC TS 60034-17:2006

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 imposés dans le circuit intermédiaire (convertisseurs de source de courant) et les convertisseurs à tension 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 de commutation. 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 (y compris les éventuels amendements) s'applique.

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

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

CEI 60034-25, *Machines électriques tournantes – Partie 25: Guide for the design and performance of cage induction motors specifically designed for converter supply (en anglais seulement)*

3 Caractéristiques 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 normalement pas 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 switching frequency. For the purposes 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, *Rotating electrical machines – Part 1: Rating and performance*

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

IEC 60034-25, *Rotating electrical machines – Part 25: Guide for the design and performance of cage induction motors specifically designed for converter supply*

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 normally not 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 de conception existantes pour les 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 kHz 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 industrielle (par exemple avec les inductances de fuite en fonctionnement normal). Le fabricant 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 les spectres de fréquence des tensions du moteur (dans le cas de convertisseurs de source de tension) ou des courants du moteur (dans le cas de convertisseurs de source de courant).

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 contenu harmonique relatif est influencé par des durées de commutation qui peuvent différer dans divers entraînements.

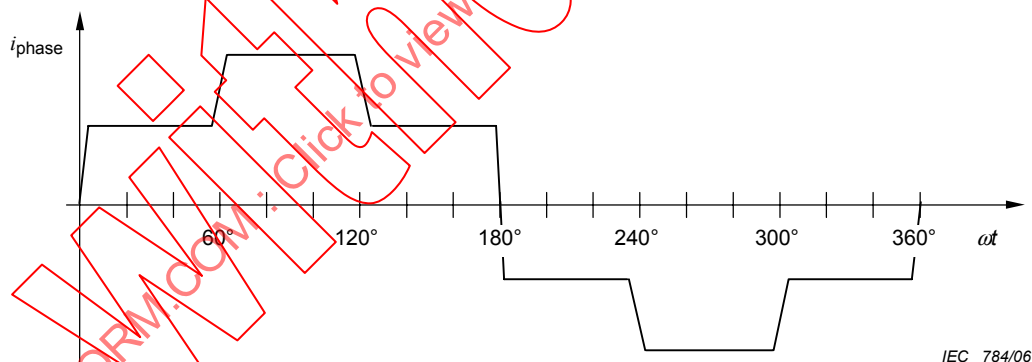


Figure 1 – Forme d'onde du courant de phase i_{phase} avec couplage en triangle pour une alimentation par convertisseur de source de courant (exemple idéalisé)

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 kHz 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 power 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 frequency spectra of motor voltages (in case of voltage source converters) or motor currents (in case of current source converters).

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 is influenced by the commutating time interval which may differ in different drives.

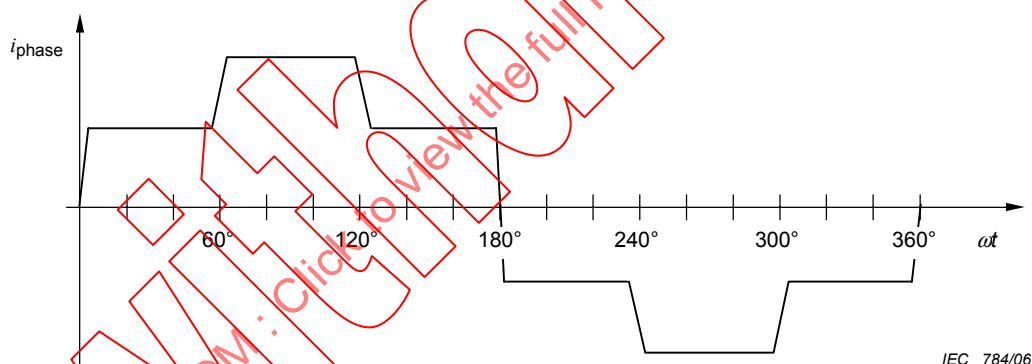


Figure 1 – Waveform of phase current i_{phase} in delta connection for current source converter supply (idealized example)

La Figure 2 montre la forme d'onde caractéristique de la tension entre bornes d'un moteur en fonctionnement avec un convertisseur de source de tension avec une modulation de largeur d'impulsion (convertisseur PWM (en anglais: Pulse Width Modulation)).

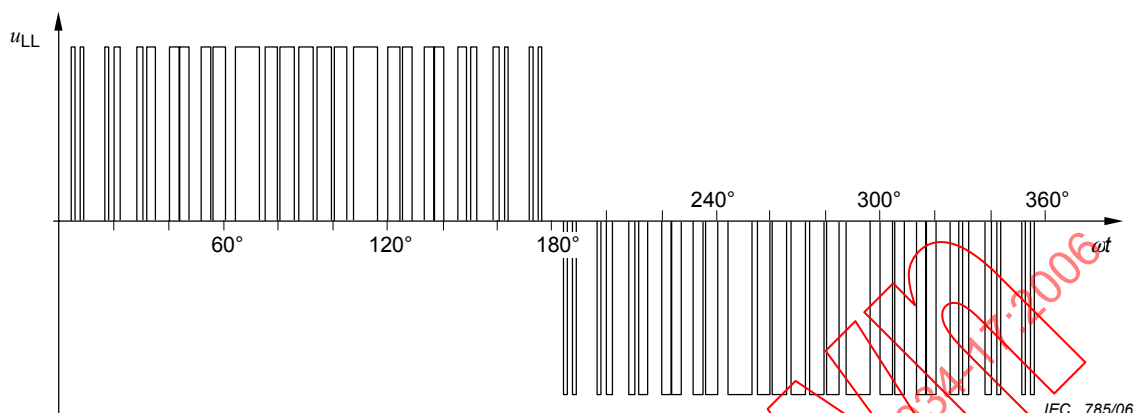


Figure 2 – Forme d'onde de la tension entre bornes u_{LL} pour une alimentation par convertisseur de source de tension avec fréquence de commutation $f_s = 30 \times f_1$ (exemple)

Dans le cas des convertisseurs de source de tension, divers types de modulations sont utilisés. 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 contenu harmonique de la tension de sortie du convertisseur, et les répercussions sur le moteur doivent être étudiées.

Les convertisseurs utilisant une modulation par porteuse, associée avec des séquences d'impulsions synchronisées et asynchrones, comme souvent utilisées, produisent les fréquences:

$$f = k_s \times f_s \pm k_1 \times f_1$$

où $k_s = 1, 2, 3, \dots$ et $k_1 = 1, 2, 4, 5, 7, \dots$ sont respectivement des multiplicateurs de la fréquence de commutation f_s et de la fréquence de fonctionnement f_1 . La formule est également valable dans le cas de convertisseurs avec modulation par phaseur d'espace.

Les convertisseurs sans modulation par porteuse, où il n'existe aucune fréquence de commutation prédéterminée, sont également utilisés en pratique. Dans ce cas, le spectre de fréquence de la tension de sortie est caractérisé par un bruit aléatoire à large bande sans impulsions brèves à des fréquences spécifiques.

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

En 7.2.1 de la CEI 60034-1, le contenu harmonique admissible de la tension d'alimentation des moteurs à induction à cage est exprimé par une seule valeur numérique, appelée le facteur harmonique de tension (HVF; en anglais *Harmonic Voltage Factor*). Toutefois, ce facteur ne s'applique pas à l'alimentation du convertisseur.

Figure 2 shows the typical waveform of the motor line-to-line voltage for operation with a voltage source converter with pulse width modulation (PWM converter).

