

# **RAPPORT TECHNIQUE TECHNICAL REPORT**

**CEI  
IEC  
34-17**

Première édition  
First edition  
1992-11

---

---

## **Machines électriques tournantes**

### **Partie 17:**

Guide d'application des moteurs à induction  
à cage alimentés par convertisseurs

## **Rotating electrical machines**

### **Part 17:**

Guide for the application of cage induction motors  
when fed from converters



Numéro de référence  
Reference number  
CEI/IEC 34-17: 1992

## Révision de la présente publication

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu par la Commission afin d'assurer qu'il reflète bien l'état actuel de la technique.

Les renseignements relatifs à ce travail de révision, à l'établissement des éditions révisées et aux mises à jour peuvent être obtenus auprès des Comités nationaux de la CEI et en consultant les documents ci-dessous:

- **Bulletin de la CEI**
- **Annuaire de la CEI**
- **Catalogue des publications de la CEI**  
Publié annuellement

## Terminologie

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la Publication 50 de la CEI: Vocabulaire Electrotechnique International (VEI), qui est établie sous forme de chapitres séparés traitant chacun d'un sujet défini, l'Index général étant publié séparément. Des détails complets sur le VEI peuvent être obtenus sur demande.

Les termes et définitions figurant dans la présente publication ont été soit repris du VEI, soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

## Symboles graphiques et littéraux

Pour les symboles graphiques, symboles littéraux et signes d'usage général approuvés par la CEI, le lecteur consultera:

- la Publication 27 de la CEI: Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique;
- la Publication 617 de la CEI: Symboles graphiques pour schémas.

Les symboles et signes contenus dans la présente publication ont été soit repris des Publications 27 ou 617 de la CEI, soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

## Publications de la CEI établies par le même Comité d'Etudes

L'attention du lecteur est attirée sur le deuxième feuillet de la couverture, qui énumère les publications de la CEI préparées par le Comité d'Etudes qui a établi la présente publication.

## Revision of this publication

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC, thus ensuring that the content reflects current technology.

Information on the work of revision, the issue of revised editions and amendment sheets may be obtained from IEC National Committees and from the following IEC sources:

- **IEC Bulletin**
- **IEC Yearbook**
- **Catalogue of IEC Publications**  
Published yearly

## Terminology

For general terminology, readers are referred to IEC Publication 50: International Electrotechnical Vocabulary (IEV), which is issued in the form of separate chapters each dealing with a specific field, the General Index being published as a separate booklet. Full details of the IEV will be supplied on request.

The terms and definitions contained in the present publication have either been taken from the IEV or have been specifically approved for the purpose of this publication.

## Graphical and letter symbols

For graphical symbols, and letter symbols and signs approved by the IEC for general use, readers are referred to:

- IEC Publication 27: Letter symbols to be used in electrical technology;
- IEC Publication 617: Graphical symbols for diagrams.

The symbols and signs contained in the present publication have either been taken from IEC Publications 27 or 617, or have been specifically approved for the purpose of this publication.

## IEC publications prepared by the same Technical Committee

The attention of readers is drawn to the back cover, which lists IEC publications issued by the Technical Committee which has prepared the present publication.

# RAPPORT TECHNIQUE TECHNICAL REPORT

**CEI  
IEC  
34-17**

Première édition  
First edition  
1992-11

---

---

## Machines électriques tournantes

### Partie 17:

Guide d'application des moteurs à induction  
à cage alimentés par convertisseurs

## Rotating electrical machines

### Part 17:

Guide for the application of cage induction motors  
when fed from converters

© CEI 1992 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 pro-  
cédé, 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.

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale 3, rue de Varembe Genève, Suisse

---

---



Commission Electrotechnique Internationale  
International Electrotechnical Commission  
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX  
PRICE CODE

**M**

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

## SOMMAIRE

|                                                                              | Pages |
|------------------------------------------------------------------------------|-------|
| AVANT-PROPOS .....                                                           | 4     |
| INTRODUCTION .....                                                           | 6     |
| Articles                                                                     |       |
| 1    Domaine d'application .....                                             | 8     |
| 2    Documents de référence .....                                            | 8     |
| 3    Caractéristiques du moteur .....                                        | 8     |
| 4    Spectre de fréquence de la tension et/ou des courants .....             | 10    |
| 5    Pertes supplémentaires .....                                            | 12    |
| 6    Déclassement du couple pendant le fonctionnement du convertisseur ..... | 14    |
| 7    Couples oscillatoires .....                                             | 14    |
| 8    Bruit d'origine magnétique .....                                        | 16    |
| 9    Durée de vie du système d'isolation .....                               | 16    |
| 10   Tensions d'arbre .....                                                  | 18    |
| Figures .....                                                                | 20    |

## CONTENTS

|                                                       | Page |
|-------------------------------------------------------|------|
| FOREWORD .....                                        | 5    |
| INTRODUCTION .....                                    | 7    |
| Clause                                                |      |
| 1 Scope .....                                         | 9    |
| 2 Reference documents .....                           | 9    |
| 3 Characteristics of the motor .....                  | 9    |
| 4 Frequency spectrum of voltage and/or currents ..... | 11   |
| 5 Additional losses .....                             | 13   |
| 6 Torque deratings during converter operation .....   | 15   |
| 7 Oscillating torques .....                           | 15   |
| 8 Magnetically excited noise .....                    | 17   |
| 9 Service life of the insulation system .....         | 17   |
| 10 Shaft voltages .....                               | 19   |
| Figures .....                                         | 21   |

## COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

## MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES

Partie 17: Guide d'application des moteurs à induction  
à cage alimentés par convertisseurs

## AVANT-PROPOS

- 1) Les décisions ou accords officiels de la CEI en ce qui concerne les questions techniques, préparés par des Comités d'Etudes où sont représentés tous les Comités nationaux s'intéressant à ces questions, expriment dans la plus grande mesure possible un accord international sur les sujets examinés.
- 2) Ces décisions constituent des recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux.
- 3) Dans le but d'encourager l'unification internationale, la CEI exprime le vœu que tous les Comités nationaux adoptent dans leurs règles nationales le texte de la recommandation de la CEI, dans la mesure où les conditions nationales le permettent. Toute divergence entre la recommandation de la CEI et la règle nationale correspondante doit, dans la mesure du possible, être indiquée en termes clairs dans cette dernière.

Le présent Rapport technique a été établi par le Comité d'Etudes n° 2 de la CEI: Machines tournantes.

Le texte de ce rapport est issu des documents suivants:

| Règle des Six Mois | Rapport de vote |
|--------------------|-----------------|
| 2(BC)566           | 2(BC)569        |

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

Ce rapport est un Rapport technique de type 3, de caractère entièrement informatif. Il ne doit pas être considéré comme Norme internationale.

## INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

## ROTATING ELECTRICAL MACHINES

**Part 17: Guide for the application  
of cage induction motors when fed from converters**

## FOREWORD

- 1) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, prepared by Technical Committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.
- 2) They have the form of recommendations for international use and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 3) In order to promote international unification, the IEC expresses the wish that all National Committees should adopt the text of the IEC recommendation for their national rules in so far as national conditions will permit. Any divergence between the IEC recommendation and the corresponding national rules should, as far as possible, be clearly indicated in the latter.

This Technical Report has been prepared by IEC Technical Committee No. 2: Rotating machinery.

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

| Six Months' Rule | Report on Voting |
|------------------|------------------|
| 2(CO)566         | 2(CO)569         |

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

This report is a Technical Report of type 3 and is of a purely informative nature. It is not to be regarded as an International Standard.

## INTRODUCTION

Les caractéristiques de performance et les informations de fonctionnement des entraînements par moteurs à induction à cage alimentés par convertisseur sont influencées par le système complet, comprenant le réseau d'alimentation, le convertisseur, le moteur asynchrone, la transmission mécanique et l'équipement de commande. Chacun d'entre eux existe dans de nombreux types techniques. Toutes valeurs citées sont donc uniquement données à titre indicatif.

Compte tenu des corrélations complexes de construction des systèmes et de la variété des conditions de fonctionnement, la spécification des valeurs numériques ou des valeurs limites de toutes les caractéristiques qui sont importantes pour la conception de l'entraînement est en dehors du domaine d'application et des objectifs du présent Rapport technique.

En pratique, les entraînements sont constitués de composants de plus en plus variés, produits par différents constructeurs. L'objet du présent Rapport 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.

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC TR 34-17:1992



## 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, asynchronous motor, mechanical shafting and control equipment. Each of these exists in a number of technical types. Any values quoted are thus indicative only.

In view of the complex systems engineering interrelations and the variety of operating conditions, it is beyond the scope and objectives of this Technical Report to specify numerical or limiting values for all the characteristics which are important for the design of the drive.

In practice, drives consist, to an increasing extent, of components produced by different manufacturers. The object of this Technical Report is to explain and quantify, as far as possible, the criteria for the selection of components and their bearing on the performance characteristics of the drive.

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC TR 60027-1992

## MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES

### Partie 17: Guide d'application des moteurs à induction à cage alimentés par convertisseurs

#### 1 Domaine d'application

Le présent Rapport technique traite du fonctionnement en régime établi des moteurs à induction à cage, compris dans le domaine d'application de la CEI 34-12, alimentés par convertisseurs. Il couvre le fonctionnement dans une plage de vitesse donnée, mais ne traite ni du démarrage ni des phénomènes transitoires.

Seuls les convertisseurs du type indirect sont pris en considération. Ce type comprend les convertisseurs à courant continu imposé dans le circuit intermédiaire (convertisseurs de courant) et les convertisseurs à tension de courant continu imposée (convertisseurs de tension), soit du type pleine onde, soit du type à commande par impulsions, sans restriction sur le nombre d'impulsions, leur largeur et sur leur taux de répétition. Au sens du présent Rapport technique un convertisseur peut comporter des transistors, des thyristors ou des thyristors GTO comme semi-conducteurs de puissance, avec des électroniques de commande analogiques ou numériques.

