

**RAPPORT
TECHNIQUE
TECHNICAL
REPORT**

**CEI
IEC**

60034-17

Deuxième édition
Second edition
1998-06

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 60034-17:1998

Numéros des publications

Depuis le 1er janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000.

Publications 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.

Validité de la présente publication

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 la date de reconfirmation de la publication sont disponibles dans le Catalogue de la CEI.

Les renseignements relatifs à des questions à l'étude et des travaux en cours entrepris par le comité technique qui a établi cette publication, ainsi que la liste des publications établies, se trouvent dans les documents ci-dessous:

- «Site web» de la CEI*
- **Catalogue des publications de la CEI**
Publié annuellement et mis à jour régulièrement (Catalogue en ligne)*

Bulletin de la CEI

Disponible à la fois au «site web» de la CEI* et comme périodique imprimé

Terminologie, symboles graphiques et littéraux

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la CEI 60050: *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI)*.

Pour les symboles graphiques, les symboles littéraux et les signes d'usage général approuvés par la CEI, le lecteur consultera la CEI 60027: *Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique*, la CEI 60417: *Symboles graphiques utilisables sur le matériel. Index, relevé et compilation des feuilles individuelles*, et la CEI 60617: *Symboles graphiques pour schémas*.

Numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series.

Consolidated publications

Consolidated versions of some IEC publications including amendments are available. 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.

Validity 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 relating to the date of the reconfirmation of the publication is available in the IEC catalogue.

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 to be found at the following IEC sources:

- **IEC web site***
- **Catalogue of IEC publications**
Published yearly with regular updates (On-line catalogue)*
- **IEC Bulletin**
Available both at the IEC web site* and as a printed periodical

Terminology, graphical and letter symbols

For general terminology, readers are referred to IEC 60050: *International Electrotechnical Vocabulary (IEV)*.

For graphical symbols, and letter symbols and signs approved by the IEC for general use, readers are referred to publications IEC 60027: *Letter symbols to be used in electrical technology*, IEC 60417: *Graphical symbols for use on equipment. Index, survey and compilation of the single sheets* and IEC 60617: *Graphical symbols for diagrams*.

* Voir adresse «site web» sur la page de titre.

* See web site address on title page.

RAPPORT TECHNIQUE – TYPE 2

**CEI
IEC**

TECHNICAL REPORT – TYPE 2

60034-17

Deuxième édition
Second edition
1998-06

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 1998 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
Telefax: +41 22 919 0300

3, rue de Varembe Geneva, Switzerland
e-mail: inmail@iec.ch IEC web site <http://www.iec.ch>



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

N

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

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	4
INTRODUCTION	8
Articles	
1 Domaine d'application.....	10
2 Références normatives	10
3 Caractéristiques du moteur	10
4 Spectre de fréquence de la tension et/ou des courants.....	12
5 Pertes supplémentaires	14
6 Déclassement du couple pendant le fonctionnement du convertisseur.....	16
7 Couples oscillatoires.....	16
8 Bruit d'origine magnétique	18
9 Durée de vie du système d'isolation	18
10 Tensions d'arbre.....	20
11 Vitesse maximale de sécurité en fonctionnement	20
Figure 1 – Forme d'onde du courant de phase i_{phase} avec couplage en triangle pour une alimentation par convertisseur de courant (exemple théorique).....	22
Figure 2 – Forme d'onde de la tension de phase u_{phase} avec couplage en triangle pour une alimentation par convertisseur de tension avec fréquence d'impulsion $f_p = 15 \times f_1$ (exemple).....	22
Figure 3 – Influence de l'alimentation par convertisseur sur les pertes d'un moteur à induction à cage (désignation 315 M, conception N) en fonctionnement à couple et vitesse assignés	24
Figure 4 – Tension fondamentale U_1 en fonction de la fréquence de fonctionnement f_1 (voir l'article 6).....	26
Figure 5 – 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 courant, en fonction de la fréquence de fonctionnement f_1 (exemple)	26
Figure 6 – Courbe limite de tension d'impulsion admissible $\hat{U}_{LL}$ (incluant la réflexion et l'amortissement de la tension) entre bornes du moteur en fonction du temps de montée t_a	28
Figure 7 – Définition du temps de montée de la tension aux bornes du moteur	28

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
INTRODUCTION	9
Clause	
1 Scope	11
2 Normative references	11
3 Characteristics of the motor.....	11
4 Frequency spectrum of voltage and/or currents.....	13
5 Additional losses	15
6 Torque derating during converter operation	17
7 Oscillating torques	17
8 Magnetically excited noise	19
9 Service life of the insulation system	19
10 Shaft voltages	21
11 Maximum safe operating speed	21
Figure 1 – Waveform of phase current i_{phase} in delta connection for I-converter supply (idealized example)	23
Figure 2 – Waveform of phase voltage u_{phase} in delta connection for U-converter supply with pulse frequency $f_p = 15 \times f_1$ (example).....	23
Figure 3 – Influence of converter supply on the losses of a cage induction motor (frame size 315 M, design N) with rated values of torque and speed	25
Figure 4 – Fundamental voltage U_1 as a function of operating frequency f_1 (see clause 6)	27
Figure 5 – Torque derating factor for cage induction motors of design N, IC 0141 (self-circulating cooling) for I-converter supply as a function of operating frequency f_1 (example)	27
Figure 6 – Limiting curve of admissible impulse voltage $\hat{U}_{LL}$ (including voltage reflection and damping) at the motor terminals as a function of the rise time t_a	29
Figure 7 – Definition of the rise time t_a of the voltage at the motor terminals	29

