

RAPPORT TECHNIQUE TECHNICAL REPORT

**CEI
IEC
349-3**

Première édition
First edition
1995-08

Traction électrique – Machines électriques tournantes des véhicules ferroviaires et routiers –

Partie 3:

Détermination des pertes totales des moteurs
à courant alternatif alimentés par convertisseur
par sommation des pertes élémentaires

Electric traction – Rotating electrical machines for rail and road vehicles –

Part 3:

Determination of the total losses of convertor-
fed alternating current motors by summation
of the component losses



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 349-3: 1995

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 auprès du Bureau Central de la CEI.

Les renseignements relatifs à ces révisions, à l'établissement des éditions révisées et aux amendements peuvent être obtenus auprès des Comités nationaux de la CEI et dans les documents ci-dessous:

- **Bulletin de la CEI**
- **Annuaire de la CEI**
Publié annuellement
- **Catalogue des publications de la CEI**
Publié annuellement et mis à jour régulièrement

Terminologie

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la CEI 50: *Vocabulaire Electrotechnique International* (VEI), qui se présente sous forme de chapitres séparés traitant chacun d'un sujet défini. Des détails complets sur le VEI peuvent être obtenus sur demande. Voir également le dictionnaire multilingue de la CEI.

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

Symboles graphiques et littéraux

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

- la CEI 27: *Symboles littéraux à utiliser en électro-technique;*
- la CEI 417: *Symboles graphiques utilisables sur le matériel. Index, relevé et compilation des feuilles individuelles;*
- la CEI 617: *Symboles graphiques pour schémas;*

et pour les appareils électromédicaux,

- la CEI 878: *Symboles graphiques pour équipements électriques en pratique médicale.*

Les symboles et signes contenus dans la présente publication ont été soit tirés de la CEI 27, de la CEI 417, de la CEI 617 et/ou de la CEI 878, soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

Publications de la CEI établies par le même comité d'études

L'attention du lecteur est attirée sur les listes figurant à la fin de cette publication, qui énumèrent les publications de la CEI préparées par le comité d'études qui a établi la présente publication.

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 from the IEC Central Office.

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

- **IEC Bulletin**
- **IEC Yearbook**
Published yearly
- **Catalogue of IEC publications**
Published yearly with regular updates

Terminology

For general terminology, readers are referred to IEC 50: *International Electrotechnical Vocabulary* (IEV), which is issued in the form of separate chapters each dealing with a specific field. Full details of the IEV will be supplied on request. See also the IEC Multilingual Dictionary.

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 publications:

- IEC 27: *Letter symbols to be used in electrical technology;*
- IEC 417: *Graphical symbols for use on equipment. Index, survey and compilation of the single sheets;*
- IEC 617: *Graphical symbols for diagrams;*

and for medical electrical equipment,

- IEC 878: *Graphical symbols for electromedical equipment in medical practice.*

The symbols and signs contained in the present publication have either been taken from IEC 27, IEC 417, IEC 617 and/or IEC 878, 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 end pages of this publication which list the IEC publications issued by the technical committee which has prepared the present publication.

**RAPPORT
TECHNIQUE – TYPE 2
TECHNICAL
REPORT – TYPE 2**

**CEI
IEC
349-3**

Première édition
First edition
1995-08

**Traction électrique –
Machines électriques tournantes
des véhicules ferroviaires et routiers –**

Partie 3:

Détermination des pertes totales des moteurs
à courant alternatif alimentés par convertisseur
par sommation des pertes élémentaires

**Electric traction –
Rotating electrical machines
for rail and road vehicles –**

Part 3:

Determination of the total losses of convertor-
fed alternating current motors by summation
of the component losses

© CEI 1995 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

Q

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

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS.....	4
Articles	
1 Domaine d'application et objet.....	8
2 Instrumentation de mesure	8
3 Sommaton des pertes.....	10
Annexes	
A Circuit équivalent d'un moteur asynchrone.....	18
B Pertes supplémentaires en charge	32

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 349-3:1995

CONTENTS

	Page
FOREWORD.....	5
Clause	
1 Scope and object.....	9
2 Instrumentation	9
3 Summation of losses	11
Annexes	
A The equivalent circuit of an asynchronous motor.....	19
B Stray load loss	33

COMMISSION ELECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

TRACTION ÉLECTRIQUE – MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES DES VÉHICULES FERROVIAIRES ET ROUTIERS –

Partie 3: Détermination des pertes totales des moteurs à courant alternatif alimentés par convertisseur par sommation des pertes élémentaires

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, préparés par les comités d'études 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.
- 3) Ces décisions constituent des recommandations internationales publiées sous forme de normes, de rapports techniques ou de guides et agréées comme telles 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.

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

**ELECTRIC TRACTION –
ROTATING ELECTRICAL MACHINES
FOR RAIL AND ROAD VEHICLES –****Part 3: Determination of the total losses of convertor-fed
alternating current motors
by summation of the component losses**

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, 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.
- 3) They have the form of recommendations for international use 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.

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 a 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 349-3, rapport technique de type 2, a été établie par le comité d'études 9 de la CEI: Matériel de traction électrique.

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

Projet de comité	Rapport de vote
9(SEC)328	9(SEC)338

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.

Au vu de l'expérience encore limitée de la méthode et des développements continus de l'instrumentation de mesures, ce rapport technique se propose d'être seulement un guide provisoire pour la détermination des pertes totales des moteurs à courant alternatif alimentés par convertisseur.

Le présent document est publié dans la série des rapports techniques de type 2 (conformément au paragraphe G.4.2.2 de la partie 1 des Directives CEI/ISO) comme «norme prospective d'application provisoire» dans le domaine des moteurs à courant alternatif alimentés par convertisseur pour véhicules ferroviaires et routiers, 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 oeuvre 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.

Les annexes A et B sont données uniquement à titre d'information.

IEC 349-3 which is a technical report of type 2, has been prepared by IEC technical committee 9: Electric traction equipment.

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

Committee draft	Report on voting
9(SEC)328	9(SEC)338

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

In view of the as yet limited experience of the method and of continuing technical developments in instrumentation, this technical report is intended only as a provisional guide to the determination of the total losses of convertor-fed alternating current motors.

This document is issued in the type 2 technical report series of publications (according to G.4.2.2 of part 1 of the IEC/ISO Directives) as a "prospective standard for provisional application" in the field of convertor-fed alternating current motors for rail and road vehicles, 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 either extension for a further three years or conversion to an International Standard or withdrawal.