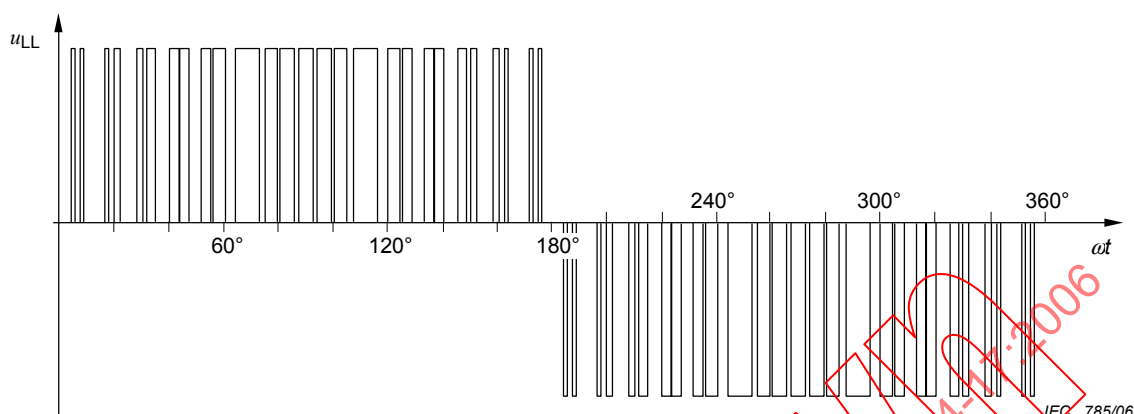


Figure 2 – Waveform of line-to-line voltage u_{LL} for voltage source converter supply with switching frequency $f_s = 30 \times f_1$ (example)

In the case of voltage source converters a variety of modulation types is in use. 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 must be known and its consequences on the motor shall be studied.

Converters using carrier modulation, together with synchronised and asynchronous pulse patterns, as applied in many cases, produce the frequencies:

$$f = k_s \times f_s \pm k_1 \times f_1$$

where $k_s = 1, 2, 3, \dots$ and $k_1 = 1, 2, 4, 5, 7, \dots$ are multiplying factors of the switching frequency f_s and of the operating frequency f_1 , respectively. The formula is valid also in the case of converters with space-phaser modulation.

Converters with carrierless modulation, where no pre-determined switching frequency is existent, are also in practical use. In this case, the frequency spectrum of the output voltage is characterised by broadband random noise without spikes at specific frequencies.

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

In 7.2.1 of IEC 60034-1 the permissible harmonic content of the supply voltage of cage induction motors is expressed by one single numerical value called the harmonic voltage factor (HVF). However, this factor is not applicable for converter power supplies.

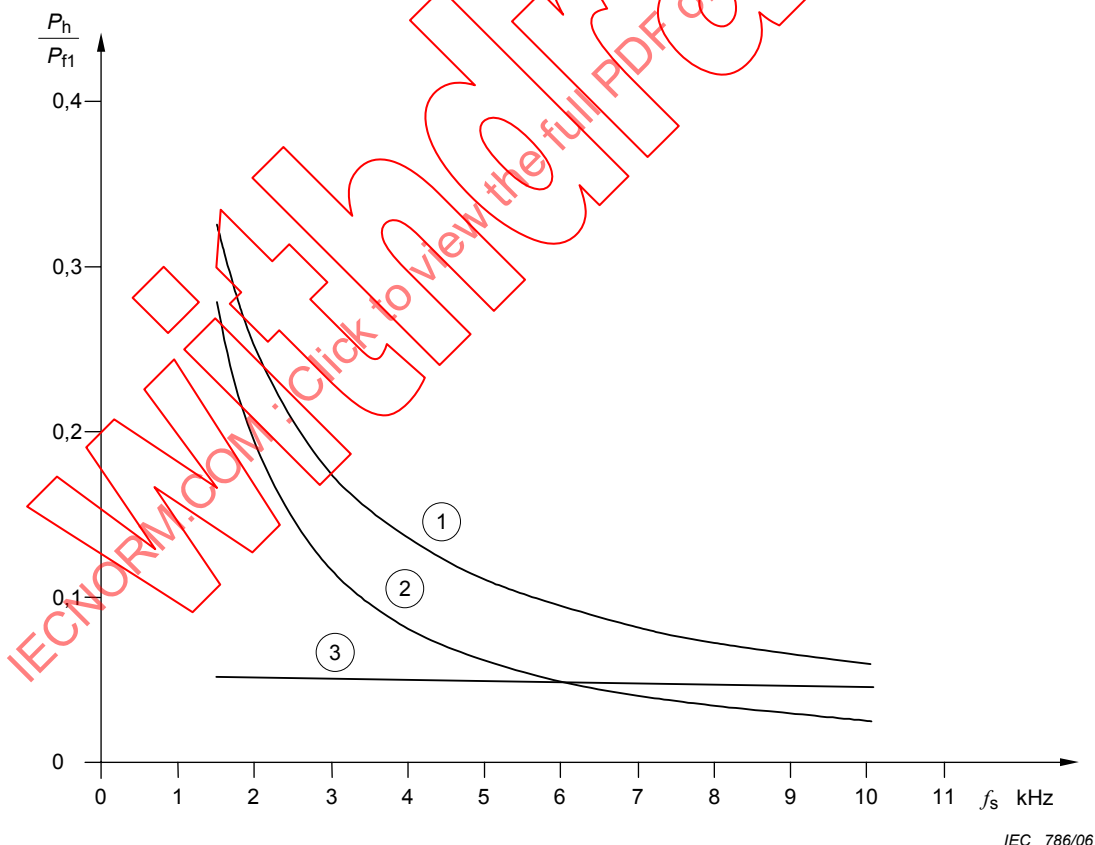
5 Pertes dues aux harmoniques

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.

Dans le cas de moteurs alimentés par des convertisseurs de source de tension, les pertes fer supplémentaires ne peuvent pas être négligées. Elles dépendent des amplitudes des harmoniques des tensions de phase, mais elles sont quasiment indépendantes de leur fréquence.

Les courants harmoniques, qui sont à l'origine des pertes Joule, sont limités par les réactances de fuite. Bien que les courants harmoniques soient faibles, les pertes Joule ne peuvent pas être négligées en raison de la distribution du courant (effet de peau) dû aux fréquences élevées. Cette règle s'applique à la fois aux enroulements à bobines et aux enroulements à barres. Les rotors avec des distributions de courant élevées (effet de peau) sont particulièrement sensibles à ces pertes.

Il est vérifié par de nombreux essais que la valeur totale des pertes supplémentaires causées par les harmoniques ne dépend pas de la charge; elles diminuent lorsque la fréquence de commutation augmente (voir Figure 3). Cet effet est provoqué par les pertes Joule supplémentaires faibles aux fréquences de commutation élevées.



1 = Pertes harmoniques totales

2 = Pertes joule harmoniques

3 = Pertes fer harmoniques

Figure 3 – Exemple de dépendance des pertes du moteur dues aux harmoniques P_h , liées aux pertes P_{f1} à la fréquence de fonctionnement f_1 , sur la fréquence de commutation f_s en cas d'alimentation par convertisseur de source de tension