#### 2 Documents de référence

CEI 34-1: 1983, *Machines électriques tournantes – Partie 1: Caractéristiques assignées et caractéristiques de fonctionnement*

CEI 34-6: 1991, *Machines électriques tournantes – Partie 6: Modes de refroidissement (Code IC)*

CEI 34-12: 1980, *Machines électriques tournantes – Partie 12: 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*

CEI 72, *Dimensions et séries de puissances des machines électriques tournantes*

#### 3 Caractéristiques du moteur

Le courant de sortie d'un convertisseur 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 des circuits de commutation.

Dans le cas de convertisseurs 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: Guide for the application of cage induction motors when fed from converters

#### 1 Scope

This Technical Report deals with the steady-state operation of cage induction motors falling within the scope of IEC 34-12, when fed from converters. It covers the operation over a speed setting range, but does not deal with starting or transient phenomena.

Only indirect type converters are dealt with. This type comprises converters with imposed direct current in the intermediate circuit (I-converter) and converters with impressed d.c. voltage (U-converter), either of the block type or the pulse controlled type without restriction on pulse number, pulse width or pulse repetition ratio. For the purpose of this Technical Report, a converter may include transistors, thyristors or GTO-thyristors as power semiconductors, with analog or digital control electronics.

#### 2 Reference documents

IEC 34-1: 1983, *Rotating electrical machines – Part 1: Rating and performance*

IEC 34-6: 1991, *Rotating electrical machines – Part 6: Methods of cooling (IC Code)*

IEC 34-12: 1980, *Rotating electrical machines – Part 12: Starting performance of single-speed three-phase cage induction motors for voltages up to and including 660 V*

IEC 72, *Dimensions and output series for rotating electrical machines*

#### 3 Characteristics of the motor

The output current of an I-converter passes through the stator winding of the motor during the commutating period. Therefore a knowledge of the motor equivalent circuit is necessary for the design of the commutating circuits.

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

Les conditions marginales ci-dessus sont importantes pour la fiabilité de fonctionnement de base de l'entraînement. Si des détails sont exigés sur les couples additionnels qui se produisent lors du fonctionnement du convertisseur (en particulier les couples oscillatoires) et sur les pertes, dans ce cas une connaissance des paramètres du circuit équivalent du moteur au travers du spectre des harmoniques sera exigée.

Un circuit équivalent de moteur valable de façon générale ne peut être spécifié, en raison des actuelles variantes de conception des moteurs à induction à cage ayant des caractéristiques de conception N (par exemple utilisation de rotors à barres en cuivre à encoches profondes et de rotors double-cage en aluminium) et en raison de la large bande de fréquences des harmoniques les plus importantes (fluctuation couvrant environ de 300 Hz à 2 000 Hz). En règle générale il n'est pas permis, pour le calcul des couples et des pertes, d'utiliser les grandeurs à partir du circuit équivalent à un fonctionnement en régime établi à la fréquence du réseau (par exemple les inductances de fuite en fonctionnement normal.) Le constructeur du moteur peut indiquer les valeurs appropriées pour le circuit équivalent uniquement si le spectre de fréquence des courants et/ou des tensions imposé par le convertisseur est connu.

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

Compte tenu du déclassement du couple, et des couples oscillatoires excités par des harmoniques, il est important de connaître le résidu harmonique relatif des tensions et/ou des courants du moteur comparés à celui qui se produit en fonctionnement avec une tension d'alimentation sinusoïdale.

La figure 1 montre les caractéristiques typiques en fonction du temps du courant de phase du moteur dans le cas d'un entraînement à convertisseur de courant. Les harmoniques d'ordre  $n = 5; 7; 11; 13$  ont une importance en pratique. Le résidu harmonique relatif dépend uniquement des périodes de commutation qui peuvent différer dans différents entraînements, et il pourrait être exprimé par une valeur numérique unique, par exemple par  $HVF = \sqrt{\sum (U_n^2/n)}$  conformément à 12.2.1 de la CEI 34-1. Malheureusement, cette procédure n'offre aucun avantage: pour un HVF donné des déclassements du couple d'un taux de 1 à 3 peuvent être nécessaires en fonction du moteur utilisé. Les moteurs entrant dans le domaine d'application de la CEI 34-12 diffèrent dans la conception de leurs parties actives à un point tel que le constructeur du moteur doit déterminer les facteurs individuels de déclassement par calcul.

Dans le cas des convertisseurs de tension, diverses formes d'impulsions sont utilisées (et elles peuvent être modifiées dans la plage de réglage de la fréquence). Il n'est donc pas possible d'établir une quelconque règle générale sur le résidu harmonique relatif. La figure 2 montre les caractéristiques typiques en fonction du temps de la tension de phase du moteur pour ce mode de fonctionnement. Pour des règles précises, il est nécessaire que le spectre harmonique de la tension de sortie du convertisseur soit connu et que ses répercussions sur le moteur soient étudiées. Les fréquences qui se produisent sont à la fois dans la plage d'harmoniques de rang  $n = 5; 7; 11; 13$  et proches des multiples de la fréquence d'impulsion. Pour ce qui concerne les effets des harmoniques, la modulation est, en général, d'autant plus favorable que les harmoniques de rang inférieur sont le plus efficacement supprimés.