Annexes A and B are for information only.

TRACTION ÉLECTRIQUE – MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES DES VÉHICULES FERROVIAIRES ET ROUTIERS –

Partie 3: Détermination des pertes totales des moteurs à courant alternatif alimentés par convertisseur par sommation des pertes élémentaires

1 Domaine d'application et objet

Ce rapport technique s'applique aux machines satisfaisant à la CEI 349-2.

Les pertes totales d'un moteur alimenté par convertisseur peuvent être déterminées par sommation des pertes élémentaires déduites d'essais à vide et en charge. La puissance totale d'entrée est la somme de la puissance à la fréquence fondamentale et de la puissance à toutes les autres fréquences. Dans tous les cas pratiques, cette dernière puissance d'entrée inclut les pertes résultant des harmoniques de tension et de courant de l'alimentation par convertisseur, et grâce à l'utilisation d'une instrumentation convenable, elle peut être déduite de la mesure de la puissance d'entrée totale et de la puissance d'entrée à la fréquence fondamentale lorsque la machine est en charge.

Les pertes fournies à la fréquence fondamentale ne peuvent pas être mesurées directement et par suite elles sont déduites des mesures du courant en charge et de la puissance d'entrée à vide à la fréquence fondamentale.

2 Instrumentation de mesure

Les pertes supplémentaires attribuables au fonctionnement sur une alimentation par convertisseur sont obtenues à partir de la différence entre la puissance d'entrée totale et la puissance d'entrée à la fréquence fondamentale en charge.

Les puissances d'entrée doivent être mesurées simultanément sur chaque phase avec un instrument numérique à échantillonnage. La mesure sur les trois phases est préférable, mais la méthode des deux wattmètres est aussi acceptable.

La puissance totale est obtenue à partir du produit de la tension et du courant accumulés sur un temps donné et la puissance fondamentale à partir d'une transformée de Fourier utilisant le même échantillonnage.

Il est nécessaire de considérer la précision de la chaîne complète d'instruments de mesure en prenant en compte à la fois les erreurs de gain et de phase sur la gamme de fréquence désirée. Comme le facteur de puissance des harmoniques est généralement très bas (moins de 0,1 pour les systèmes asynchrones à tension imposée) on attire l'attention sur la nécessité d'avoir des erreurs d'angles de phase minimales.

Au moment de la publication de ce rapport, on dispose de wattmètres dont la précision est dans les limites suivantes au facteur de puissance 0,08:

moins de 2 kHz	$\pm 0,5 \%$;
entre 2 kHz et 20 kHz	$\pm 1,0 \%$;
entre 20 kHz et 50 kHz	$\pm 2,0 \%$.

ELECTRIC TRACTION – ROTATING ELECTRICAL MACHINES FOR RAIL AND ROAD VEHICLES –

Part 3: Determination of the total losses of convertor-fed alternating current motors by summation of the component losses

1 Scope and object

This technical report applies to machines complying with IEC 349-2.

The total losses of a convertor-fed motor may be determined by summation of the component losses derived from no-load and load tests. The total input power is the sum of the power at the fundamental frequency and at all other frequencies. In all practical cases the latter input includes the losses resulting from the voltage and current harmonics in the convertor supply by using suitable instrumentation it can be derived from measurement of the total and fundamental frequency power inputs when the machine is on load.

The losses supplied at the fundamental frequency cannot be measured directly and so are derived from measurement of the fundamental frequency load current and the fundamental frequency no-load power input.

2 Instrumentation

The extra loss due to operation on a convertor supply is obtained from the difference of the total and fundamental frequency power input on load.

The power inputs shall be measured simultaneously on each phase by a digital sampling instrument. Measurement on all three phases is preferred but the two wattmeter method is permissible as an alternative.

The total power is obtained from the product of voltage and current over a period of time and the fundamental power from a Fourier transform using the same sampling.

It is necessary to consider the accuracy of the whole instrument chain taking into account both amplification and phase shift errors over the desired frequency range. As the power factor of the harmonics is generally very low (less than 0,1 for voltage imposed asynchronous systems) particular attention is drawn to the need for minimum phase angle errors.

At the time of publication of this report, wattmeters accurate within the following limits, at 0,08 power factor, were available:

below 2 kHz	±0,5 %;
between 2 kHz and 20 kHz	±1,0 %;
between 20 kHz and 50 kHz	±2,0 %.

Les instruments de mesure contiennent souvent des atténuateurs compensés qui leur sont adaptés mais si un atténuateur externe est utilisé, il est souhaitable que sa précision soit dans les limites données dans le tableau 1.

Tableau 1 – Précision d'un atténuateur externe

Fréquence kHz	Erreur de rapport %	Erreur de phase degrés
< 2	±0,5	±0,1
2 à 20	±1,0	±0,2
20 à 50	±2,0	±0,5

En prenant en compte tous les facteurs, le tableau 2 donne la liste de la meilleure précision globale de mesure de puissance qui puisse être réalisée au moment de la publication de ce rapport.

Tableau 2 – Précision globale de mesure de puissance

Fréquence kHz	Facteur de puissance >0,8 %	Facteur de puissance 0,4 %	Facteur de puissance <0,1 %
< 2	±1	±2	±10
2 à 20	±2	±5	±14
20 à 50	±4	±8	±20

NOTE - La plage de fréquences pour laquelle il est nécessaire de faire des mesures dépend du contenu harmonique de la sortie du convertisseur particulier utilisé et il convient de la choisir pour chaque cas particulier. Avec l'instrumentation de mesure actuellement disponible, la précision globale de la mesure des pertes harmoniques totales est probablement de l'ordre de ±10 %, mais comme les pertes ne dépassent probablement pas 3 % de la puissance d'entrée totale, il en résultera seulement une erreur de 0,3 % du couple calculé, qui est entièrement dans la tolérance de -5 % spécifiée dans la CEI 349-2.

Au moment de la publication de ce rapport, les transformateurs de courant sont sensiblement moins précis pour les bas facteurs de puissance et les fréquences harmoniques élevées que les shunts non inductifs, qui peuvent avoir une précision inférieure à ±1 % sur le rapport et un déphasage dans les limites de ±0,2 °.

3 Sommation des pertes

3.1 Les pertes totales sont la somme des pertes élémentaires suivantes.

3.1.1 Pertes fournies à la fréquence fondamentale à vide (pertes à vide):

- pertes dans les parties actives du fer et dans les autres parties métalliques;
- pertes dues au frottement et à la ventilation incluant la puissance absorbée par les ventilateurs intégrés.