COMMISSION ELECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES –

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

AVANT-PROPOS

- 1) La CEI (Commission Electrotechnique Internationale) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI, entre autres activités, publie des Normes Internationales. Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI en ce qui concerne 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'étude.
- 3) Les documents produits se présentent sous la forme de recommandations internationales. Ils sont publiés comme normes, rapports techniques ou guides et agréés comme tels par les Comités nationaux.
- 4) Dans le but d'encourager l'unification internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent à appliquer de façon transparente, dans toute la mesure possible, les Normes internationales de la CEI dans leurs normes nationales et régionales. Toute divergence entre la norme de la CEI et la norme nationale ou régionale correspondante doit être indiquée en termes clairs dans cette dernière.
- 5) La CEI n'a fixé aucune procédure concernant le marquage comme indication d'approbation et sa responsabilité n'est pas engagée quand un matériel est déclaré conforme à l'une de ses normes.
- 6) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Norme internationale 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'élaborer des Normes internationales. Exceptionnellement, un comité d'études peut proposer la publication d'un rapport technique de l'un des types suivants:

- type 1, lorsque, en dépit de maints efforts, l'accord requis ne peut être réalisé en faveur de la publication d'une Norme internationale;
- type 2, lorsque le sujet en question est encore en cours de développement technique ou lorsque, pour une raison quelconque, la possibilité d'un accord pour la publication d'une Norme internationale peut être envisagée pour l'avenir mais pas dans l'immédiat;
- type 3, lorsqu'un comité d'études a réuni des données de nature différente de celles qui sont normalement publiées comme Normes internationales, cela pouvant comprendre, par exemple, des informations sur l'état de la technique.

Les rapports techniques de types 1 et 2 font l'objet d'un nouvel examen trois ans au plus tard après leur publication afin de décider éventuellement de leur transformation en Normes internationales. Les rapports techniques de type 3 ne doivent pas nécessairement être révisés avant que les données qu'ils contiennent ne soient plus jugées valables ou utiles.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

ROTATING ELECTRICAL MACHINES –

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

FOREWORD

- 1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, the IEC publishes International Standards. Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. The IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested National Committees.
- 3) The documents produced have the form of recommendations for international use and are published in the form of standards, Technical Reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.
- 5) The IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with one of its standards.
- 6) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this International Standard may be the subject of patent rights. The IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

The main task of IEC technical committees is to prepare International Standards. In exceptional circumstances, a technical committee may propose the publication of a technical report of one of the following types:

- type 1, when the required support cannot be obtained for the publication of an International Standard, despite repeated efforts;
- type 2, when the subject is still under technical development or where for any other reason there is the future but not immediate possibility of an agreement on an International Standard;
- type 3, when the technical committee has collected data of a different kind from that which is normally published as an International Standard, for example 'state of the art'.

Technical reports of types 1 and 2 are subject to review within three years of publication to decide whether they can be transformed into International Standards. Technical reports of type 3 do not necessarily have to be reviewed until the data they provide are considered to be no longer valid or useful.

La CEI 60034-17, rapport technique de type 2 a été établie par le comité d'études 2 de la CEI: Machines tournantes.

Cette seconde édition annule et remplace la première édition parue en 1992 et constitue une révision technique.

Le texte de ce rapport technique est issu des documents suivants:

Projet de comité	Rapport de vote
2/978/CDV	2/994/RVC

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

Le présent document est publié dans la série des rapports techniques de type 2 (conformément au paragraphe G.3.2.2 de la partie 1 des *Directives (ISO/CEI)* comme «norme prospective d'application provisoire» dans le domaine des machines électriques tournantes car il est urgent d'avoir des indications sur la meilleure façon d'utiliser les normes dans ce domaine afin de répondre à un besoin déterminé.

Ce document ne doit pas être considéré comme une «Norme internationale». Il est proposé pour une mise en œuvre provisoire, dans le but de recueillir des informations et d'acquérir de l'expérience quant à son application dans la pratique. Il est de règle d'envoyer les observations éventuelles relatives au contenu de ce document au Bureau Central de la CEI.

Il sera procédé à un nouvel examen de ce rapport technique de type 2 trois ans au plus tard après sa publication, avec la faculté d'en prolonger la validité pendant trois autres années, de le transformer en Norme internationale ou de l'annuler.

IEC 60034-17, which is a technical report of type 2, has been prepared by IEC technical committee 2: Rotating machinery.

This second edition cancels and replaces the first edition published in 1992 and constitutes a technical revision.

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

Committee draft	Report on voting
2/978/CDV	2/994/RVC

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

This document is issued in the type 2 technical report series of publications (according to G.3.2.2 of part 1 of the *ISO/IEC Directives*) as a 'prospective standard for provisional application' in the field of rotating electrical machines because there is an urgent requirement for guidance on how standards in this field should be used to meet an identified need.

This document is not to be regarded as an 'International Standard'. It is proposed for provisional application so that information and experience of its use in practice may be gathered. Comments on the content of this document should be sent to the IEC Central Office.

A review of this type 2 technical report will be carried out not later than three years after its publication with the options of extension for another three years or conversion either to an International Standard or withdrawal.

INTRODUCTION

Les caractéristiques de performance et les données de fonctionnement des entraînements par moteurs à induction à cage alimentés par convertisseurs dépendent du système complet, comprenant le réseau d'alimentation, le convertisseur, le moteur à induction, la transmission mécanique et l'équipement de commande. Chacun de ces composants existe dans de nombreuses variantes techniques. Toutes les valeurs citées dans le présent rapport 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 les objectifs du présent rapport technique n'incluent pas la spécification des valeurs numériques ou des valeurs limites de toutes les grandeurs importantes pour la conception de l'entraînement.