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

Due to the existing design variants of cage induction motors with Design N characteristics (for example, copper deep-bar rotors and aluminium double-cage rotors are used) and due to the wide range of frequencies of the most important harmonics (fluctuation band approximately 300 Hz to 2 000 Hz), 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. normal running leakage inductances) for the calculation of torques and losses. The motor manufacturer can indicate the appropriate values for the equivalent circuit only if the frequency spectrum of currents and/or voltages impressed by the converter is known.

#### 4 Frequency spectrum of voltage and/or currents

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

Figure 1 shows the typical time characteristics of the motor phase current in the case of an I-converter drive. Harmonics of the order  $n = 5; 7; 11; 13$  are of practical importance. The relative harmonic content depends only on the commutating periods which may differ in different drives, and could be expressed by one single numerical value, for example, by  $HVF = \sqrt{\sum (U_n^2/n)}$  according to 12.2.1 of IEC 34-1. Unfortunately, this procedure offers no advantage: for a given HVF torque, deratings with a ratio of 1 to 3 may be necessary depending on the motor used. Motors within the scope of IEC 34-12 differ in the design of their active parts to such an extent that the motor manufacturer has to determine individual derating factors by calculation.

In the case of U-converters, a variety of pulse patterns is used (and may be varied throughout the frequency setting range). It is thus not possible to make any global statement on the relative harmonic content. Figure 2 shows the typical time characteristics of motor phase voltage for this mode of operation. For definite statements it is necessary that the harmonic spectrum of the converter output voltage is known and that its repercussions on the motor are studied. The frequencies which occur are both within the range of the harmonic orders  $n = 5; 7; 11; 13$  and near to the multiples of the pulse frequency. With regard to the effects of harmonics, the modulation is, in general, all the more favourable the more effectively the low harmonic orders are suppressed.

## 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. Ces pertes peuvent être importantes dans le cas de moteurs alimentés par convertisseurs de tension mais elles sont pratiquement négligeables s'ils sont alimentés par convertisseurs de courant.

Un autre type de pertes fer, dites pertes par commutation, existe lors du fonctionnement à partir de convertisseurs de courant. Le rapide changement de sens 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 tension car les courants de commutation ne circulent pas dans les enroulements du moteur.

Les pertes supplémentaires les plus importantes provoquées par les harmoniques sont les pertes joule dans le stator et le rotor. Pour les deux types de convertisseurs, les pertes supplémentaires dans l'enroulement rotorique dépendent de la construction du rotor (géométrie des encoches). Les rotors avec des déplacements de courant prononcés sont spécialement sensibles à ces pertes. Dans le cas des convertisseurs de tension, en plus du déplacement de courant, la réactance de fuite est un élément de conception important car elle limite les courants harmoniques qui sont à l'origine des pertes. En cas d'alimentation à partir d'un convertisseur de tension les pertes rotor ne dépendent pas de la charge.

Il n'existe pas de modèle de calcul simple pour les pertes supplémentaires et aucune règle générale ne peut être établie au sujet de leur valeur. Leur dépendance par rapport aux différentes caractéristiques physiques est très complexe, de même qu'il existe une grande variété à la fois de convertisseurs (par exemple convertisseurs 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). Si dans le cas d'un convertisseur de tension, la fréquence d'impulsion n'est pas supérieure à environ 10 fois la fréquence de fonctionnement, les pertes supplémentaires sont plus importantes avec un convertisseur de tension qu'avec un convertisseur de courant. Un autre principe de base est que les pertes supplémentaires dépendent plus de la charge lorsque le moteur est alimenté à partir d'un convertisseur de courant que s'il est alimenté à partir d'un convertisseur de tension.

Les colonnes de la figure 3 montrent à titre d'exemple, l'allure des pertes calculées d'un moteur spécifique (Désignation 160 L, voir CEI 72, caractéristiques de conception N, voir CEI 34-12) alimenté à partir de différents convertisseurs présentant différents résidus d'harmoniques et alimentés à partir d'un réseau sinusoïdal. L'exemple illustre l'importance relative des différents types de pertes pour les systèmes de convertisseurs les plus largement utilisés à ce jour. La comparaison ne peut être étendue à d'autres moteurs à induction à cage alimentés par convertisseurs. La figure 3 suppose que pendant le fonctionnement du convertisseur, les fondamentaux des tensions et courants sont, dans tous les cas, les mêmes que dans les conditions assignées. La tension continue dans le circuit intermédiaire, nécessaire pour ce type de fonctionnement, ne peut pas être fournie si le convertisseur est connecté à un réseau de tension constante, et, à cet égard, certaines des valeurs présentées en figure 3 sont fictives.



## 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 harmonics of the phase voltages. These losses may be important in case of motors fed from U-converters, but they are nearly negligible when fed from I-converters.

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

The most important additional losses caused by harmonics are the winding losses in stator and rotor. For both types of converter the additional rotor winding losses depend on the rotor construction (slot geometry). Rotors with pronounced current displacement are especially sensitive to these losses. In the case of U-converters, in addition to current displacement, the leakage reactance is a most important design feature because it limits the harmonic currents which are responsible for the losses. The rotor losses when supplied from a U-converter do not depend on the load.