3.1.2 Pertes se produisant lorsque le moteur est alimenté à la fréquence fondamentale et qui varient avec la charge (pertes en charge):

- pertes $R I^2$ dans les enroulements du stator;
- pertes $R I^2$ dans l'enroulement du rotor des moteurs asynchrones;

Instruments often contain attenuators compensated and adapted to them, but if an external attenuator is used, it is desirable that it be accurate within the following limits given in table 1.

Table 1 – Accuracy of external attenuators

Frequency kHz	Ratio error %	Phase shift error degrees
< 2	±0,5	±0,1
2 to 20	±1,0	±0,2
20 to 50	±2,0	±0,5

Taking all factors into account, table 2 lists the highest overall accuracy of power measurement which it is considered could be achieved at the time of publication of this report.

Table 2 – Overall accuracy of power measurement

Frequency kHz	Power factor >0,8 %	Power factor 0,4 %	Power factor <0,1 %
< 2	±1	±2	±10
2 to 20	±2	±5	±14
20 to 50	±4	±8	±20

NOTE – The frequency range over which measurements are necessary depends on the harmonic content of the output from the particular converter used and should therefore be decided for each individual case. With the instrumentation presently available, the overall accuracy of the total harmonic loss measurement is likely to be of the order of ±10 %, but as the loss is unlikely to exceed 3 % of the total power input, this will result in only 0,3 % error in the calculated torque, which is well within the permitted tolerance of –5 % specified in IEC 349-2.

At the time of publication of this report, current transformers are significantly less accurate at the low power factors and high harmonic frequencies involved than non-inductive shunts, which can have a ratio accuracy within ±1% and a phase shift within ±0,2°.

3 Summation of losses

3.1 The total losses are the sum of the following component losses.

3.1.1 Losses supplied at the fundamental frequency on no-load (no-load losses):

- losses in the active iron and other metal parts;
- losses due to friction and windage including the power absorbed by integral fans.

3.1.2 Losses which occur when the motor is supplied at the fundamental frequency and which vary with load (load dependent losses):

- I^2R losses in the stator windings;
- I^2R losses in the rotor winding of asynchronous motors;

- pertes supplémentaires en charge (pertes supplémentaires en charge) se décomposant en:
 - pertes dans les parties actives du fer et dans les parties métalliques autres que les conducteurs;
 - pertes par courants de Foucault dans les enroulements du stator et du rotor provenant des pulsations de flux fonction du courant.

3.1.3 Pertes fournies à des fréquences autres que la fréquence fondamentale

3.1.4 Pertes R^2 et pertes au contact des balais dans le circuit d'excitation des moteurs synchrones

3.2 Détermination des pertes élémentaires

3.2.1 Moteurs asynchrones

3.2.1.1 Pertes à vide fournies à la fréquence fondamentale

Les pertes doivent être déterminées en faisant tourner le moteur à vide à la tension et à la fréquence fondamentale du point de la caractéristique spécifiée pour lequel on les détermine. Les pertes doivent être prises égales à la puissance d'entrée à la fréquence fondamentale diminuée des pertes R^2 dans le stator. Les pertes R^2 à vide dans le rotor doivent être négligées.

3.2.1.2 Pertes en charge fournies à la fréquence fondamentale

Les pertes R^2 à la fréquence fondamentale dans le stator doivent être calculées avec le courant à la fréquence fondamentale dans chaque enroulement au point pour lequel les pertes sont déterminées et avec la résistance mesurée de l'enroulement corrigée pour la température de référence.

Les pertes R^2 dans l'enroulement du rotor doivent être prises égales à:

$$s \times [P_f - (R_{pf} I^2 + P_{of} - P_{fw})]$$

où

s est le glissement;

P_f est la puissance d'entrée à la fréquence fondamentale;

$R_{pf} I^2$ sont les pertes R^2 dans le stator à la fréquence fondamentale;

P_{of} sont les pertes à vide à la fréquence fondamentale;

P_{fw} sont les pertes par frottement et ventilation.

NOTE – Il convient que les pertes par frottement et ventilation soient déterminées soit en entraînant le moteur non alimenté par une machine tarée soit par la méthode graphique décrite dans l'annexe A. L'entraînement peut se faire par l'intermédiaire d'un système de transmission de rendement connu.

Sauf spécification contraire, les pertes supplémentaires en charge pour le courant I et la fréquence fondamentale f (en hertz) doivent être prises égales à:

$$P_s = P_{50} \times (I / I_r)^2 \times (f / 50)^{1,5} \times 0,01$$

où

P_s sont les pertes supplémentaires en charge;

- additional load losses (load loss) consisting of:
 - losses in the active iron and metal parts other than the conductors;
 - eddy current losses in the stator and rotor windings arising from current dependent flux pulsation.

3.1.3 Losses supplied at other than the fundamental frequency

3.1.4 I^2R and brush contact losses in the excitation circuit of synchronous motors

3.2 Determination of the component losses

3.2.1 Asynchronous motors

3.2.1.1 No-load losses supplied at the fundamental frequency

The losses shall be determined by running the motor on no-load at the voltage and fundamental frequency of the point on the specified characteristic for which they are being determined. The losses shall be taken as the fundamental frequency power input less the I^2R loss in the stator. The no-load I^2R loss in the rotor shall be neglected.

3.2.1.2 Load dependent losses supplied at the fundamental frequency

The fundamental frequency I^2R losses in the stator shall be calculated from the fundamental frequency current in each winding at the point for which the losses are being determined and from the measured resistance of the winding corrected to the temperature of reference.

The I^2R loss in the rotor winding shall be taken as:

$$s \times [P_f - (R_{pf}^2 + P_{of} - P_{fw})]$$

where

- s is the slip;
- P_f is the fundamental frequency input power;
- R_{pf} is the stator fundamental frequency I^2R loss;
- P_{of} are the fundamental frequency no-load losses;
- P_{fw} is the friction and windage loss.

NOTE – The friction and windage loss should be determined either by driving the motor on open circuit by a calibrated machine or by the graphical method described in annex A.
The drive may be through a transmission system of known efficiency.

Unless otherwise specified, the additional load losses at current I and fundamental frequency f (in hertz) shall be taken as:

$$P_s = P_{50} \times (I / I_r)^2 \times (f / 50)^{1,5} \times 0,01$$

where

- P_s is the additional load losses;

P_{50} est la puissance d'entrée assignée équivalente à 50 Hz;

I_r est le courant total au régime garanti.