Dans la pratique courante, les entraînements sont de plus en plus fréquemment constitués de composants produits par différents constructeurs. L'objet 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.

INTRODUCTION

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

MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES –

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

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 60034-12, lorsqu'ils sont alimentés par convertisseurs. Il couvre le fonctionnement dans toute la plage de réglage de vitesse, mais ne traite ni du démarrage ni des phénomènes transitoires.

Seuls les convertisseurs de type indirect sont pris en considération. Ce type comprend les convertisseurs à courant continu imposé dans le circuit intermédiaire (convertisseurs de 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 ou leur fréquence. Pour les besoins du présent rapport 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 normatifs suivants contiennent des dispositions qui, par suite de la référence qui y est faite, constituent des dispositions valables pour le présent rapport technique. Au moment de la publication, les éditions indiquées étaient en vigueur. Tout document normatif est sujet à révision et les parties prenantes aux accords fondés sur le présent rapport technique, sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des documents normatif indiqués ci-après. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des Normes internationales en vigueur.

CEI 60034-1:1996, *Machines électriques tournantes – Partie 1: Caractéristiques assignées et caractéristiques de fonctionnement*

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

CEI 60034-12:1980, *Machines électriques tournantes – Douzième partie: Caractéristiques de démarrage des moteurs triphasés à induction à cage à une seule vitesse pour des tensions d'alimentation inférieures ou égales à 690 V*

Amendement 1 (1992)

Amendement 2 (1995)

CEI 60072, *Dimensions et séries de puissance 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 du circuit 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: Cage induction motors when fed from converters – Application guide

1 Scope

This technical report 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 (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 frequency. For the purpose of this technical report, 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 normative documents contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this technical report. At the time of publication, the editions indicated were valid. All normative documents are subject to revision, and parties to agreements based on this technical report are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent editions of the normative documents indicated below. Members of IEC and ISO maintain registers of currently valid International Standards.

IEC 60034-1:1996, *Rotating electrical machines – Part 1: Rating and performance*

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

IEC 60034-12:1980, *Rotating electrical machines – Part 12: Starting performance of single-speed three-phase cage induction motors for voltages up to and including 690 V*
Amendment 1 (1992)
Amendment 2 (1995)

IEC 60072, *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 important for the design of the commutating circuits.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

4 Frequency spectrum of voltage and/or currents

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

5 Pertes supplémentaires

Les harmoniques de tension et courant d'un moteur à induction à cage alimenté par convertisseur provoquent des pertes supplémentaires fer et Joule dans le stator et le rotor. Les pertes fer supplémentaires dépendent des amplitudes et surtout des fréquences des harmoniques des tensions de phase. Ces pertes peuvent être importantes dans le cas des 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 avec convertisseurs de courant. Le rapide changement des flux de fuite lors de la période de commutation génère des courants de Foucault dans les dents du stator et du rotor. Il n'y a pas de pertes par commutation dans le cas d'un fonctionnement à partir de convertisseurs de 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 celles dans les enroulements du stator et du rotor. Pour les deux types de convertisseurs, les pertes supplémentaires dans l'enroulement du rotor dépendent de sa conception (géométrie des encoches). Les rotors avec des déplacements de courant prononcés sont particulièrement sensibles à ces pertes. Dans le cas des convertisseurs de tension, en plus du déplacement de courant, la réactance de fuite est l'élément de conception le plus important car elle limite les courants harmoniques qui sont à l'origine des pertes. Les pertes supplémentaires du rotor ne dépendent pas de la charge en cas de fonctionnement à partir d'un convertisseur de tension. A l'opposé, en cas de convertisseur de courant, elles dépendent de la charge.

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

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

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

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

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

5 Additional losses

Harmonics of voltage and current in a cage induction motor supplied from a converter cause additional iron and winding losses in the stator and the rotor. The additional iron losses depend on the amplitudes and especially on the frequencies of the phase voltage harmonics. 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 leakage fluxes during the commutation interval generates eddy currents in the teeth of stator and rotor. There are no commutation losses in case of operation from U-converters because the commutation currents do not flow through the motor windings.

The most important additional losses caused by harmonics are those in the stator and rotor windings. For both types of converter the latter depend on the rotor design (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 the most important design feature because it limits the harmonic currents which are responsible for the losses. The additional rotor losses do not depend on the load when supplied from a U-converter. On the other hand, with an I-converter they are load-dependent.

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

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

6 Déclassement du couple pendant le fonctionnement du convertisseur

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

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

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

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

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

La figure 5 montre un exemple de courbe de déclassement pour un moteur typique alimenté par un convertisseur de 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 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 d'impulsion dans la plage des kHz) exigent de plus faibles déclassements de couple que ceux alimentés à partir de convertisseurs pleine onde. Normalement le déclassement est réduit lorsque la fréquence d'impulsion augmente.

7 Couples oscillatoires

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

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

6 Torque derating during converter operation

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

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

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

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

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

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

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

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

8 Bruit d'origine magnétique

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

Un accroissement du niveau de bruit pondéré A dans la plage de 1 dB à 6 dB se produit pendant un fonctionnement avec un convertisseur de courant à fréquence inférieure ou égale à la fréquence assignée, si on le compare avec un fonctionnement à une tension sinusoïdale à la fréquence assignée, et dans la plage de 5 dB à 15 dB pendant un fonctionnement avec un convertisseur 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 par convertisseur de courant, des pointes de tension se produisent dans le moteur pendant la période de commutation, soumettant l'isolation principale et l'isolation entre spires à des contraintes. Les gradients de tension qui créent des contraintes dans l'isolation entre spires, particulièrement sur les bobines d'entrées, sont importants dans le cas d'alimentation par convertisseur de tension.