There is no simple calculation scheme for the additional losses and no general statement can be made about their value. Their dependence upon the different physical figures is very complex, also there is a great variety both of converters (e.g. I- and U-converters with different pulse frequencies and pulse patterns) and of motors (e.g. kind of winding, skewing, slot geometry). If, in the case of a U-converter the pulse frequency does not exceed approximately 10 times the operation frequency, the additional losses are greater with a U-converter than with an I-converter. Another basic principle is that the additional losses are more dependent on load when a motor is fed from an I-converter than when it is fed from a U-converter.

The columns in figure 3 show, as an example, the calculated loss structure of a specific motor (frame size 160 L, see IEC 72, design N characteristics, see IEC 34-12) when supplied 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. Figure 3 assumes that during converter operation the fundamental voltages and currents in all cases are the same as under rated conditions. The d.c. voltage in the intermediate circuit, necessary for this kind of operation, could not be delivered if the converter were connected to a network of constant voltage and, to that extent, some of the values presented in figure 3 are fictitious.

## 6 Déclassement du couple pendant le fonctionnement du convertisseur

Dans le cas d'un fonctionnement du convertisseur à la fréquence assignée du moteur, le couple disponible est généralement inférieur à celui obtenu à partir d'une tension sinusoïdale. La réduction résulte de l'échauffement dû aux pertes harmoniques, ainsi qu'à la caractéristique tension-fréquence de certains convertisseurs.

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 des harmoniques du convertisseur est connu. Cet échauffement dépend de la conception individuelle du moteur et du mode de refroidissement (IC 01 ou IC 0141; voir CEI 34-6). 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 entre 0 et 20 %.

Certains convertisseurs sont conçus selon la ligne pointillée de la figure 4. Le flux fondamental à la fréquence assignée est alors inférieur à celui obtenu à partir d'une alimentation sinusoïdale. Une telle alimentation par convertisseur conduit à une réduction de couple plus élevée à la fréquence assignée du moteur.

Le fait d'être à l'intérieur de la plage de réglage de la vitesse à partir de la vitesse synchrone jusqu'à  $U_1/f = \text{constante}$  conduit à un couple maximal constant si la résistance de l'enroulement statorique est négligeable par rapport à la réactance du moteur. Pour compenser l'effet de la résistance 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 qu'on obtiendrait en l'absence d'une telle compensation.

Au-dessus d'une certaine tension (dans la figure 4 au-dessus de la tension assignée) la tension de sortie du convertisseur est constante car la fréquence augmente (fonctionnement en défluxé). Si la relation entre la tension et la fréquence change de cette façon à l'intérieur de la plage de réglage de la fréquence, le facteur de déclassement change.

La figure 5 montre un exemple d'une courbe de déclassement pour un moteur typique alimenté par un convertisseur de courant. La courbe avec entraînement par convertisseur 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 0141) 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, mais, en général, les moteurs alimentés à partir de convertisseurs à commande par impulsions (fréquence d'impulsion dans la plage des kHz) exigent de plus faibles déclassements que ceux alimentés à partir de convertisseurs pleine onde. Comme la fréquence d'impulsion est augmentée, le déclassement est réduit.

## 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.



## 6 Torque deratings during converter operation

In the case of converter operation at motor rated frequency the available torque is usually smaller than on a sinusoidal voltage. The reduction results from the temperature rise due to harmonic losses, and also from the voltage-frequency characteristic of some converters.

The full-line curve in figure 4 relates to a converter which gives the same fundamental flux in the motor as on a sinusoidal supply. The motor manufacturer can determine the temperature rise for this operating point if the harmonic spectrum of the converter is known. That temperature rise depends on the individual motor design and the type of cooling (IC 01 or IC 0141; see IEC 34-6). When determining the derating factor, the thermal reserve of the particular motor is important. Taking all these matters into account the derating factor at rated frequency ranges from 0 to 20 %.

Some converters are designed according to the broken line in figure 4. The fundamental flux at rated frequency is then lower than on a sinusoidal supply. Such a converter supply leads to greater torque reduction at motor rated frequency.

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

Above a certain voltage (in figure 4 above the rated voltage) the converter output voltage is constant as the frequency increases (field weakening range). Should the relationship between voltage and frequency change in such a manner within the frequency setting range, the derating factor will change.

Figure 5 shows an example of a derating curve for a typical motor supplied by an I-converter. The curve of a U-converter drive is of similar shape. Such a curve can be given by the motor manufacturer if the harmonic spectrum and the voltage-frequency characteristics of the converter are known. Allowing for the particular cooling (IC 01 or IC 0141) and ventilation methods (self-circulation cooling or independent cooling) it is not possible to produce a curve which applies to all cases, but, in general, motors supplied from pulse-controlled converters (pulse frequency in the kHz range) require smaller reductions in rating than those supplied from block converters. As the pulse frequency is increased the derating is reduced.

## 7 Oscillating torques

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

Dans le cas de moteurs à induction triphasés alimentés par convertisseurs de courant à indice de pulsation 6, les couples oscillatoires (couples oscillatoires produits électromagnétiquement dans l'entrefer) avec 6 fois et 12 fois la fréquence de fonctionnement ( $f_1$ ) présentent une importance en pratique, l'amplitude des couples étant de l'ordre de 15 % (fréquence  $6 f_1$ ) et de 5 % (fréquence  $12 f_1$ ) du couple assigné. Un calcul précis de la fréquence propre de torsion est utile particulièrement pour les entraînements dont les éléments de transmission sont seulement légèrement amortis.