La puissance d'entrée assignée équivalente à 50 Hz est basée sur l'hypothèse que le courant assigné est indépendant de la fréquence et que la tension et la puissance d'entrée du moteur sont toutes les deux proportionnelles à la fréquence sur la plage de fonctionnement à plein flux (voir figure 1), c'est-à-dire:

$$P_{50} = P_m \times 50 / f_m$$

où

P_m est la puissance d'entrée estimée à la tension maximale, au courant assigné et à plein flux;

f_m est la fréquence fondamentale (en hertz) à la puissance d'entrée P_m .

NOTE – Au moment de la publication de ce rapport, la validité de la formule n'avait pas été complètement établie dans tous les cas par l'expérience. On peut obtenir des informations complémentaires en réalisant un essai à basse puissance décrit dans l'annexe B.

3.2.1.3 Pertes fournies à des fréquences autres que la fréquence fondamentale

Les pertes provenant des harmoniques de l'alimentation sont la différence entre la puissance totale et la puissance à la fréquence fondamentale à l'entrée du moteur quand il est en charge avec les enroulements du stator approximativement à la température de référence.

NOTE – Si le convertisseur est du type source de tension et que son modèle de modulation est indépendant de la charge, cette différence peut être mesurée à vide.

3.2.2 Moteurs synchrones

3.2.2.1 Pertes à vide fournies à la fréquence fondamentale

Le moteur non alimenté doit être entraîné par une machine tarée à la vitesse pour laquelle les pertes sont déterminées et doit être excité par une source indépendante pour fournir la tension représentée sur la caractéristique spécifiée, à la même vitesse. Les pertes sont égales à la puissance mécanique d'entrée sur l'arbre du moteur.

3.2.2.2 Pertes en charge fournies à la fréquence fondamentale

Les pertes R^2 dans les enroulements du stator à la fréquence fondamentale doivent être calculées avec le courant à la fréquence fondamentale de chaque enroulement au point pour lequel les pertes sont déterminées et avec la résistance mesurée des enroulements corrigée à la température de référence.

Sauf autre spécification, les pertes supplémentaires en charge doivent être déterminées en entraînant la machine avec les enroulements du stator court-circuités à la vitesse du point de la caractéristique spécifiée pour lequel les pertes sont déterminées. L'excitation doit être ajustée pour donner les courants d'enroulement du stator à la fréquence fondamentale pour ce même point. Les pertes doivent être prises égales à la puissance fournie sur l'arbre de la machine diminuée de la somme de la totalité des pertes R^2 du stator et de la puissance fournie quand la machine est entraînée non excitée à la même vitesse.

P_{50} is the equivalent 50 Hz rated input power;

I_r is the total current at the guaranteed rating.

The equivalent 50 Hz rated input power is based on the assumption that the rated current is independent of frequency and that the motor voltage and input power are both proportional to frequency over the range of operation with full flux (see figure 1), that is:

$$P_{50} = P_m \times 50 / f_m$$

where

P_m is the assumed input power at maximum voltage, rated current and full flux;

f_m is the fundamental frequency (in hertz) at input power P_m .

NOTE – At the time of publication of this report, the validity of the formula in all cases had not been fully established by experience. Additional information may be obtained by carrying out a low power test described in annex B.

3.2.1.3 Losses supplied at other than the fundamental frequency.

The losses arising from the supply harmonics are the difference between the total and fundamental frequency power inputs to the motor when on load with the stator windings at approximately the temperature of reference.

NOTE – If the converter is a voltage source type and its modulation pattern is independent of load, the difference may be measured on no-load.

3.2.2 Synchronous motors

3.2.2.1 No-load losses supplied at the fundamental frequency

The motor shall be driven on open circuit by a calibrated machine at the speed for which the losses are being determined and shall be excited by an independent source to generate the voltage shown on the specified characteristic at the same speed. The losses are equal to the mechanical power input to the motor shaft.

3.2.2.2 Load dependent losses supplied at the fundamental frequency

The fundamental frequency R^2R losses in the stator shall be calculated from the fundamental frequency current in each winding at the point for which the losses are being determined and from the measured resistance of the winding corrected to the temperature of reference.

Unless otherwise specified, the additional load losses shall be determined by driving the machine with the stator windings short-circuited at the speed of the point on the specified characteristic for which the losses are being determined. The excitation shall be adjusted to give the fundamental frequency stator winding currents for the same point. The losses shall be taken as the power supplied to the machine shaft less the sum of the total stator R^2R losses and the power supplied when the machine is driven unexcited at the same speed.

3.2.2.3 Pertes fournies à des fréquences autres que la fréquence fondamentale

Les pertes provenant des harmoniques de l'alimentation sont égales à la différence entre la puissance totale et la puissance à la fréquence fondamentale à l'entrée du moteur quand il est en charge avec ses enroulements approximativement à la température de référence.

3.2.2.4 Pertes dans le circuit d'excitation

Les pertes dans le circuit d'excitation doivent être prises égales au produit du courant dans l'enroulement et de la tension totale d'excitation au point pour lequel les pertes sont déterminées. La tension doit être la valeur nécessaire pour fournir le courant d'excitation avec l'enroulement à la température de référence. On doit tenir compte de toute ondulation du courant d'excitation.

NOTE – La caractéristique spécifiée peut énoncer que la puissance d'excitation n'est pas incluse dans les pertes calculées du moteur parce qu'elle est prise en compte ailleurs, par exemple comme une partie de la charge des auxiliaires du véhicule.