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

Des recherches approfondies ont été menées en laboratoires et dans la pratique ont montré que le système d'isolation des moteurs à enroulements à fils, s'il est fabriqué selon la pratique générale habituelle, supportera les tensions d'impulsion de la figure 6 aux bornes sans réduction notable de durée de vie.

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

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

8 Magnetically excited noise

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

A-weighted noise level increase in the range of 1 dB to 6 dB occurs for operation with I-converters up to rated frequency compared with operation on a sinusoidal voltage at rated frequency, 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 commutation interval which stress the main and interturn insulation. The voltage gradients which stress the interturn insulation, particularly that of the line coils, are of importance in the case of supply from U-converters.

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

Extensive investigations in laboratories and in practice have shown that for motors with wire-wound windings the insulation system, when manufactured in accordance with current general practice, will endure the impulse voltages of figure 6 at the terminals without significant reduction in life-time.

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

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

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

10 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, typiquement, que des tensions d'arbre supérieures à environ 500 mV (valeur crête) exigent une isolation des paliers à roulements à billes ou à rouleaux. Cependant il convient d'être averti que certains convertisseurs peuvent amplifier les tensions d'arbre ce qui pourrait produire des courants d'arbre nuisibles à partir de valeurs inférieures de tension d'arbre. Les moteurs couverts par la CEI 60034-12 étant rarement équipés de paliers isolés, il est judicieux de mesurer la tension d'arbre pendant le fonctionnement avec convertisseur.

11 Vitesse maximale de sécurité en fonctionnement

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

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

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

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

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

10 Shaft voltages

During converter operation additional shaft voltages are caused by voltage and current peaks which are superimposed on the symmetrical phase quantities. Experience shows that, typically, shaft voltages above approximately 500 mV (peak) require an insulation of ball- or roller-bearings. However, it should be cautioned that some converters may amplify shaft voltages which could produce damaging shaft currents resulting from lower shaft voltage values. As motors within the scope of IEC 60034-12 are almost never fitted with bearing insulation, it is advisable to measure the shaft voltage during converter operation.

11 Maximum safe operating speed

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

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

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

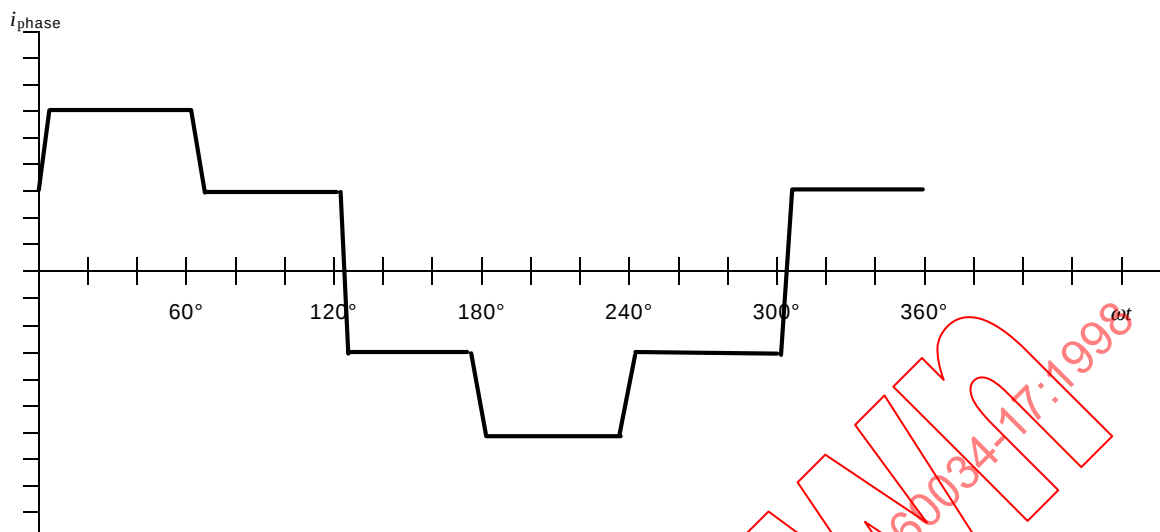


Figure 1 – Forme d'onde du courant de phase i_{phase} avec couplage en triangle pour une alimentation par convertisseur de courant (exemple théorique)



Figure 2 – Forme d'onde de la tension de phase u_{phase} avec couplage en triangle pour une alimentation par convertisseur de tension avec fréquence d'impulsion $f_p = 15 \times f_1$ (exemple)

