

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

60034-28

Première édition
First edition
2007-03

Machines électriques tournantes –

Partie 28:

**Méthodes d'essai pour la détermination des
grandeurs des schémas d'équivalence des
circuits pour moteurs à induction à cage
basse tension triphasés**

Rotating electrical machines –

Part 28:

**Test methods for determining quantities of
equivalent circuit diagrams for three-phase
low-voltage cage induction motors**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 60034-28:2007

Numérotation des publications

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

Editions consolidées

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

Informations supplémentaires sur les publications de la CEI

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

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

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

- IEC Just Published

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

- Service clients

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

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

Publication numbering

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

Consolidated editions

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

Further information on IEC publications

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

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

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

- IEC Just Published

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

- Customer Service Centre

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

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

NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD

CEI
IEC

60034-28

Première édition
First edition
2007-03

Machines électriques tournantes –

Partie 28:

Méthodes d'essai pour la détermination des grandeurs des schémas d'équivalence des circuits pour moteurs à induction à cage basse tension triphasés

Rotating electrical machines –

Part 28:

Test methods for determining quantities of equivalent circuit diagrams for three-phase low-voltage cage induction motors

© IEC 2007 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

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

No part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from the publisher.

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



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

U

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

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	4
INTRODUCTION.....	8
1 Domaine d'application	10
2 Références normatives.....	10
3 Termes, définitions et symboles	10
3.1 Symboles	10
3.2 Connexion Y équivalente.....	16
4 Exigences d'essai.....	16
4.1 Fréquence et tension.....	16
4.2 Instrumentation	16
5 Approximations et incertitudes.....	18
6 Procédures d'essai.....	18
6.1 Généralités.....	18
6.2 Mesure de la résistance entre lignes à courant continu du stator.....	20
6.3 Charge d'essai	20
6.4 Essai à vide.....	20
6.5 Essais de rotation inverse et à rotor bloqué.....	22
7 Détermination des grandeurs de moteurs.....	22
7.1 Généralités.....	22
7.2 Résistance de l'enroulement du stator R_s	26
7.3 Résistance équivalente de pertes dans le fer R_{fe}	26
7.4 Inductance du stator totale $L_{ts} = L_m + L_s$	28
7.5 Inductance de fuite totale L_σ	32
7.6 Inductance de magnétisation L_m et tension U_m	36
7.7 Inductances de fuite du stator et du rotor L_s et L_r'	36
7.8 Inductances pour calculs à flux constant (charge assignée).....	36
7.9 Résistance de la cage du rotor R_r' en référence à l'enroulement du stator	38
Annexe A (informative) Formulaire pour le calcul de résistance des pertes dans le fer R_{fe}	42
Annexe B (informative) Formulaire pour le calcul de l'inductance totale du stator L_{ts}	44
Annexe C (informative) Formulaire pour le calcul de l'inductance de fuite totale L_σ	46
Annexe D (informative) Formulaire pour le calcul de l'inductance de magnétisation L_m	48
Annexe E (informative) Calcul d'échantillons	50
Figure 1 – Schéma des circuits équivalents de type T	24
Figure 2 – Schéma des circuits équivalents de type T (sans tenir compte des pertes dans le fer)	24
Figure 3 – Schéma des circuits équivalents de type L (sans tenir compte des pertes dans le fer)	24
Figure 4 – Caractéristiques typiques d'inductance L sur le courant I	30

CONTENTS

FOREWORD.....	5
INTRODUCTION.....	9
1 Scope.....	11
2 Normative references	11
3 Terms, definitions and symbols	11
3.1 Symbols	11
3.2 Equivalent Y-connection	17
4 Test requirements	17
4.1 Frequency and voltage	17
4.2 Instrumentation	17
5 Approximations and uncertainties	19
6 Test procedures	19
6.1 General.....	19
6.2 Stator d.c. line-to-line resistance measurement.....	21
6.3 Load-test.....	21
6.4 No-load test.....	21
6.5 Reverse rotation and locked rotor tests	23
7 Determination of motor quantities	23
7.1 General.....	23
7.2 Resistance of stator winding R_s	27
7.3 Equivalent resistance of iron losses R_{fe}	27
7.4 Total stator inductance $L_{ts} = L_m + L_s$	29
7.5 Total leakage inductance L_σ	33
7.6 Magnetizing inductance L_m and voltage U_m	37
7.7 Stator and rotor leakage inductances L_s and L_r'	37
7.8 Inductances for calculations at constant flux (rated load).....	37
7.9 Resistance of rotor cage R_r' referred to stator winding.....	39
Annex A (informative) Form for calculation of resistance of iron losses R_{fe}	43
Annex B (informative) Form for calculation of total stator inductance L_{ts}	45
Annex C (informative) Form for calculation of total leakage inductance L_σ	47
Annex D (informative) Form for calculation of magnetizing inductance L_m	49
Annex E (informative) Sample calculation	51
Figure 1 – Type-T equivalent circuit diagram	25
Figure 2 – Type-T equivalent circuit diagram (iron losses disregarded).....	25
Figure 3 – Type-L equivalent circuit diagram (iron losses disregarded)	25
Figure 4 – Typical characteristic of inductance L over current I	31