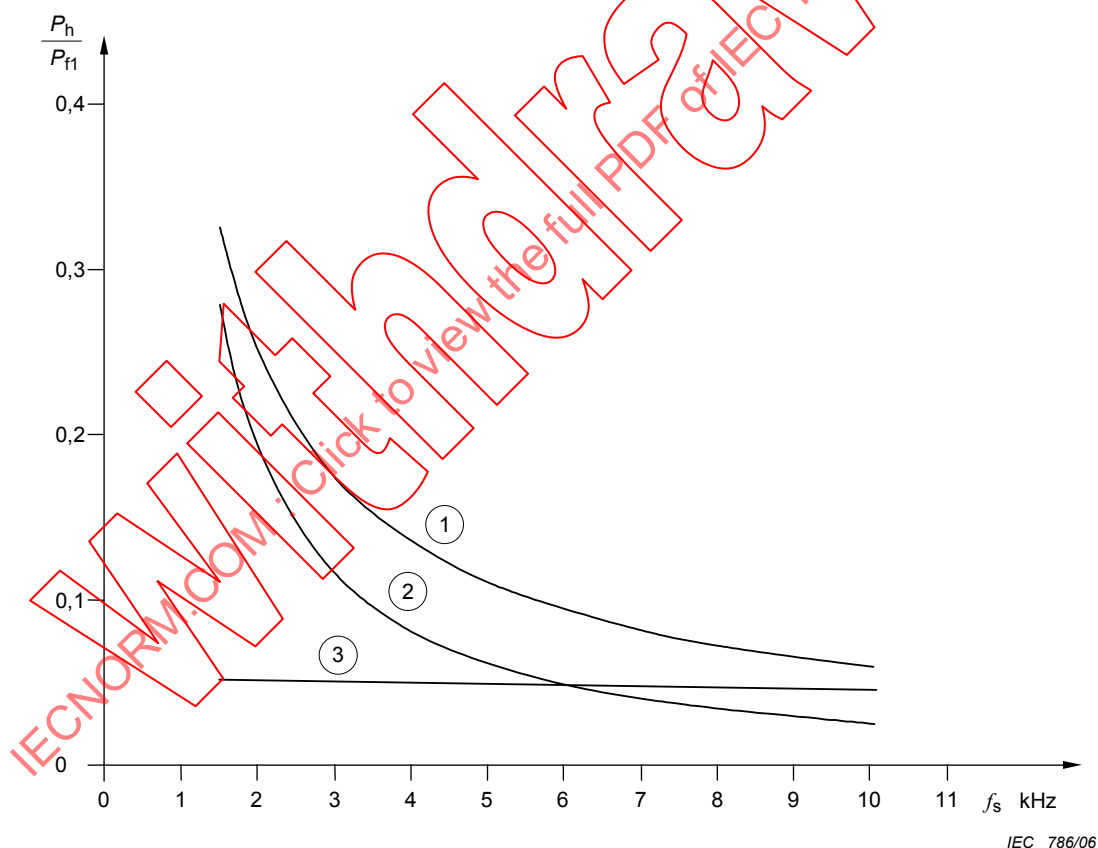
5 Losses caused by harmonics

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.

In the case of motors supplied by voltage source converters, the additional iron losses cannot be neglected. They depend on the amplitudes of the phase voltage harmonics, but they are nearly independent on its frequency.

The harmonic currents, which are responsible for the winding losses, are limited by the leakage reactances. Although the harmonic currents are small, the winding losses cannot be ignored because of the current displacement (skin effect) due to the high frequencies. This statement applies to both form-wound and random-wound windings. Rotors with pronounced current displacement (skin effect) are especially sensitive to these losses.

It is verified by many tests, that the total value of the additional losses caused by harmonics does not depend on load; they decrease with increasing switching frequency (see Figure 3). This effect is caused by the small additional winding losses at high switching frequencies.



- 1 = Total harmonic losses
- 2 = Harmonic winding losses
- 3 = Harmonic iron losses

Figure 3 – Example for the dependence of the motor losses caused by harmonics P_h , related to the losses P_{f1} at operating frequency f_1 , on the switching frequency f_s in case of voltage source converter supply

Dans le cas de moteurs alimentés par des convertisseurs de source de courant, les pertes fer supplémentaires sont presque négligeables à l'exception des pertes dites pertes par commutation. 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 Joule supplémentaires au rotor jouent un rôle important en raison des amplitudes relativement élevées des courants harmoniques de basse fréquence.

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 source de courant avec différentes fréquences de commutation et formes d'impulsion) et de moteurs (par exemple nature de l'enroulement, géométrie des encoches, pertes fer spécifiques). La qualité de fabrication du noyau est également un élément important.

Les colonnes de la Figure 4 montrent, à titre d'exemple, l'allure des pertes calculées d'un moteur spécifique (désignation 315 M; conception N) alimenté par différents convertisseurs présentant différents contenus 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 4, dans le cas d'un fonctionnement avec convertisseur, on a pris l'hypothèse de fondamentaux des tensions et courants égaux à ceux aux conditions assignées.

Conformément à la Figure 4, les pertes d'harmoniques sont plus importantes pour une alimentation par convertisseurs de source de courant que par convertisseurs de source de tension. La différence diminue à charge partielle, parce que les pertes d'harmoniques sont constantes pour l'alimentation par convertisseur de source de tension, mais les pertes d'harmoniques augmentent avec la charge pour l'alimentation par convertisseur de source de courant.

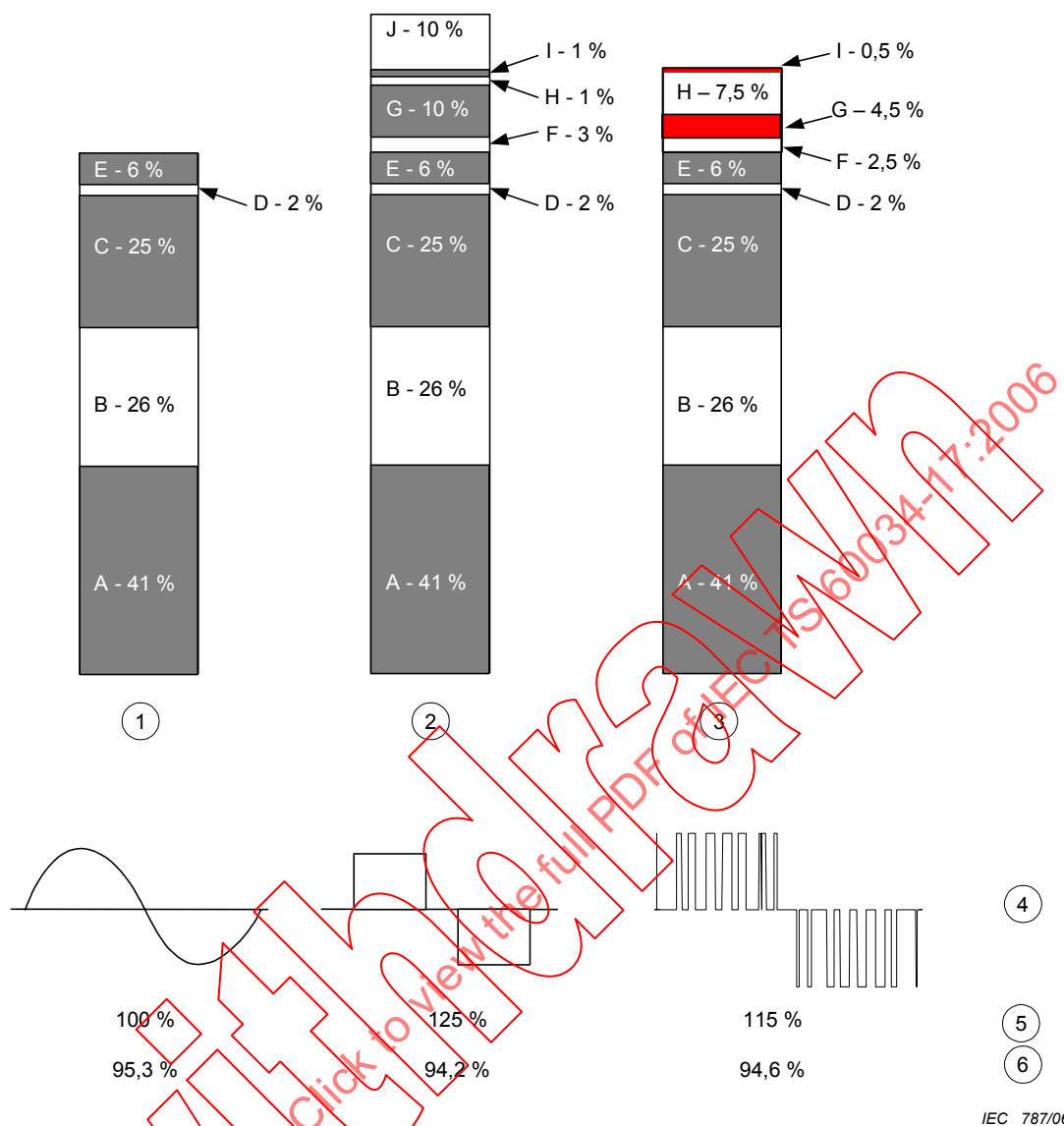
In the case of motors supplied by current-source converters, the additional iron losses are nearly negligible with the exception of the so-called commutation losses. The fast change of the leakage fluxes during the commutation interval generates eddy currents in the teeth of stator and rotor. There are no commutation losses in the case of operation from voltage source converters because the commutation currents do not flow through the motor windings.