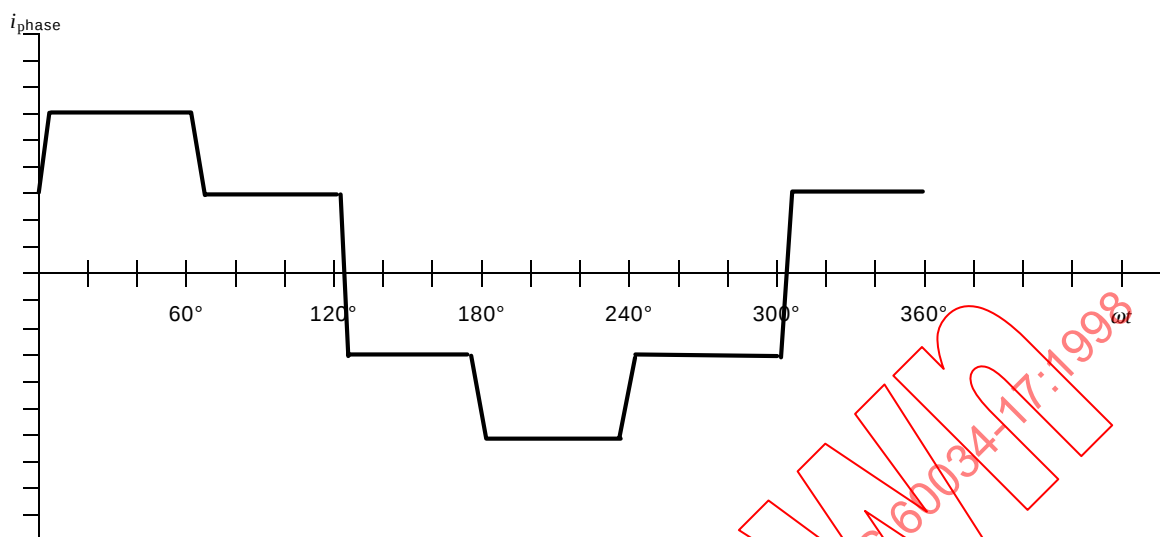


Figure 1 – Waveform of phase current i_{phase} in delta connection for I-converter supply (idealized example)



Figure 2 – Waveform of phase voltage u_{phase} in delta connection for U-converter supply with pulse frequency $f_p = 15 \times f_1$ (example)

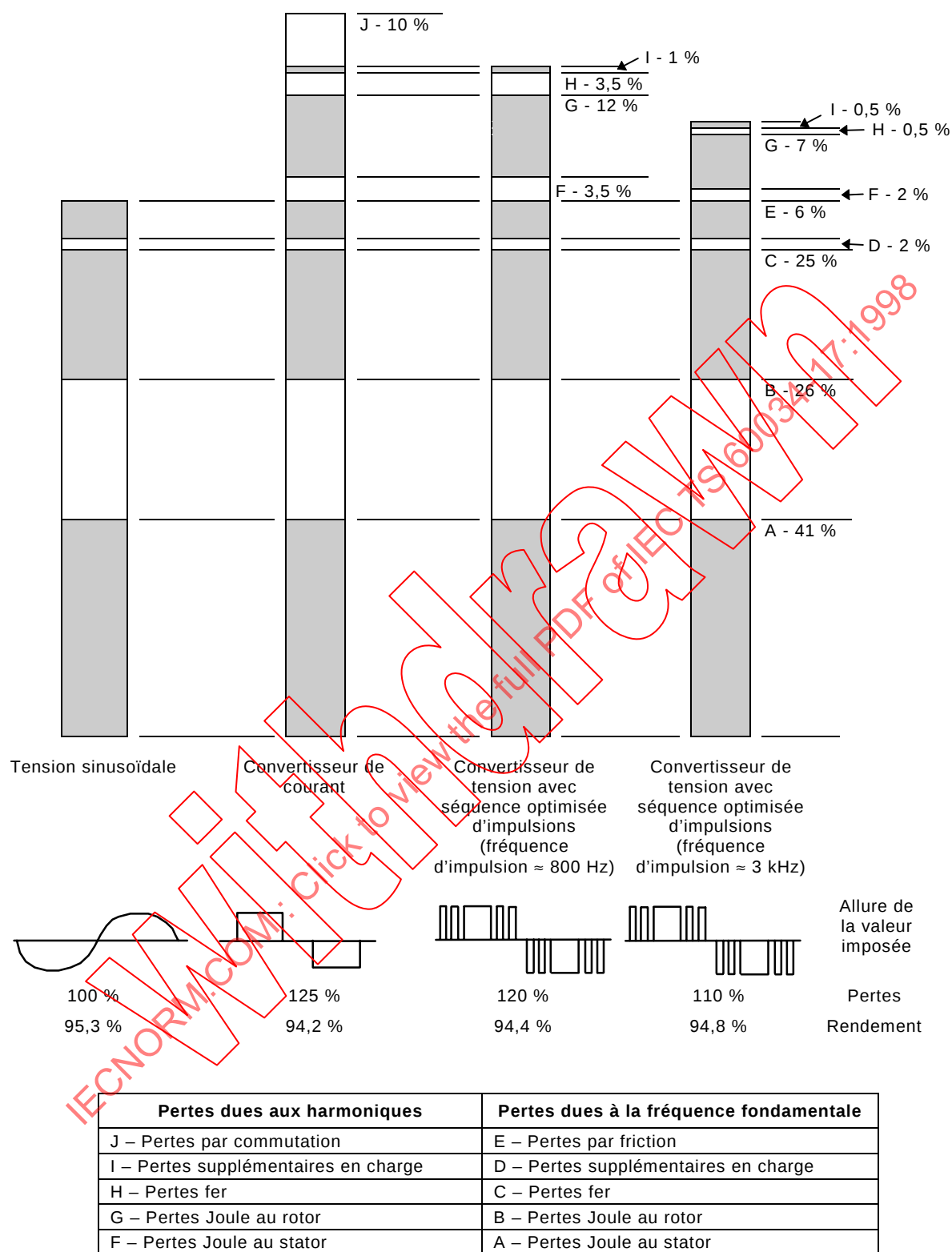


Figure 3 – Influence de l'alimentation par convertisseur sur les pertes d'un moteur à induction à cage (désignation 315 M, conception N) en fonctionnement à couple et vitesse assignés