Dans le cas d'entraînement par convertisseurs à commande par impulsions, les couples oscillatoires à faibles fréquences d'impulsion (de l'ordre de  $3 f_1$ ) peuvent être beaucoup plus élevés que dans le cas d'entraînement par convertisseurs de courant. La fréquence du couple oscillatoire dominant est fixée par la fréquence d'impulsion dont l'amplitude dépend également de la largeur de l'impulsion. C'est pourquoi les amplitudes des couples oscillatoires peuvent varier dans une large plage (de moins de 10 % à plus de 50 % du couple assigné). Dans le cas des fréquences d'impulsion élevées (de l'ordre de  $21 f_1$ ) les couples oscillatoires des fréquences  $6 f_1$  et  $12 f_1$  sont toujours inférieurs à 10 % du couple assigné. De plus, des couples oscillatoires avec des amplitudes supérieures se produisent aux fréquences proches du double de la fréquence d'impulsion: cependant, ces oscillations de couple n'ont pratiquement pas d'influence sur le système entraîné.

## 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.

L'expérience a montré que, typiquement, un accroissement du niveau de bruit pondéré A dans la plage de 1 dB à 6 dB se produit pendant le fonctionnement avec convertisseurs de courant à la fréquence assignée, si on compare avec un fonctionnement à une tension sinusoïdale, et dans la gamme de 5 dB à 15 dB pendant un fonctionnement à partir de convertisseurs de tension. Les valeurs réelles dépendent du nombre de pôles du moteur, de la forme d'onde du convertisseur et d'autres facteurs.

## 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 à partir de convertisseurs de courant des pointes de tension dans le moteur se produisent pendant la période de commutation soumettant l'isolation principale à des contraintes.

Les gradients de tension qui créent des contraintes de l'isolation entre spires, particulièrement sur les bobines d'entrée, sont importants dans le cas d'alimentation par convertisseurs de tension.

In the case of three-phase induction motors supplied from I-converters in six pulse connection the oscillating torques (oscillating torques electromagnetically produced in the air gap) with 6 times and 12 times the operating frequency ( $f_1$ ) are of practical importance, the amplitude of the torques being in the order of 15 % (frequency  $6 f_1$ ) and 5 % (frequency  $12 f_1$ ) of the rated torque. A careful calculation of the natural torsional frequency is advisable, particularly for drives with transmission elements which are only slightly damped.

In the case of drives with pulse-controlled converters, the oscillating torques at low pulse frequencies (in order of  $3f_1$ ) can be much higher than in the case of drives with I-converters. The frequency of the dominant oscillating torque is fixed by the pulse frequency, the amplitude of which depends also on the pulse width. Therefore the amplitudes of oscillating torques can vary over a wide range (from less than 10 % to more than 50 % of rated torque). In the case of high pulse frequencies (in the order of  $21 f_1$ ) the oscillating torques of the frequencies  $6 f_1$  and  $12 f_1$  are always less than 10 % of rated torque. In addition, oscillating torques with greater amplitudes occur at frequencies close to twice pulse frequency; however, these torque oscillations have practically no influence on the drive system.

## 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.

Experience has shown that, typically, an increase in the A-weighted noise level in the range of 1 dB to 6 dB occurs for operation with I-converters at rated frequency compared with operation on a sinusoidal voltage, and in the range of 5 dB to 15 dB for operation from U-converters. The actual values depend upon the number of motor poles, the pulse pattern of the converter and other factors.

## 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 I-converters, peaks in the motor voltage occur during the commutating period which subject the main insulation to stresses.

The voltage gradients which stress the interturn insulation, particularly that of the line coils, are of importance in the case of supply from U-converters.

Jusqu'à maintenant il n'y a pas d'expérience pratique à long terme de l'influence quantitative des deux facteurs mentionnés ci-dessus sur la durée de vie d'un système d'isolation. On peut cependant supposer qu'aucune réduction importante de la durée de vie ne survient à partir du fonctionnement du convertisseur si les valeurs limites suivantes sont respectées:

a) Valeur crête  $U < 1\,000\text{ V}$

b)  $du/dt < 500\text{ V}/\mu\text{s}$

## 10 Tensions d'arbre

Pendant le fonctionnement du convertisseur, des pointes de tension et de courant viennent se superposer aux valeurs correspondant au régime sinusoïdal, et provoquent des tensions d'arbre supplémentaires. L'expérience montre que des tensions d'arbre supérieures à environ 500 mV (valeur crête) peuvent nécessiter une isolation des paliers antifrictions. Les moteurs couverts par le domaine d'application de la CEI 34-12 étant rarement équipés de paliers isolés, il est judicieux de mesurer la tension d'arbre pendant le fonctionnement avec convertisseur.