The additional rotor winding losses play an important role due to the relative high amplitudes of the harmonic currents of low frequency.

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. current and voltage source converters with different switching frequencies and pulse patterns) and of motors (e.g. kind of winding, slot geometry, specific iron loss). The quality of core manufacture is also an important feature.

The columns in Figure 4 show, as an example, the calculated loss composition of a specific motor (frame size 315 M; design N) 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 4, the fundamental voltages and currents during converter operation are assumed to be the same as under rated conditions.

According to Figure 4, the harmonic losses are higher for supply by current source converters than by voltage source converters. The difference diminishes at partial load, because the harmonic losses are constant for voltage source converter supply, but the harmonic losses increase with load for current source converter supply.



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

1 = Tension sinusoïdale

2 = Convertisseur de source de courant

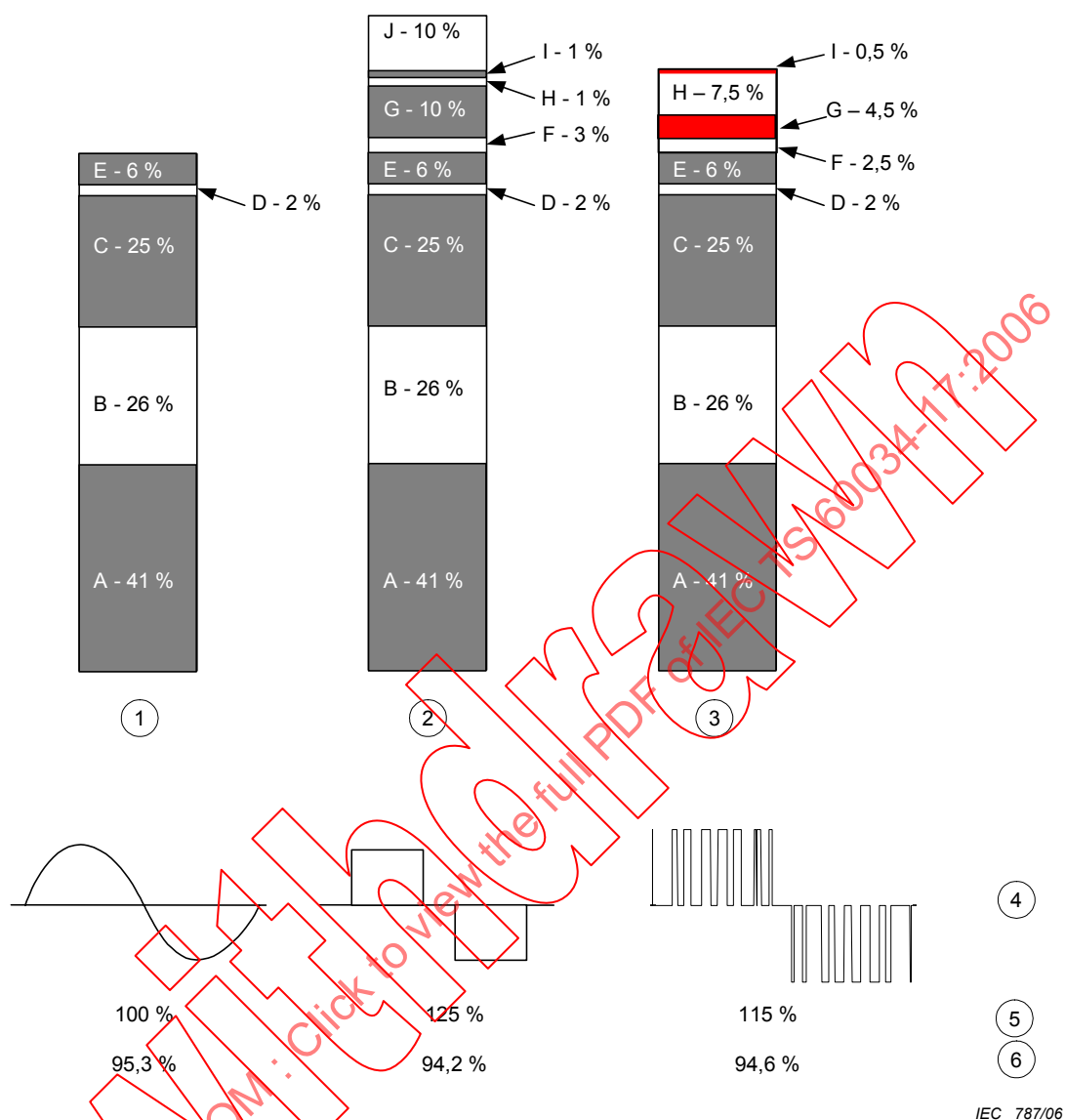
3 = Convertisseur de source de tension avec modulation par porteuse (fréquence de commutation $\approx$ 3 kHz)

4 = Allure de la valeur imposée

5 = Pertes

6 = Rendement

Figure 4 – 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



Losses caused by fundamental frequency	Losses caused by harmonics
E – Frictional losses	J – Commutation losses
D – Additional load losses	I – Additional load losses
C – Iron losses	H – Iron losses
B – Rotor winding losses	G – Rotor winding losses
A – Stator winding losses	F – Stator winding losses

Figure 4 – 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

6 Déclassement du couple pendant le fonctionnement du convertisseur

Quand le moteur est alimenté par un convertisseur à la fréquence assignée du moteur, le couple disponible est généralement inférieur au couple assigné dans le cas d'une alimentation de tension sinusoïdale en raison d'une augmentation de l'échauffement (pertes d'harmoniques). Une raison supplémentaire pour la réduction peut être la chute de tension du convertisseur. Le maintien du couple assigné peut réduire la durée de vie en service de l'isolation.

La courbe en trait plein de la Figure 5 est relative à un convertisseur qui donne approximativement 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 (par exemple IC 01 ou IC 0141). 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.

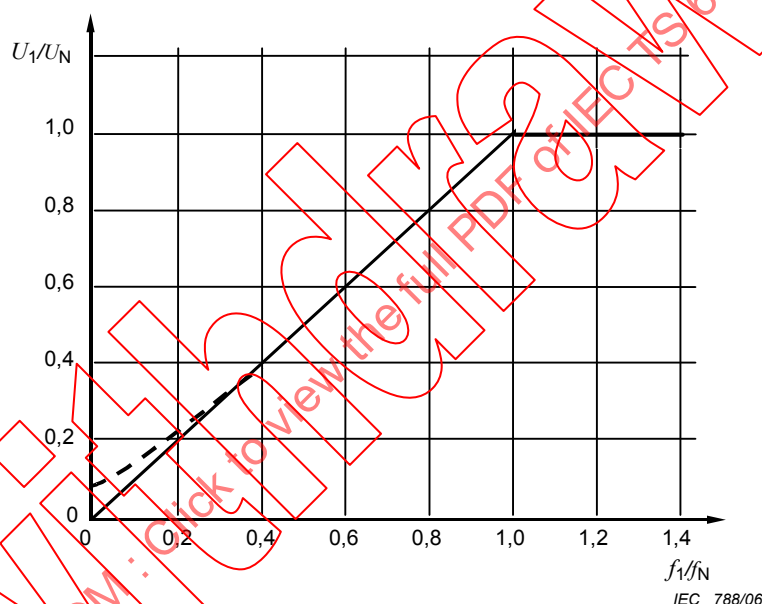


Figure 5 – Tension fondamentale U_1 en fonction de la fréquence de fonctionnement f_1 (voir article 6)

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 tension 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 un rapport constant U_1/f_1 , conduit à un couple maximal constant uniquement 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, certaines commandes de convertisseurs sont conçues pour présenter une caractéristique conforme à la ligne en pointillés de la Figure 5. A basse vitesse, les couples obtenus sont supérieurs à ceux obtenus en l'absence d'une telle compensation.