CEI 735/95

Figure 1 – Obtention de la puissance d'entrée assignée équivalente à 50 Hz

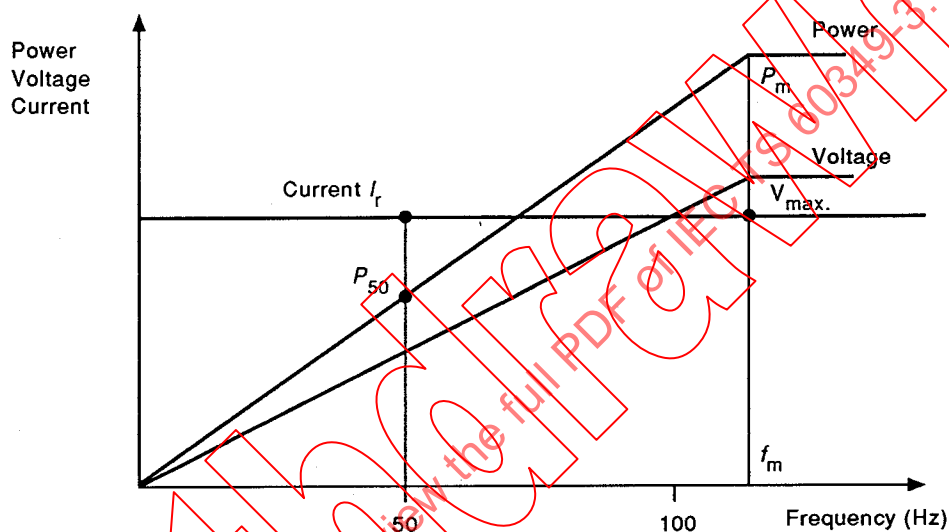
3.2.2.3 Losses supplied at other than the fundamental frequency

The losses arising from the supply harmonics are the difference between the total and fundamental frequency power inputs to the motor when on load with the windings at approximately the temperature of reference.

3.2.2.4 Loss in the excitation circuit.

The loss in the excitation circuit shall be the product of the current in the winding and the total excitation voltage at the point for which the losses are being determined. The voltage shall be the value required to supply the excitation current with the winding at the temperature of reference. Account shall be taken of any ripple in the excitation current.

NOTE – The specified characteristic may state that the excitation power is not included in the calculated motor losses as it is accounted for elsewhere, for example as part of the vehicle auxiliary load.



IEC 735/95

Figure 1 – Derivation of equivalent 50 Hz rated power input

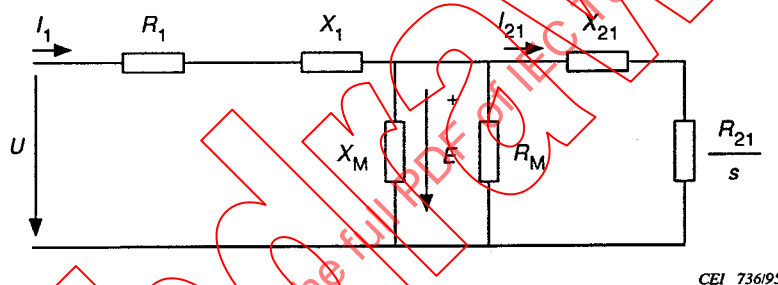
Annexe A (informative)

Circuit équivalent d'un moteur asynchrone

A.1 Description du circuit

Un moteur asynchrone à vide peut être représenté par le circuit équivalent illustré à la figure A.1. Les paramètres du circuit sont obtenus à partir d'essais à vide et d'impédance (rotor bloqué) sur une source de tension sinusoïdale, les quantités mesurées étant la tension, le courant et la puissance.

Si les paramètres du circuit et les pertes à vide sont déterminés pour un nombre de tensions et de fréquences couvrant la plage de fonctionnement du moteur, des courbes peuvent être tracées qui rendent possible le calcul du couple du moteur et de son courant d'entrée pour une valeur choisie de la tension, de la fréquence et du glissement.



- f est la fréquence (Hz);
- U est la tension de phase (V);
- I_1 est le courant du stator (A);
- I_{21} est le courant du rotor ramené au stator (A);
- X_1 est la réactance du stator (Ω);
- X_{21} est la réactance du rotor ramenée au stator (Ω);
- R_1 est la résistance du stator (Ω);
- R_{21} est la résistance du rotor ramenée au stator (Ω);
- X_M est la réactance magnétisante (Ω);
- R_M est la résistance magnétisante (Ω);
- E est la force électromotrice induite (f.e.m.) (V);
- s est le glissement (-);
- P_{10} est la puissance d'entrée à vide (W);
- P_{Cu1} sont les pertes ohmiques du stator (W);
- P_{Fe} sont les pertes fer (W);
- P_{fw} sont les pertes par frottement et ventilation (W);
- Q_{10} est la puissance réactive totale à vide (VAr);
- Q_{1L} est la puissance réactive totale rotor bloqué (VAr).

Figure A.1 – Circuit équivalent d'un moteur asynchrone à vide

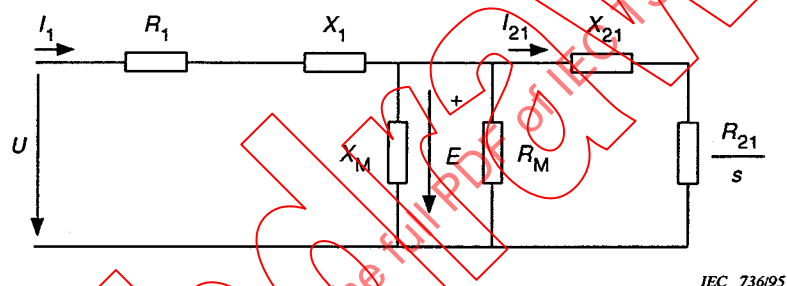
Annexe A (informative)

The equivalent circuit of an asynchronous motor

A.1 Circuit description

An asynchronous motor on no-load can be represented by the equivalent circuit illustrated in figure A.1. The circuit parameters are obtained from no-load and impedance (locked rotor) tests on a sinusoidal supply voltage, the quantities measured being voltage, current and power.

If the circuit parameters and no-load losses are determined for a number of voltages and frequencies covering the range of operation of the motor, curves can be plotted which enable the motor torque and input current to be calculated for chosen values of voltage, frequency and slip.



- f is the frequency (Hz);
 U is the phase voltage (V);
 I_1 is the stator current (A);
 I_{21} is the rotor current transformed to the stator side (A);
 X_1 is the stator reactance (Ω);
 X_{21} is the rotor reactance transformed to the stator side (Ω);
 R_1 is the stator resistance (Ω);
 R_{21} is the rotor resistance transformed to the stator side (Ω);
 X_M is the magnetizing reactance (Ω);
 R_M is the magnetizing resistance (Ω);
 E is the induced electromotive force (e.m.f.) (V);
 s is the slip (-);
 P_{10} is the input power on no-load (W);
 P_{Cu1} is the stator resistance losses (W);
 P_{Fe} is the core loss (W);
 P_{fw} is the friction and windage loss (W);
 Q_{10} is the total reactive power on no-load (VAR);
 Q_{1L} is the total reactive power with locked rotor (VAR).