As yet there is no long-term practical experience of the quantitative influence of the two above-mentioned factors on the service life of the insulation system. It can, however, be assumed that no large reduction of the service life arises from converter operation if the following limit values are observed:

$$\text{a) } U_{\text{peak}} < 1\,000 \text{ V}$$

$$\text{b) } du/dt < 500 \text{ V}/\mu\text{s}$$

## 10 Shaft voltages

Additional shaft voltages are caused by voltage and current peaks which are superimposed on the symmetrical phase quantities during converter operation. Experience shows that shaft voltages higher than approximately 500 mV (peak) may necessitate insulation of antifriction bearings. As motors within the scope of IEC 34-12 are rarely fitted with bearing insulation, it is advisable to measure the shaft voltage during converter operation.

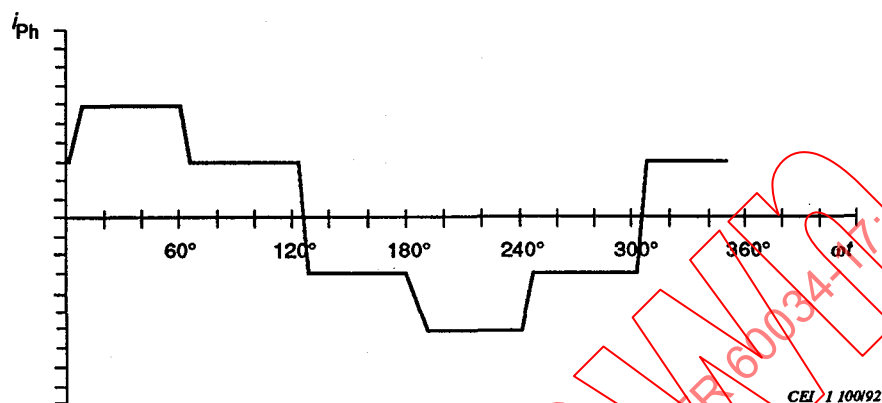


Figure 1 – Caractéristiques en fonction du temps du courant de phase  $i_{\text{phase}}$  d'un moteur couplé en triangle pour un entraînement à convertisseur de courant (exemple)

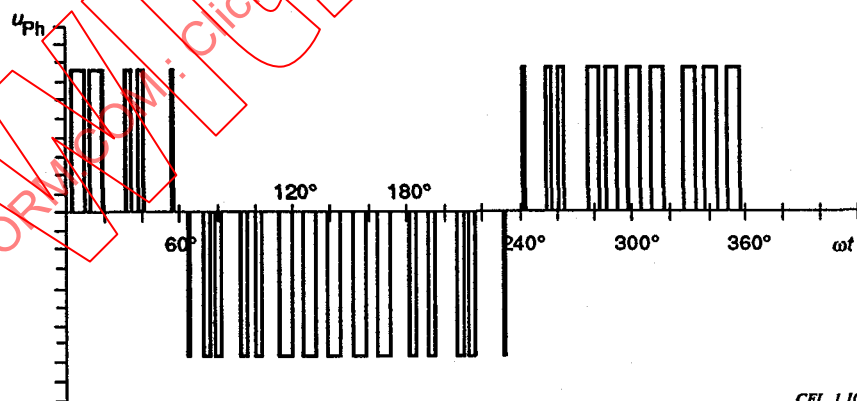


Figure 2 – Caractéristique en fonction du temps d'une tension de phase  $u_{\text{phase}}$  d'un moteur couplé en triangle pour un entraînement à convertisseur de tension avec un convertisseur à commande par impulsions de fréquences d'impulsion de  $f = 750$  Hz (pondération sinusoïdale) et une fréquence de fonctionnement de  $f_1 = 50$  Hz

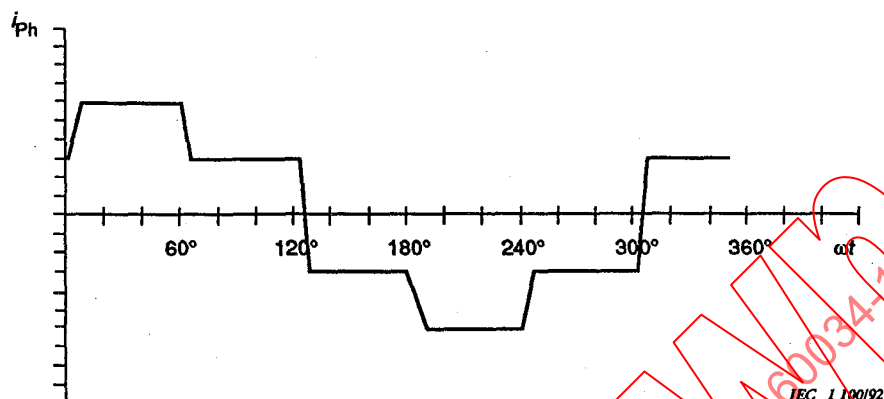


Figure 1 – Time characteristic of motor phase current  $i_{\text{phase}}$  in delta connection for an I-converter drive (example)