6 Torque derating during converter operation

When the motor is supplied from a converter at the motor rated frequency, the available torque is usually less than the rated torque on a sinusoidal voltage supply due to increased temperature rise (harmonic losses). An additional reason for the reduction may be the voltage drop of the converter. Maintaining of the rated torque may reduce insulation service-life.

The full-line curve in Figure 5 refers to a converter producing approximately the same fundamental motor flux as at 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 (e.g. IC 01 or IC 0141). 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.

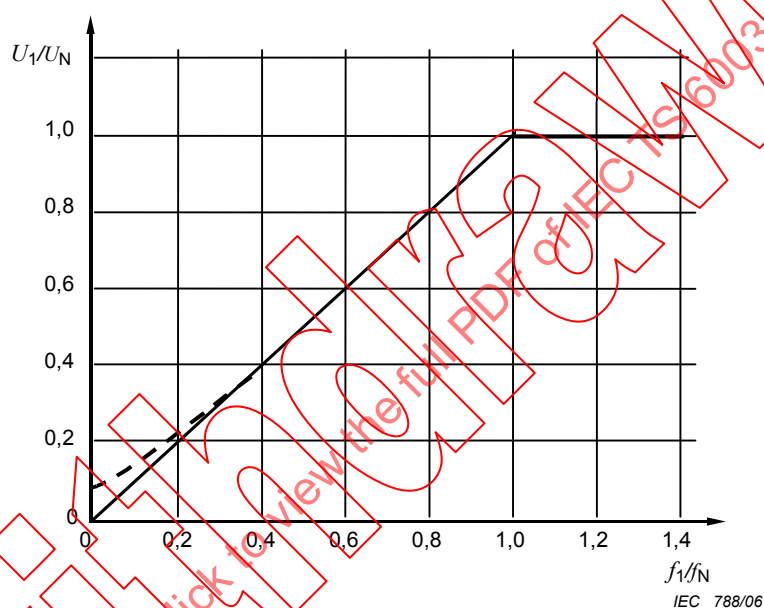


Figure 5 – Fundamental voltage U_1 as a function of operating frequency f_1 (see clause 6)

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 constant ratio U_1/f_1 leads to a constant pull-out torque only if the stator winding resistance is negligible in comparison with the motor reactances. To compensate for the effect of the motor stator resistance, some converter controls are designed to have a characteristic in accordance with the dashed line in Figure 5. At low speeds, higher torques are generated than in the absence of such a compensation.

Au-dessus du point de fonctionnement 1,0 p.u. de tension et fréquence de la Figure 5, 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 6 au-dessus de $f_1/f_N = 1,0$.

La Figure 6 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 fabricant du moteur si le spectre harmonique et les caractéristiques tension-fréquence du convertisseur sont connus. En raison des modes particuliers de refroidissement (IC 01 ou IC 411) et de ventilation (refroidissement par auto-circulation 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 de commutation 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 de commutation augmente.

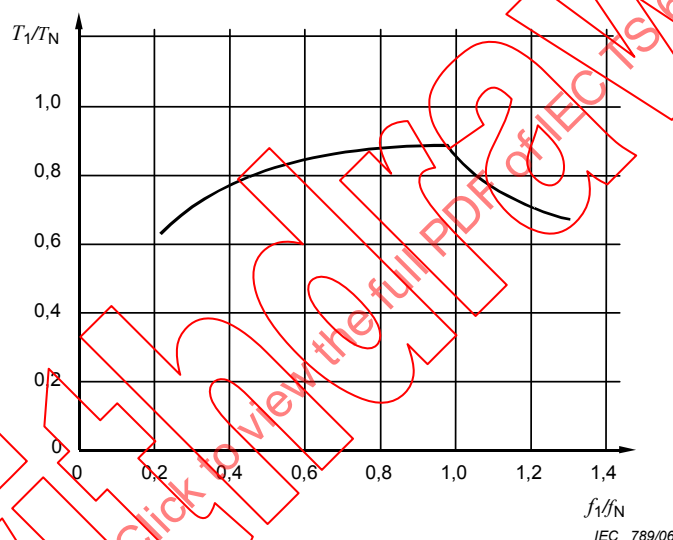


Figure 6 – Facteur de déclassement du couple d'un moteur à induction à cage de conception N, IC 0141 (refroidissement par auto-circulation), avec alimentation par convertisseur de source de courant, en fonction de la fréquence de fonctionnement f_1 (exemple)

7 Couples oscillatoires

Les couples asynchrones (permanents) générés par les harmoniques ont peu d'effet sur le fonctionnement de l'entraînement. Cependant, cela 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 de fonctionnement (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. De plus, les couples oscillatoires sont excités par des harmoniques qui sont basés sur les ondulations du courant continu dans le circuit intermédiaire; ces couples sont de la fréquence $6(f_1 - f_p)$ et $12(f_1 - f_p)$, où f_p est la fréquence industrielle du réseau. 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 certaines applications, un saut d'une petite bande de fréquences de fonctionnement est inévitable.

Above the 1,0 p.u. operation point of voltage and frequency in Figure 5, 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 6 above $f_1/f_N = 1,0$.

Figure 6 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 (switching frequency in the kHz range) require smaller torque reductions than those supplied from block converters. The derating is normally reduced as the switching frequency increases.

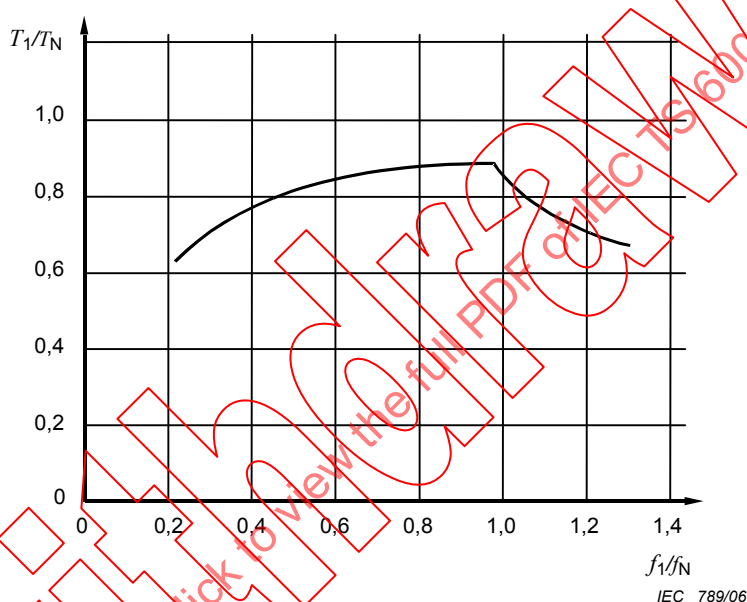


Figure 6 – Torque derating factor for cage induction motors of design N, IC 0141 (self-circulating cooling) for current source converter supply as a function of operating frequency f_1 (example)

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 operational 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. In addition, oscillating torques are excited by harmonics which are based on the ripples of the d.c. current in the intermediate circuit; these torques are of the frequency $6(f_1 - f_p)$ and $12(f_1 - f_p)$, where f_p is the power frequency of the mains. A careful calculation of the critical torsional speeds is advisable, particularly for drives with transmission elements which are only slightly damped. In some applications, skipping of a small band of operating frequencies is unavoidable.