Figure A.1 – Equivalent circuit of an asynchronous motor on no-load

A.2 Détermination des paramètres du circuit équivalent d'un moteur triphasé

On déduit les paramètres du circuit équivalent à partir des équations données dans le tableau A.1.

Le suffixe additionnel "0" indique une mesure à vide.

Le suffixe additionnel "L" indique une mesure rotor bloqué.

Tableau A.1 – Détermination des paramètres du circuit équivalent

Paramètre	Description	Equation
X_M	U_{10}, I_{10}, P_{10} sont mesurés à vide. Les valeurs de X_1 et X_M à la première itération sont les valeurs théoriques calculées. $Q_{10} = \sqrt{[(3 \times U_{10} \times I_{10})^2 - P_{10}^2]}$	$X_M = 3 \frac{U_{10}^2}{Q_{10} - 3 I_{10}^2 X_1} \times \frac{1}{(1 + X_1 / X_M)^2} \quad (1)$
X_{1L}	X_{1L} est la réactance du stator à la fréquence f_L utilisée pour l'essai d'impédance. Les valeurs de X_1 et X_{21} à la première itération sont les valeurs théoriques calculées. X_M s'obtient à partir de l'équation (1) $Q_{1L} = \sqrt{[(3 \times U_{1L} \times I_{1L})^2 - P_{1L}^2]}$	$X_{1L} = \frac{Q_{1L} \times \frac{X_1 / X_{21} + X_1 / X_M}{1 + X_1 / X_{21} + X_1 / X_M}}{3 I_{1L}^2} \quad (2)$
X_1	X_1 est la fréquence du stator à la fréquence f. X_{1L} s'obtient à partir de l'équation (2).	$X_1 = \frac{f}{f_L} \times X_{1L} \quad (3)$
b_M	b_M est la susceptance magnétique. X_M s'obtient à partir de l'équation (1).	$b_M = \frac{1}{X_M} \quad (4)$
X_{21}	X_{21} est la réactance du rotor ramenée côté stator. X_1 s'obtient à partir de l'équation (3).	$X_{21} = \frac{X_1}{(X_1 / X_{21})} \quad (5)$
P_{Fe}	P_{Fe} sont les pertes fer. P_{10} et I_{10} sont les valeurs mesurées de la puissance active et du courant à vide. P_{fw} sont les pertes par frottement et ventilation qui sont déterminées graphiquement ou mesurées par entraînement du moteur déconnecté de son alimentation. R_1 est la résistance du stator à la température de l'enroulement pendant les essais à vide.	$P_{Fe} = P_{10} - P_{fw} - 3 I_{10}^2 R_1 \quad (6)$
G_M	G_M est la conductance magnétisante. P_{Fe} s'obtient à partir de l'équation (6). U_{10} est la valeur mesurée de la tension à vide. X_1 s'obtient à partir de l'équation (3) et X_M de l'équation (1).	$G_M = \frac{P_{Fe}}{3 U_{10}^2} \left(1 + \frac{X_1}{X_M} \right)^2 \quad (7)$

(suite du tableau, page 22)

A.2 Determination of the parameters of the equivalent circuit of a three-phase motor

The parameters of the equivalent circuit are derived from the equations given in table A.1.

An additional suffix "0" denotes measurements on no-load.

An addition suffix "L" denotes measurements with a locked rotor.

Table A.1 – Determination of parameters of the equivalent circuit

Parameter	Description	Equation
X_M	U_{10} , I_{10} , P_{10} are measured on no-load. The values of X_1 and X_M at the first iteration are the theoretical calculated ones. $Q_{10} = \sqrt{[(3 \times U_{10} \times I_{10})^2 - P_{10}^2]}$	$X_M = 3 \frac{U_{10}^2}{Q_{10} - 3 I_{10}^2 X_1} \times \frac{1}{(1 + X_1 / X_M)^2} \quad (1)$
X_{1L}	X_{1L} is the stator reactance at the frequency f_L used for the impedance test. The values of X_1 and X_{21} at the first iteration are the theoretically calculated ones. X_m is obtained from equation (1) $Q_{1L} = \sqrt{[(3 \times U_{1L} \times I_{1L})^2 - P_{1L}^2]}$	$X_{1L} = \frac{Q_{1L}}{3 I_{1L}^2} \times \frac{X_1 / X_{21} + X_1 / X_M}{1 + X_1 / X_{21} + X_1 / X_M} \quad (2)$
X_1	X_1 is the stator reactance at frequency f . X_{1L} is obtained from equation (2).	$X_1 = \frac{f}{f_L} \times X_{1L} \quad (3)$
b_M	b_M is the magnetic susceptance. X_M is obtained from equation (1).	$b_M = \frac{1}{X_M} \quad (4)$
X_{21}	X_{21} is the rotor reactance transformed to the stator side. X_1 is obtained from equation (3).	$X_{21} = \frac{X_1}{(X_1 / X_{21})} \quad (5)$
P_{Fe}	P_{Fe} is the core loss. P_{10} and I_{10} are measured values of the no-load active power and current. P_{fw} is the friction and windage loss which is determined graphically or measured by driving the motor disconnected from the supply. R_1 is the stator resistance at the temperature of the winding during the no-load test.	$P_{Fe} = P_{10} - P_{fw} - 3 I_{10}^2 R_1 \quad (6)$
G_M	G_M is the magnetizing conductance. P_{Fe} is obtained from equation (6). U_{10} is the measured no-load voltage. X_1 is obtained from equation (3) and X_M from equation (1).	$G_M = \frac{P_{Fe}}{3 U_{10}^2} \left(1 + \frac{X_1}{X_M} \right)^2 \quad (7)$

(Table continued on page 23)

Paramètre	Description	Equation
R_M	R_M est la résistance magnétisante. G_M s'obtient à partir de l'équation (7).	$R_M = \frac{1}{G_M}$ (8)
R_{21}	R_{21} est la résistance du rotor, à une température spécifiée, ramenée côté stator.	(voir note 4)

NOTES

1 Il convient de calculer les équations (1), (2), et (3) par ordre croissant, c'est-à-dire (1), (2), (3); (1), (2), (3); (1), (2), (3), et ainsi de suite. Il convient de répéter les calculs jusqu'à ce que les erreurs sur X_1 et X_M soient inférieures à 0,1 %, c'est-à-dire que la différence entre les valeurs de deux itérations successives soit inférieure à 0,1 %. Après l'itération des équations (1), (2), et (3), il convient que toutes les équations suivantes soient calculées par ordre croissant.