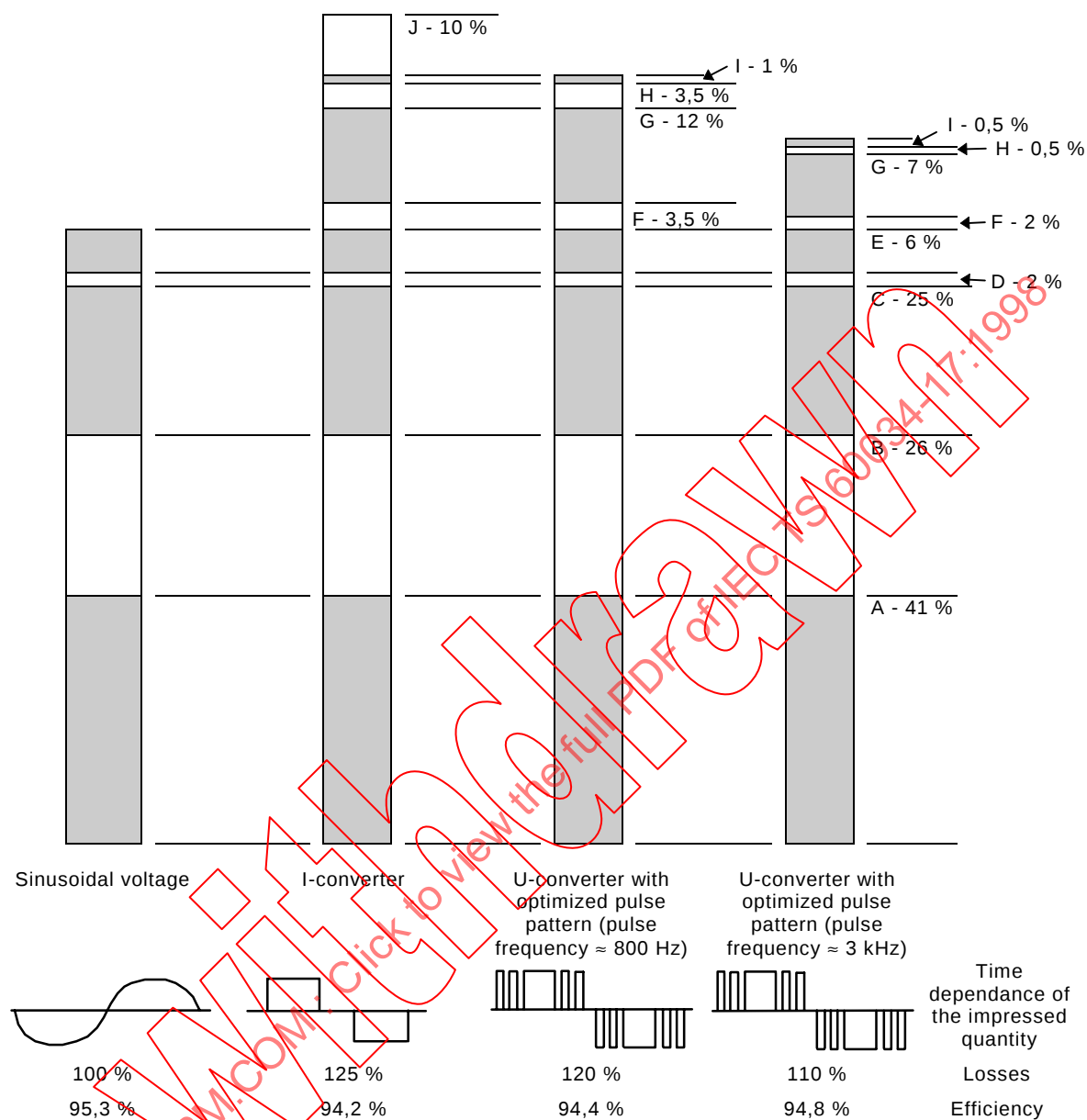


Figure 3 – Influence of converter supply on the losses of a cage induction motor (frame size 315 M, design N) with rated values of torque and speed

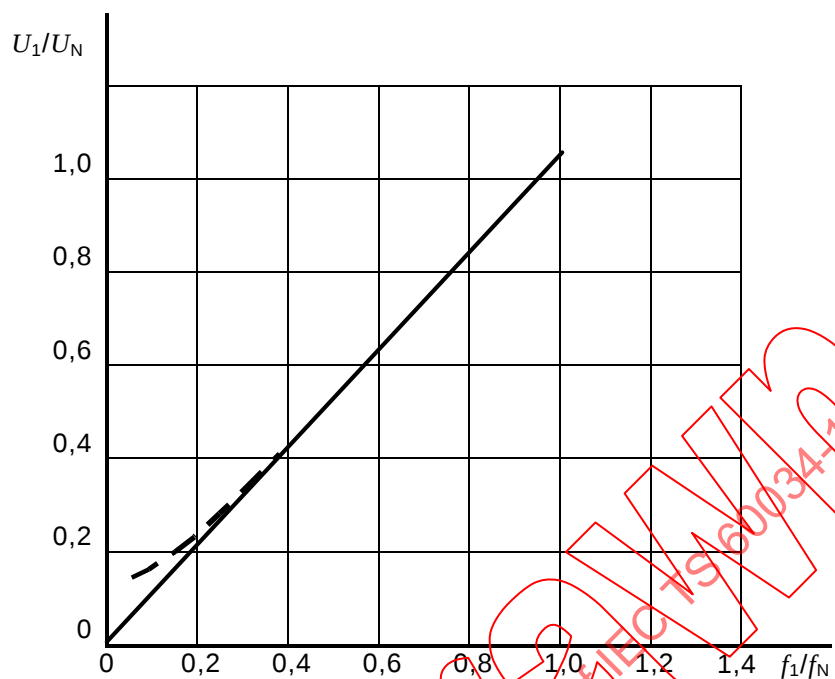


Figure 4 – Tension fondamentale U_1 en fonction de la fréquence de fonctionnement f_1
(voir l'article 6)