Dans les entraînements à convertisseurs à commande par impulsions, les fréquences des couples oscillatoires prépondérants sont déterminées par la fréquence de commutation, tandis que leurs amplitudes dépendent de la largeur d'impulsion. Ainsi, les amplitudes des couples oscillatoires peuvent atteindre 15 %, sous réserve que la fréquence de commutation soit 10 fois supérieure à la fréquence fondamentale, ce qui est généralement le cas des convertisseurs actuels. Dans le cas des fréquences de commutation 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 de commutation. 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

Le bruit magnétique des moteurs à induction est essentiellement provoqué par des ondes de forces de traction agissant dans la direction radiale du circuit magnétique du stator. Ces forces dites de Maxwell sont excitées par l'interaction des divers champs magnétiques dans l'entrefer. La force de traction est caractérisée par son amplitude, sa fréquence et son mode. Etant donné que les amplitudes sont faibles, la force de traction n'entraîne que des bruits perturbants, lorsque la fréquence et le mode d'une onde spécifique coïncident avec la fréquence et le mode d'une fréquence naturelle du circuit magnétique du stator.

Dans le cas de tensions d'alimentation sinusoïdales, le bruit magnétique est provoqué par les harmoniques spatiaux du champ de l'entrefer. L'objectif d'une conception professionnelle est d'éviter les résonances aux conditions de fonctionnement assignées du moteur. Cependant, en raison de la grande variété de champs harmoniques spatiaux qui contribuent au bruit, un bruit magnétique sonore est inévitable aux vitesses spécifiques, lorsque le moteur fonctionne à flux constant sur une large plage de réglage de vitesse, même lorsque la tension d'alimentation est sinusoïdale. Un saut d'une petite bande de fréquences est fréquemment utilisé pour éviter une émission de bruit trop élevée à la vitesse associée.

Les indications données ci-dessus sont également valables lorsqu'un moteur est alimenté à partir d'un convertisseur. Cependant, dans ce cas, les champs magnétiques générés par les harmoniques de temps sont superposés. En ce qui concerne les bruits magnétiques considérables, il est suffisant de prendre en considération l'interaction des champs d'entrefer fondamentaux (nombre de paires de pôles p) de la fréquence de fonctionnement et les différents harmoniques. Par conséquent, les ondes générées en plus de la force de traction sont des modes $r = 0$ et $r = 2p$. Les fréquences naturelles de ces modes dépendent de la taille et de la conception du moteur. Pour les moteurs à 2 pôles et à 4 pôles, les fréquences de résonance des modes $r = 0$ et $r = 2p$ peuvent être regroupées approximativement comme suit:

hauteur d'arbre < 200 mm:	$f_{0,r=0} > 4\,500 \text{ Hz}$,	$f_{0,r=2} > 800 \text{ Hz}$,	$f_{0,r=4} > 4\,000 \text{ Hz}$
hauteur d'arbre > 280 mm:	$f_{0,r=0} < 3\,000 \text{ Hz}$,	$f_{0,r=2} < 500 \text{ Hz}$,	$f_{0,r=4} < 2\,500 \text{ Hz}$

En cas d'alimentation d'un moteur par un convertisseur de source de courant, des bruits supplémentaires à excitation magnétique sont produits 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 accroissements de bruit se situe dans la même gamme pendant le fonctionnement du moteur à flux constant et courants constants. L'accroissement 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 à 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.

In drives with pulse-controlled converters, the frequencies of the dominant oscillating torques are determined by the switching frequency while their amplitudes depend on the pulse width. Thus, the oscillating torque amplitudes may be as high as 15 %, provided that the switching frequency exceeds 10 times the fundamental frequency, which is usually the case in today's converters. With higher switching 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-phaser modulation). Additionally, oscillating torques of twice the switching 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

The magnetic noise of induction motors is essentially caused by waves of tensile stress acting in radial direction on the stator bore. These so-called Maxwell forces are excited by the interaction of the various magnetic fields in the air-gap. The tensile stress is characterised by its amplitude, frequency and mode. As the amplitudes are small, the tensile stress results in disturbing tones only when frequency and mode of a specific wave coincides with the frequency and mode of a natural frequency of the stator core.

In the case of sinusoidal supply voltages, the magnetic noise is caused by the spatial harmonics of the air-gap field. The aim of a professional design is to avoid resonances at the rated operating conditions of the motor. But, because of the large variety of contributing spatial harmonic fields, audible magnetic noise is unavoidable at specific speeds, when the motor is operated at constant flux over a wide speed setting range, even when the supply voltage is sinusoidal. Skipping of a small frequency band is frequently used to avoid a too high noise emission at the associated speed.

The statements given above are valid also when a motor is supplied from a converter. But, in this case, the magnetic fields produced by the time harmonics are superimposed. With respect to considerable magnetic noise, it is sufficient to consider the interaction of the fundamental air-gap fields (number of pole pairs p) of the operating frequency and the different harmonics. Therefore, the additionally generated waves of tensile stress are of the modes $r = 0$ and $r = 2p$. The natural frequencies of these modes depend on the size and the design of the motor. For 2-pole and 4-pole motors, the resonance frequencies of modes $r = 0$ and $r = 2p$ can be grouped approximately as follows:

shaft height < 200 mm:	$f_{0,r=0} > 4\,500 \text{ Hz},$	$f_{0,r=2} > 800 \text{ Hz},$	$f_{0,r=4} > 4\,000 \text{ Hz}$
shaft height > 280 mm:	$f_{0,r=0} < 3\,000 \text{ Hz},$	$f_{0,r=2} < 500 \text{ Hz},$	$f_{0,r=4} < 2\,500 \text{ Hz}$

When supplying a motor by a current source converter, additional magnetically excited tones are generated by the harmonic currents. 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.

En cas d'alimentation d'un moteur par un convertisseur de source de tension, les fréquences des harmoniques importants sont proches de la fréquence de commutation du convertisseur ou de ses multiples. En fonction de la fréquence de commutation et du schéma de commande du convertisseur, il est bien plus probable que la fréquence naturelle du noyau stator pour $r = 0$ ou $r = 2p$ soit satisfaite que dans le cas d'une alimentation provenant d'un convertisseur de source de courant. Lorsque la fréquence de commutation est modifiable, cela peut avoir une influence très importante sur la génération de bruit magnétique. De plus, le type de modulation influence l'amplitude des harmoniques spécifiques et peut également avoir un effet raisonnable sur l'émission de bruit magnétique. Les convertisseurs avec un dispositif de commande PWM sans bande porteuse ou aléatoire provoquent en principe une augmentation plus faible de bruit que les convertisseurs avec une fréquence porteuse fixe. De ce fait, l'augmentation du niveau de bruit due à l'alimentation par convertisseur varie plus largement comparé à 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.

9 Durée de vie du système d'isolation

Le système d'isolation des moteurs alimentés par convertisseurs est soumis à des contraintes diélectriques plus élevées que dans le cas d'une alimentation sinusoïdale.

Dans le cas d'une alimentation par convertisseurs de source de courant à commutation lente (généralement pourvus de thyristors), 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 pointes de commutation ne présentent en principe pas de danger pour le système d'isolation, dans la mesure où leur temps de montée est relativement long et le taux de répétition relativement faible.

Dans le cas d'une alimentation par convertisseurs de source de tension à commutation rapide (pourvus par exemple de semi-conducteurs IGBT), les gradients de tension peuvent soumettre l'isolation entre spires à des contraintes significatives, en particulier celle des bobines d'entrée. La contrainte diélectrique de l'isolation de l'enroulement est déterminée par la tension de crête, le temps de montée court et le taux de répétition élevé des impulsions créées par le convertisseur, les caractéristiques et la longueur des câbles de connexion entre convertisseur et moteur, la conception de l'enroulement et par les autres paramètres du système.

Des moteurs à enroulements aléatoires à bobines rondes émaillées supportent généralement les tensions d'impulsion de la Figure 7 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 à des tensions inférieures ou égales à 500 V en courant alternatif, il convient que le système d'isolation fournisse généralement une durée de vie satisfaisante en étant soumis à des tensions de crête, comme l'illustre la Figure 7. Il faut veiller à éviter des applications de vitesse variable qui impliquent des changements brusques de vitesse étant donné que ces derniers peuvent entraîner des tensions de récupération au niveau de la sortie du convertisseur jusqu'à deux fois la tension assignée du moteur.