Le calcul donne des valeurs correctes des paramètres si un nombre suffisant d'itérations a été effectué. Sa précision dépend seulement de la précision des résultats des essais à vide et des essais d'impédance.

Le calcul donne une valeur correcte pour $X_1 + X_{21}$ avec un rapport fixé X_1/X_{21} égal à sa valeur théorique.

2 Les pertes par frottement et ventilation à vide du rotor sont négligeables par rapport aux pertes du stator ce qui permet de calculer la réactance magnétisante à partir de l'équation (1) basée sur les résultats d'un essai à vide appliqué à un circuit simplifié.

3 La réactance du stator X_1 et la réactance du rotor X_{21} sont calculées à partir des résultats de l'essai rotor bloqué effectué à une fréquence aussi proche que possible de la fréquence réelle du rotor. (En pratique la fréquence d'essai est normalement au-dessus de la fréquence réelle, 15 Hz étant une valeur convenable.)

Le courant, la tension et le facteur de puissance sont mesurés. La résistance magnétisante R_M est beaucoup plus grande que la résistance du rotor ramenée au côté stator R_{21} et on peut donc utiliser un circuit simplifié.

4 La résistance du rotor R_{21} peut être obtenue soit à partir des résultats de l'essai d'impédance soit à partir de mesures faites au cours d'un essai en charge. Cette dernière méthode est préférable parce que:

- a) les conditions de stabilité thermique sont réalisées;
- b) la fréquence du rotor est la valeur réelle, ce qui n'est pas généralement le cas pendant l'essai d'impédance (rotor bloqué).

Détermination à partir d'un essai d'impédance

$$R_{21} = \left(\frac{P_{1L}}{3 I_{1L}^2} - R_1 \right) \left(1 + \frac{X_{21}}{X_M} \right)^2 - \left(\frac{X_{21}}{X_1} \right)^2 \frac{X_{1L}^2}{R_M}$$

P_{1L} et I_{1L} sont la puissance active et le courant du stator avec le rotor bloqué.

Il faut noter que cette équation n'est valable que si R_{21} est déterminé à partir d'un essai d'impédance.

Détermination à partir d'un essai en charge

Les paramètres pour le point d'essai sont calculés par la méthode du circuit équivalent en utilisant la valeur choisie pour R_{21} jusqu'à ce que le courant d'entrée calculé soit égal à celui de l'essai. La valeur finale de R_{21} est alors utilisée pour tous les calculs ultérieurs.

Parameter	Description	Equation
R_M	R_M is the magnetizing resistance. G_M is obtained from equation (7).	$R_M = \frac{1}{G_M}$ (8)
R_{21}	R_{21} is the rotor resistance, at a specified temperature, transformed to the stator side.	(see note 4)

NOTES

1 Equations (1), (2) and (3) should be calculated in ascending order, i.e. (1), (2), (3); (1), (2), (3); (1), (2), (3) and so on. The calculations should be iterated until the errors for X_1 and X_M are less than 0,1%, i.e. the difference between the values of two successive iterations should be less than 0,1%. After the iteration of equations (1), (2) and (3), all subsequent equations should be calculated in ascending order.

The calculation gives correct values of the parameters if a sufficient number of iterations is carried out. Its accuracy is dependent only on the accuracy of the results of no load and impedance tests.

The calculation gives a correct value of $X_1 + X_{21}$ with a fixed ratio of X_1/X_{21} equal to the theoretical value of the ratio.

2 On no-load the rotor and friction and windage losses are negligible compared with the stator losses which enables the magnetizing reactance to be calculated by equation (1) based on the results of a no-load test applied to a simplified circuit.

3 The stator reactance X_1 and the rotor reactance X_{21} are calculated from the results of a locked rotor test at a frequency as close as practicable to the actual rotor frequency. (In practice, the test frequency is normally above the actual frequency, 15 Hz being a suitable value). Current, voltage and power factor are measured. The magnetizing resistance R_M is much higher than the transformed rotor resistance to the stator side R_{21} and therefore a simplified circuit is used.

4 The rotor resistance R_{21} can either be derived from the impedance test results or from measurements made on a load test. The latter is preferred because:

- a) thermal steady state conditions can be achieved;
- b) the rotor frequency is the actual value, which is not generally the case during an impedance locked rotor) test.

Determination from an impedance test

$$R_{21} = \left(\frac{P_{1L}}{3 I_{1L}^2} - R_1 \right) \left(1 + \frac{X_{21}}{X_M} \right)^2 - \left(\frac{X_{21}}{X_1} \right)^2 \frac{X_{1L}^2}{R_M}$$

P_{1L} and I_{1L} are the active power and stator current with a locked rotor.

Note that this equation is only valid if R_{21} is determined from an impedance test.

Determination from a load test

The parameters at the test point are calculated by the equivalent circuit method using chosen values of R_{21} until the calculated input current equals the test value. The final value of R_{21} is then used for all subsequent calculations.

A.3 Calcul de la caractéristique d'un moteur triphasé

Lorsque les courbes des paramètres du circuit équivalent et des pertes à vide ont été tracées, on peut les utiliser pour calculer des points de la caractéristique du moteur pour des valeurs choisies de la tension, de la fréquence et du glissement.

La figure A.2 montre le circuit équivalent d'un moteur asynchrone en charge. On peut noter que les paramètres du circuit ne prennent pas en compte les pertes par frottement et ventilation, les pertes supplémentaires et les pertes dues aux harmoniques de l'alimentation par convertisseur dont on tient compte séparément.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TS 60349-3:1995

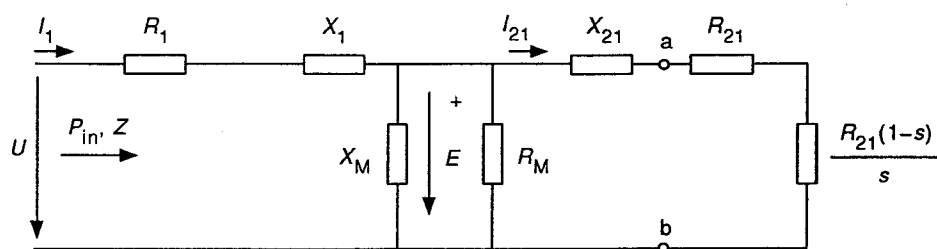
Withdrawn

A.3 Calculation of the characteristic of a three-phase motor

When curves of the equivalent circuit parameters and the no-load losses have been plotted they can be used to calculate points on the motor characteristic for chosen values of voltage, frequency and slip.