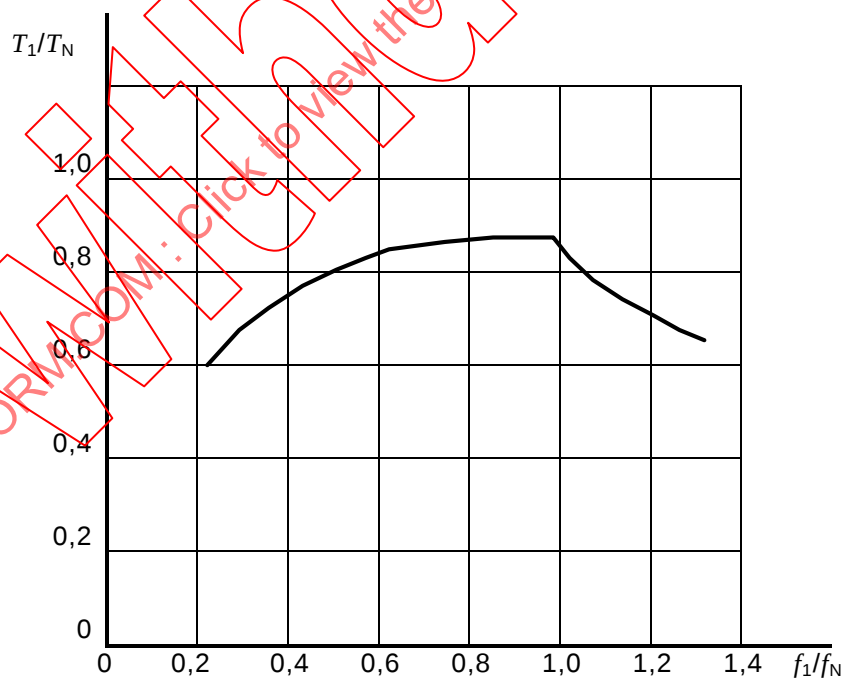


Figure 5 – Facteur de déclassement du couple d'un moteur à induction à cage de conception N, IC 0141 (refroidissement par auto-circulation), avec alimentation par convertisseur de courant, en fonction de la fréquence de fonctionnement f_1 (exemple)

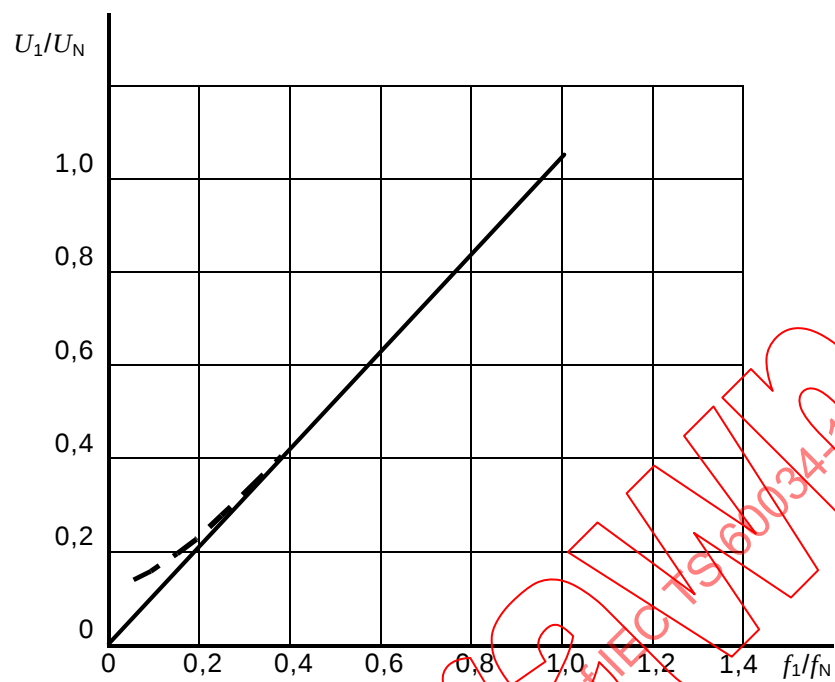


Figure 4 – Fundamental voltage U_1 as a function of operating frequency f_1 (see clause 6)