When supplying a motor by a voltage source converter, the frequencies of the important harmonics are close to the switching frequency of the converter or multiples of it. Depending on the switching frequency and the control scheme of the converter, it is much more likely that the natural frequency of the stator core for $r = 0$ or $r = 2p$ is met than in the case of supply from a current source converter. When the switching frequency is changeable, this may have tremendous influence on the generation of magnetic noise. In addition, the type of modulation influences the amplitude of specific harmonics and may also have reasonable effect on the emission of magnetic noise. Converters with a carrierless or random PWM control normally cause a lower increase of noise than converters with a fixed carrier frequency. Therefore, the noise level increase due to the converter supply varies more widely compared with operation at a sinusoidal supply of rated voltage and rated frequency as 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 Service life of the insulation system

The insulation system of converter fed motors is subject to higher dielectric stresses than in the case of sinusoidal power supply.

In the case of supply from slow switching current source converters (usually equipped with thyristors), peaks occur in the motor voltage during the commutation interval, which stress the main and interturn insulation. The commutation peaks normally do not endanger the insulation system because their rise time is relatively long and the repetition rate is relatively low.

In the case of supply from fast-switching voltage source converters (equipped for instance with IGBT semiconductors), voltage gradients may significantly stress the interturn insulation, particularly that of the entrance coils. The dielectric stress of the winding insulation is determined by the peak voltage, short rise time and high repetition rate of the impulses produced by the converter, the characteristics and the length of the connection leads between converter and motor, the design of the winding and other systems parameters.

Motors with random wound windings with enamelled round wires will typically endure the pulse voltages of Figure 7 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 7. Care must be taken to avoid variable speed applications that involve rapid speed changes as these can cause regenerative voltages at the converter output up to twice the rated motor voltage.

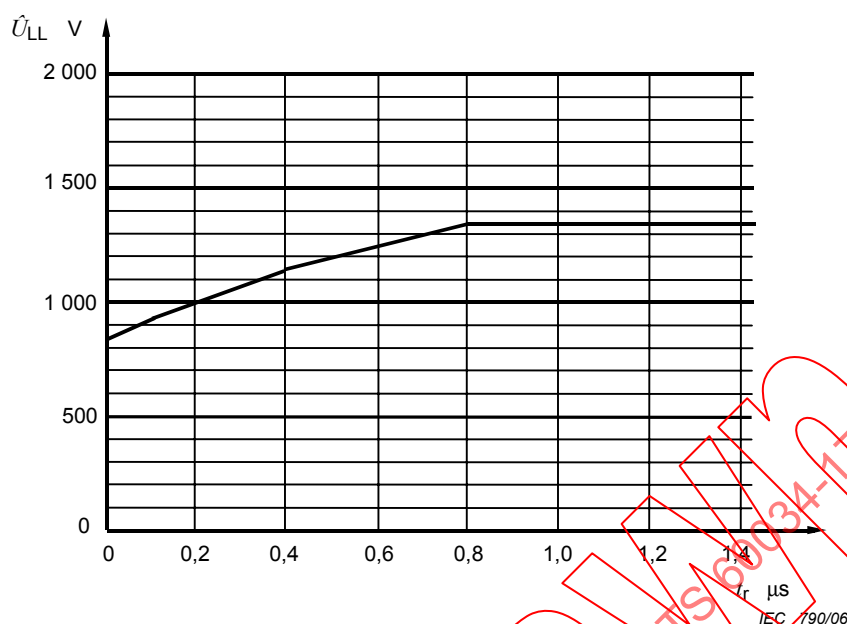


Figure 7 – Courbe limite de tension d'impulsion admissible $\hat{U}_{LL}$ (incluant la réflexion et l'amortissement de la tension) entre bornes du moteur en fonction du temps de montée t_r

Pour des moteurs à des tensions supérieures à 500 V en courant alternatif, alimentés par un onduleur à commutation rapide, des filtres et/ou un système d'isolation augmentés au niveau de la sortie du convertisseur (conçus pour augmenter le temps de montée et/ou pour limiter 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 8).

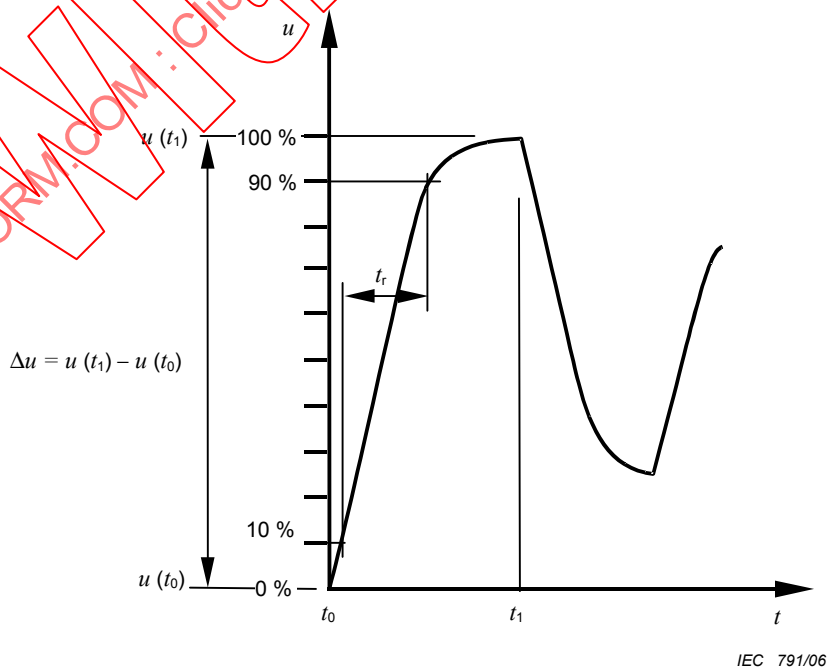


Figure 8 – Définition du temps de montée d'impulsion t_r de la tension aux bornes du moteur

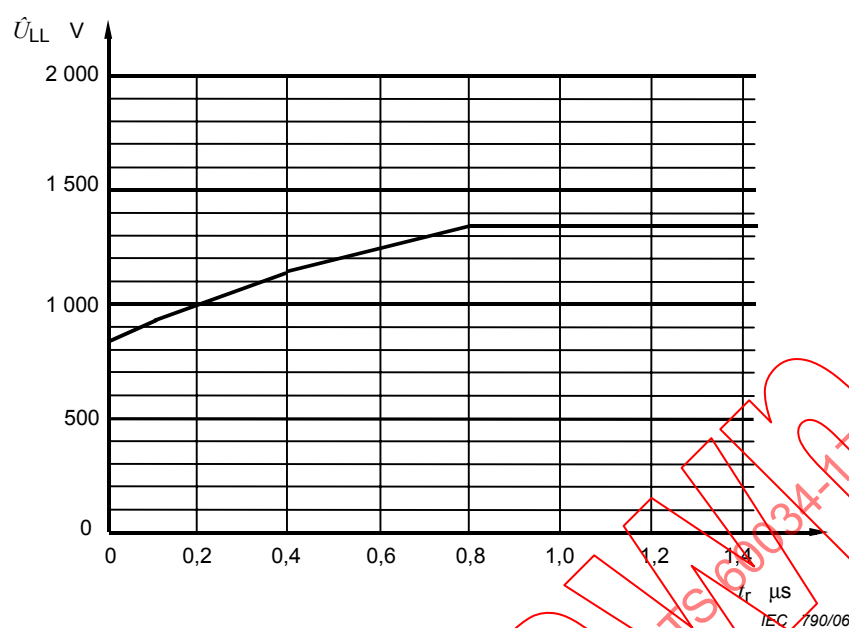


Figure 7 – Limiting curve of admissible impulse voltage $\hat{U}_{LL}$ (including voltage reflection and damping) at the motor terminals as a function of the rise time t_r

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

The term peak rise time is based on the following definition which takes into account the transient phenomena within the winding (see Figure 8).