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES –

Partie 28: Méthodes d'essai pour la détermination des grandeurs des schémas d'équivalence des circuits pour moteurs à induction à cage basse tension triphasés

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de la CEI"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de la CEI intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de la CEI se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de la CEI. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que la CEI s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; la CEI ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de la CEI dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de la CEI et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) La CEI n'a prévu aucune procédure de marquage valant indication d'approbation et n'engage pas sa responsabilité pour les équipements déclarés conformes à une de ses Publications.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à la CEI, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de la CEI, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de la CEI ou de toute autre Publication de la CEI, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de la CEI peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 60034-28 a été établie par le comité d'études 2 de la CEI: Machines tournantes.

Le texte de cette Norme est basé sur les documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
2/1415/FDIS	2/1423/RVD

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

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/CEI, Partie 2.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

ROTATING ELECTRICAL MACHINES –

Part 28: Test methods for determining quantities of equivalent circuit diagrams for three-phase low-voltage cage induction motors

FOREWORD

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as "IEC Publication(s)"). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with an IEC Publication.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 60034-28 has been prepared by IEC technical committee 2: Rotating machinery.

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

FDIS	Report on voting
2/1415/FDIS	2/1423/RVD

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 publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 2.

Une liste de toutes les parties de la série CEI 60034, présentées sous le titre général *Machines électriques tournantes*, peut être consultée sur le site web de la CEI.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant la date de maintenance indiquée sur le site web de la CEI sous "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives à la publication recherchée. A cette date, la publication sera

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

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60034-28:2007

A list of all parts of IEC 60034 series, under the general title *Rotating electrical machines*, can be found on the IEC website.

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until the maintenance result date indicated on the IEC web site under "<http://webstore.iec.ch>" in the data related to the specific publication. At this date, the publication will be

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

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60034-28:2007

Withdrawn

INTRODUCTION

Les circuits équivalents sont largement utilisés dans la commande des entraînements à vitesse variable avec des moteurs à induction alimentés par des inverseurs de fréquence. Les paramètres de moteur sont exigés pour la réalisation des algorithmes de commande par orientation du flux ou autres algorithmes de commande à base de modèle. Leur connaissance est exigée par les fournisseurs et les ingénieurs systèmes, en particulier lorsque les moteurs et les inverseurs de fréquence de différents fournisseurs sont combinés.

La présente partie de la CEI 60034 fournit une méthode d'essai normalisée pour déterminer les paramètres des moteurs électriques. En même temps cette norme fournit une meilleure compréhension de la méthode de circuit équivalent. Les procédures peuvent être effectuées en laboratoires équipés pour des essais normalisés de machines électriques.

NOTE Le principal objectif de la présente norme est d'aider à la modélisation des moteurs régulés par la fréquence. Du fait des simplifications, les résultats ne peuvent pas être utilisés pour déterminer avec précision les caractéristiques et le rendement.

Spécification technique en rapport avec la présente norme, la CEI 60034-25 "Guide pour la conception et la performance des moteurs à induction à cage spécifiquement conçus pour l'alimentation du convertisseur" énumère les paramètres sans définitions ni méthodes de détermination.

INTRODUCTION

Equivalent circuits are widely used in the control of adjustable speed drives with induction motors supplied by frequency inverters. The motor parameters are required for the realisation of flux oriented control or other model-based control algorithms. Their knowledge is required by suppliers and system engineers, especially when motors and frequency inverters from different suppliers are combined.

This part of IEC 60034 provides a standardized test procedure to determine the electric motor parameters. At the same time this standard offers an improved understanding of the equivalent circuit method. The procedures can be carried out in laboratories equipped for standard electric machinery tests.