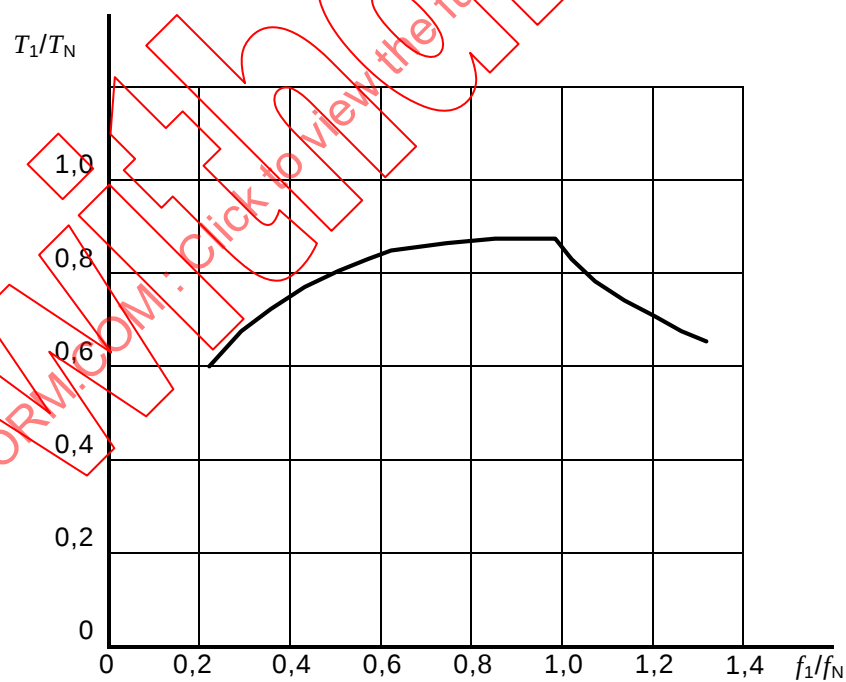


Figure 5 – Torque derating factor for cage induction motors of design N, IC 0141 (self-circulating cooling) for I-converter supply as a function of operating frequency f_1 (example)

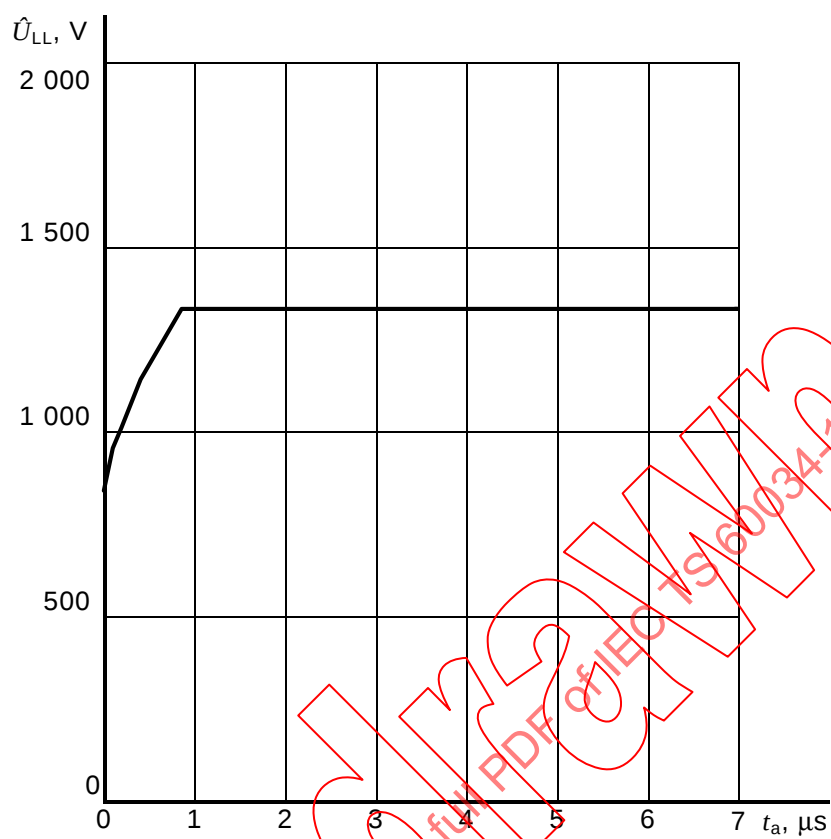


Figure 6 – Courbe limite de tension d'impulsion admissible $\hat{U}_{LL}$ (incluant la réflexion et l'amortissement de la tension) entre bornes du moteur en fonction du temps de montée t_a

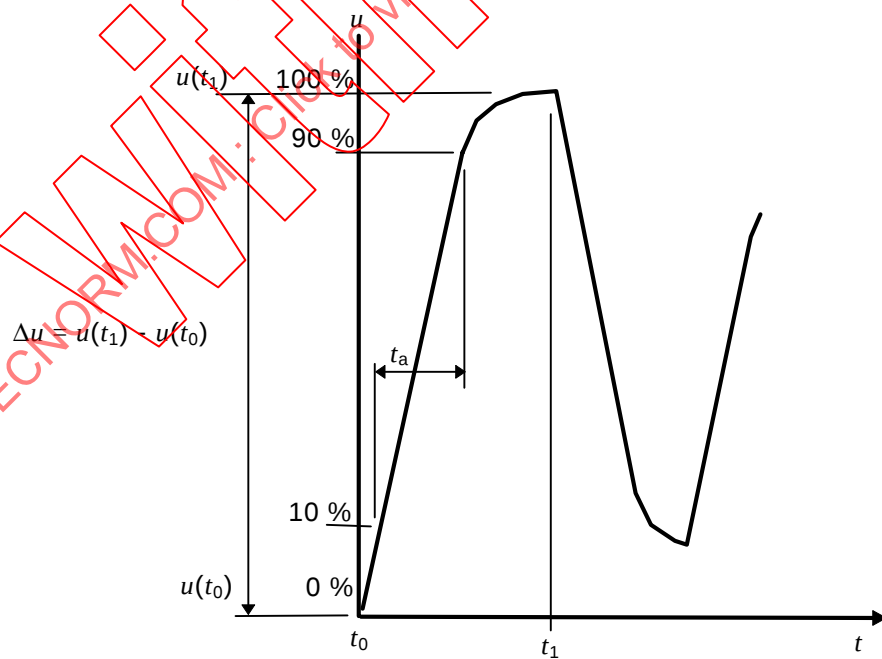


Figure 7 – Définition du temps de montée de la tension aux bornes du moteur