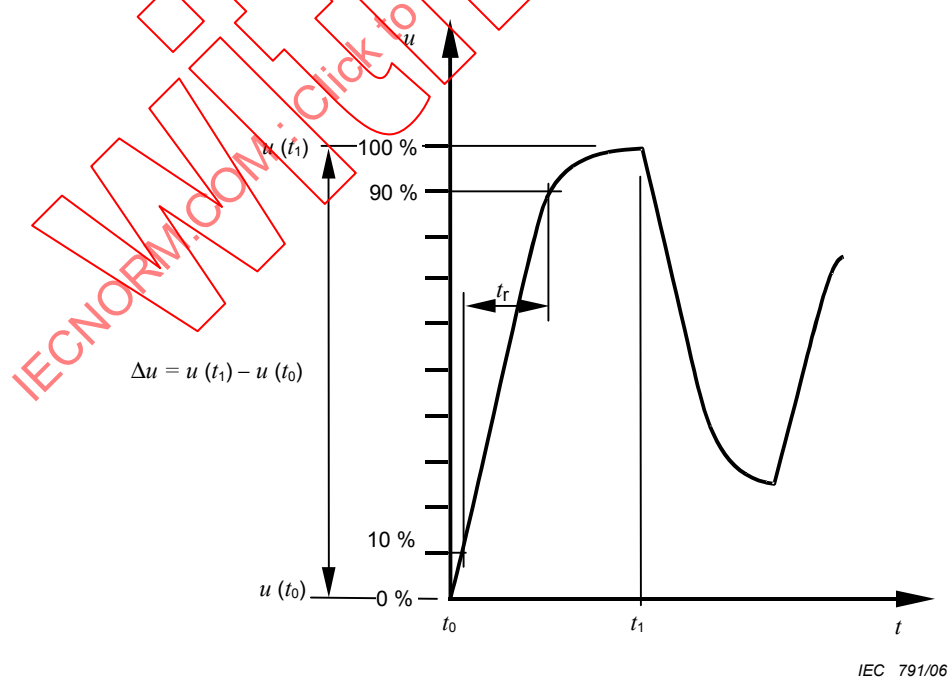


Figure 8 – Definition of the peak rise time t_r of the voltage at the motor terminals

La plage de tensions 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 d'impulsion t_r est défini comme l'intervalle de temps pendant lequel la tension varie de 10 % à 90 % de la plage totale de tensions Δu .

Etant donné les interdépendances complexes, une conception soignée de l'entraînement complet est suggérée.

10 Courants parasites de paliers

En cas de fonctionnement d'un moteur à la tension sinusoïdale, une tension d'arbre est induite dans la boucle conductrice comprenant l'arbre, les paliers, les flasques et les logements (voir Figure 9), par un flux en anneau dans la culasse stator. Le flux en anneau est provoqué par 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 tôles du stator). En principe, la tension d'arbre prédomine sur la fréquence industrielle, superposée par une composante représentant trois fois la fréquence industrielle causée par les effets de saturation. 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 circulant 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 circulant à travers les paliers et finalement dans les paliers du matériel entraîné dans le cas d'un couplage conducteur. L'isolation des paliers n'est ni nécessaire ni coutumière dans le cas de moteurs entrant dans le domaine d'application de la présente spécification, lorsqu'ils fonctionnent à une tension d'alimentation sinusoïdale et qu'ils sont fabriqués selon les règles de l'art courantes.

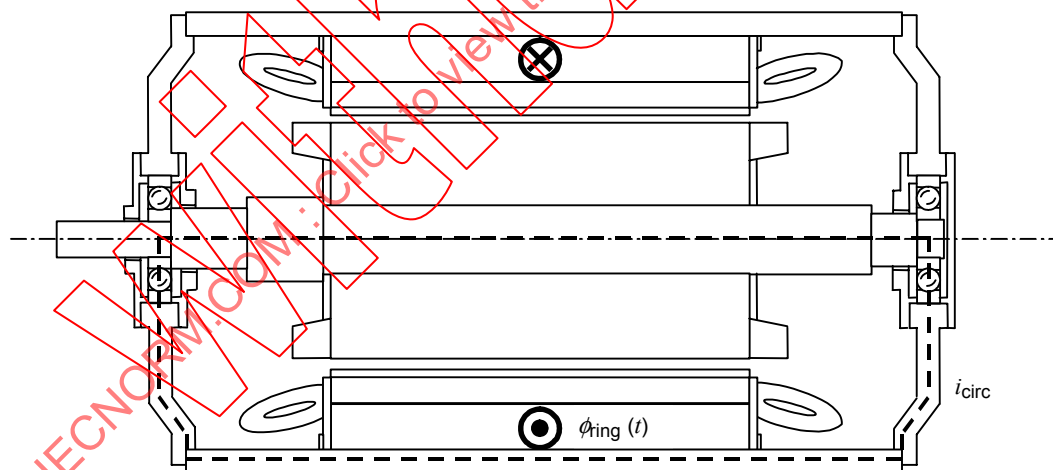


Figure 9 – Flux en anneau y compris la tension d'arbre et le courant i_{circ} circulant résultant

Au cours du fonctionnement du convertisseur de source de courant, la tension d'arbre est augmentée légèrement en raison des harmoniques des courants d'alimentation. La même limite d'approximation supérieure de 500 mV (crête) que pour l'alimentation sinusoïdale est recommandée.

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 peak rise time t_r 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.

10 Bearing currents

When operating a motor at sinusoidal voltage, a shaft voltage is induced in the conducting loop comprising the shaft, the bearings, the end-shields and the housing (see Figure 9) by a ring flux in the stator yoke. The ring flux is caused by irregularities within the yoke (e.g. dovetailed punchings to clamp the core, ventilation ducts, magnetic anisotropies of the laminations). Normally the shaft voltage is predominantly of power frequency, superimposed by a component of three-times the power frequency caused by saturation effects. 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 in case of a conducting coupling. 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.

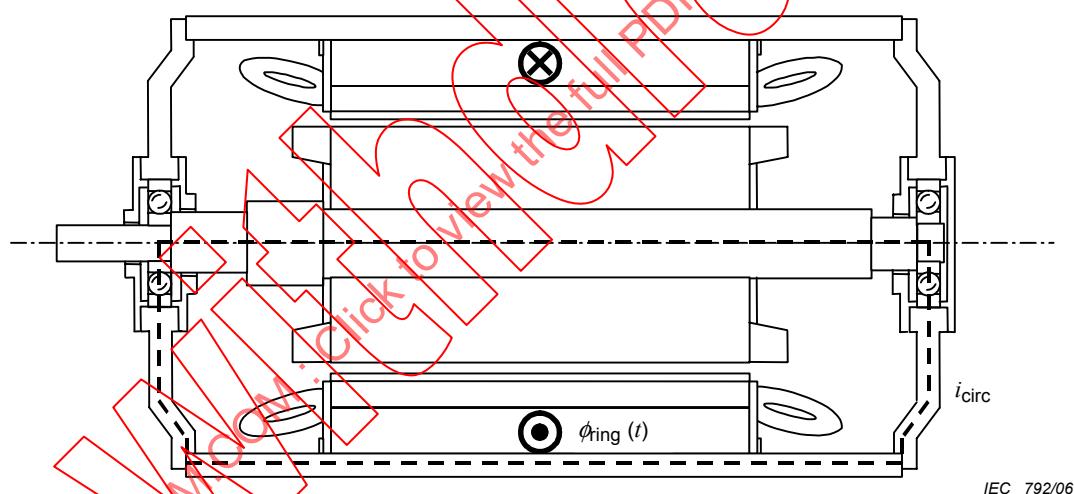


Figure 9 – Ring flux including shaft voltage and resulting circulating current i_{circ}

During current source converter operation the shaft voltage is increased slightly caused by the harmonics of the supplying currents. The same approximate upper limit 500 mV (peak) as for sinusoidal supply is recommended.