Figure A.2 is the equivalent circuit of an asynchronous motor on load. Note that the circuit parameters do not take into account friction, windage, stray and converter supply harmonic losses which are therefore allowed for separately.

Withdrawing
IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC TS 60349-3:1995



CEI 737/95

Données d'entrée

Tension de phase

Fréquence fondamentale d'alimentation

Glissement

Pertes par frottement et ventilation

Pertes supplémentaires

Pertes dues aux harmoniques provenant de l'alimentation par convertisseur

Paramètres du circuit équivalent à la fréquence fondamentale:

$X_1, X_{21}, X_M, R_1, R_M, R_{21}$

Données de sortie

Courant du stator

Puissance d'entrée

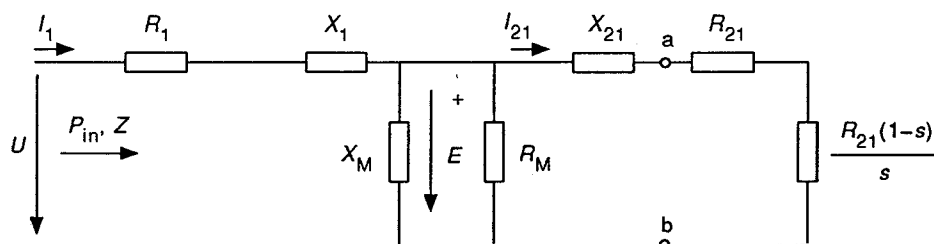
Puissance de sortie

Rendement

Facteur de puissance

Couple de l'arbre

Figure A.2 – Circuit équivalent d'un moteur asynchrone en charge



IEC 737/95

Input data

Phase voltage

Fundamental supply frequency

Slip

Friction and windage losses

Stray losses

Harmonic losses arising from the converter supply

Equivalent circuit parameters at the fundamental frequency:

$$X_1, X_{21}, X_M, R_1, R_M, R_{21}$$

Output data

Stator current

Input power

Output power

Efficiency

Power factor

Shaft torque

Figure A.2 – Equivalent circuit of an asynchronous motor on load

Tableau A.2 – Définition des paramètres

Point	Paramètre	Equation*
1	s est le glissement	[p.u] donnée d'entrée
2	X_1 est la réactance du stator	[Ω] donnée d'entrée
3	X_{21} est la réactance du rotor ramenée côté stator	[Ω] donnée d'entrée
4	X_M est la réactance magnétisante	[Ω] donnée d'entrée
5	R_1 est la résistance du stator	[Ω] donnée d'entrée
6	R_{21} est la résistance du rotor ramenée côté stator	[Ω] donnée d'entrée
7	R_M est la résistance magnétisante	[Ω] donnée d'entrée
8	U est la tension de phase	[V] donnée d'entrée
9	f est la fréquence fondamentale d'alimentation	[Hz] donnée d'entrée
10	m est le nombre de phases ($m=3$)	donnée d'entrée
11	P_h sont les pertes dues aux harmoniques provenant de l'alimentation par convertisseur	[W] donnée d'entrée (voir note 1)
12	R_{21}/s est une résistance du circuit équivalent	[Ω] (6)/(1)
13	Z_{21} est une variable auxiliaire	(3) ² + (12) ²
14	G_{21} est une variable auxiliaire	(12)/(13)
15	G_{Fe} est la conductance correspondant aux pertes fer	[Ω^{-1}] (1)/(7)
16	G est une variable auxiliaire	(14) + (15)
17	B_2 est une variable auxiliaire	(3)/(13)
18	b_M est la susceptance magnétisante	[Ω^{-1}] 1/(4)
19	B est une variable auxiliaire	(17) - (18)
20	Y^2 est une variable auxiliaire	(16) + (19)
21	R_G est une variable auxiliaire	(16)/(20)
22	R est une variable auxiliaire	(5) + (21)
23	X_G est une variable auxiliaire	(19)/(20)
24	X est une variable auxiliaire	(23)/(2)
25	Z est l'impédance totale du circuit équivalent	[Ω] $\sqrt{[(21)^2 + (23)^2]}$
26	I_1 est le courant du stator	[A] $U/(25)$
27	P_{in} est la puissance d'entrée en excluant le point (11)	[W] $(10) \times (26)^2 \times (22)^2$
28	P_{cu1} sont les pertes R^2 dans le stator	[W] $(10) \times (26)^2 \times (5)$
29	P_{Fe} sont les pertes fer	[W] $(10) \times (26) \times (15)/(20)$
30	P_{in2} est la puissance transmise au rotor	[W] $(27) - (28) - (29)$
31	P_{cu2} sont les pertes R^2 dans le rotor	[W] $(1) \times (30)$
32	n est la vitesse du moteur	[tr/min] $ns \times [1 - (1)]$
	n_s est la vitesse synchrone	
33	P_{fw} sont les pertes par frottement et ventilation	[W] (voir note 2)
34	P_s sont les pertes supplémentaires	[W] (voir note 3)
35	ΣP_1 sont les pertes totales en excluant le point (11)	[W] $(28) + (29) + (31) + (33) + (34)$
36	P_{ou} est la puissance de sortie	[W] $(27) - (35)$
37	η_1 est le rendement excluant le point (11)	[p.u] $1 - (35)/(27)$
38	η_2 est le rendement incluant le point (11)	[p.u] $1 - [(11) + (35)]/[(27) + (11)]$
39	PF est le facteur de puissance excluant le point (11)	[p.u] $(22)/(25)$
40	T est le couple de sortie	[Nm] $(60/2\pi) \times [(36)/(32)]$

* Dans les équations, les nombres entre parenthèses, par exemple (21), sont les numéros correspondant aux points.

NOTES

1 Les pertes harmoniques provenant de l'alimentation par convertisseur sont mesurées en charge comme spécifié en 3.2.1.3 de ce rapport.

2 Détermination des pertes par frottement et ventilation à partir d'essais à vide.

Le graphe des pertes totales à vide en fonction du carré de la tension aux bornes à fréquence constante est une ligne droite. En extrapolant les graphes à tension nulle pour un nombre de fréquences et de tensions, la figure A.3 permet de tracer une courbe de pertes par frottement et ventilation en fonction de la vitesse. En variante, les pertes peuvent être mesurées en entraînant le moteur déconnecté de son alimentation.

3 On tient compte des pertes supplémentaires à l'aide de la formule spécifiée en 3.2.1.2 de ce rapport.