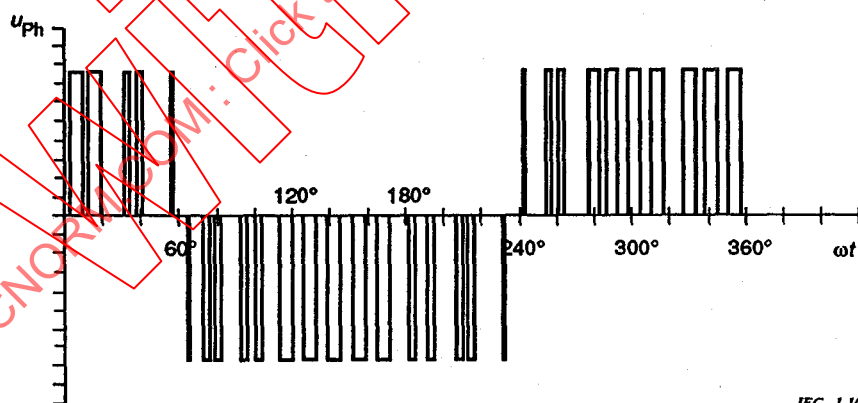


Figure 2 – Time characteristic of motor phase voltage  $u_{\text{phase}}$  in delta connection for a U-converter drive with a pulse-controlled converter with a pulse frequency of  $f = 750$  Hz (sinusoidal weighting) and an operating frequency of  $f_1 = 50$  Hz



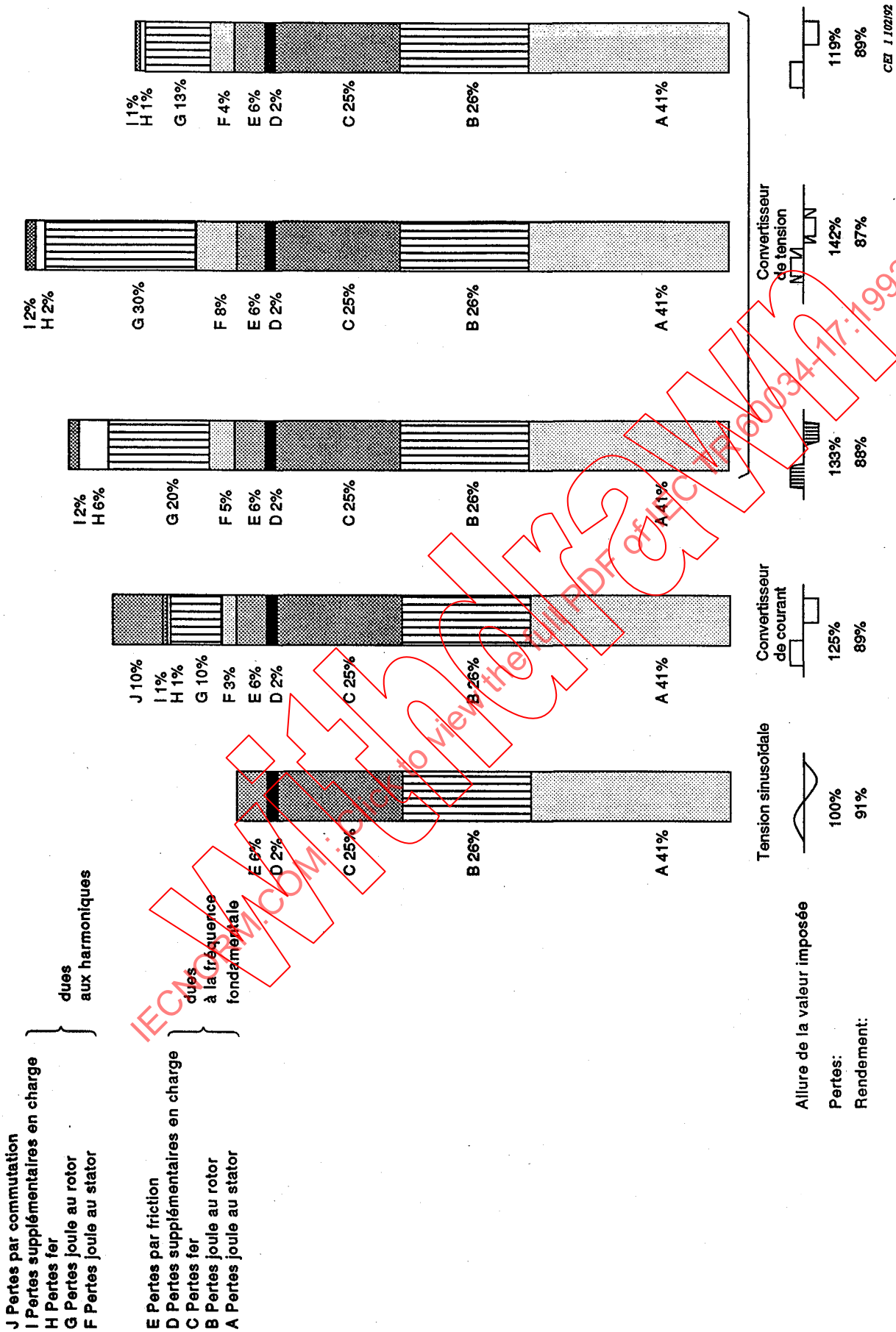


Figure 3 – Influence de l'alimentation par convertisseur sur les pertes d'un moteur à induction 160L, 2p = 4, conception N) en fonctionnement au couple et à la vitesse assignés

(Référence: J. Brandes, Zusätzliche Verluste bei Induktionsmaschinen mit Käfigläufer, 180 (1987) p. 316-321)