NOTE The standard's main purpose is for assistance in modelling frequency controlled motors. Due to the simplifications, the results cannot be used to determine motor performance or efficiency accurately.

A related technical specification is IEC 60034-25: "Guide for the design and performance of cage induction motors specifically designed for converter supply" where required motor parameters are listed, but their definition and methods of their determination are not included.

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60034-28:2007

MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES –

Partie 28: Méthodes d'essai pour la détermination des grandeurs des schémas d'équivalence des circuits pour moteurs à induction à cage basse tension triphasés

1 Domaine d'application

Cette partie de la CEI 60034 s'applique aux moteurs à induction à cage basse tension triphasés de désignations de carcasses entre 56 et 400, spécifiés dans la CEI 60072-1.

Cette norme définit des éléments normalisés de schémas de circuits équivalents monophasés et établit à partir d'essais des procédures pour obtenir des valeurs pour ces éléments.

2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

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

CEI 60044 (toutes les parties), *Transformateurs de mesure*

CEI 60051-1, *Appareils mesureurs électriques indicateurs analogiques à action directe et leurs accessoires – Partie 1: Définitions et exigences générales communes à toutes les parties*

CEI 60072-1, *Dimensions et séries de puissances des machines électriques tournantes – Partie 1: Désignation des carcasses entre 56 et 400 et des brides entre 55 et 1080*

3 Termes, définitions et symboles

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions donnés dans la CEI 60034-1 s'appliquent. Les symboles suivants s'appliquent.

3.1 Symboles

$\cos \varphi$ est le facteur de puissance

$\cos \varphi_N$ est le facteur de puissance assigné

f_1 est la fréquence d'alimentation du stator, s^{-1}

f_r est la fréquence du courant du rotor (fréquence de glissement), s^{-1}

f_N est la fréquence assignée, s^{-1}

h est la hauteur de la barre de conducteur-rotor, m

ROTATING ELECTRICAL MACHINES –

Part 28: Test methods for determining quantities of equivalent circuit diagrams for three-phase low-voltage cage induction motors

1 Scope

This part of IEC 60034 applies to three-phase low-voltage cage induction motors of frame numbers 56 to 400 as specified in IEC 60072-1.

This standard establishes procedures to obtain values for elements of single phase equivalent circuit diagrams from tests and defines standard elements of these diagrams.

2 Normative references

The following referenced documents are indispensable for the application of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

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

IEC 60044 (all parts), *Instrument transformers*

IEC 60051-1, *Direct acting indicating analogue electrical measuring instruments and their accessories – Part 1: Definitions and general requirements common to all parts*

IEC 60072-1, *Dimensions and output series for rotating electrical machines – Part 1: Frame numbers 56 to 400 and flange numbers 55 to 1080*

3 Terms, definitions and symbols

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC 60034-1 apply. The following symbols apply.

3.1 Symbols

$\cos \varphi$ is the power factor

$\cos \varphi_N$ is the rated power factor

f_1 is the stator supply frequency, s^{-1}

f_r is the frequency of the rotor current (slip frequency), s^{-1}

f_N is the rated frequency, s^{-1}

h is the height of the rotor-conductor bar, m

H	est la taille de la carcasse du moteur selon la CEI 60072-1 (hauteur d'arbre), mm
I	est le courant de ligne du stator, A
I_a	est une composante du courant utilisée pour les calculs, A
I_b	est une composante du courant utilisée pour les calculs, A
I_s	est le courant de phase du stator, A
I_r'	est le courant du rotor, A
I_{ra}	est une composante du courant utilisée pour les calculs, A
I_{rb}	est une composante du courant utilisée pour les calculs, A
I_m	est le courant magnétisant, A
I_N	est le courant assigné du stator, A
k_i	est le facteur d'effet de peau pour les inductances
k_r	est la réciproque du coefficient de température de résistance à 0°C du matériau du conducteur du rotor, voir la Note 1
k_s	est la réciproque du coefficient de température de résistance à 0°C du matériau du conducteur du stator, voir la Note 1
k_σ	est le rapport entre l'inductance de fuite du stator et celle du rotor
L_m	est l'inductance magnétisante, H
L_s	est l'inductance de fuite du stator, H
L_r'	est l'inductance de fuite du rotor, H
L_σ	est l'inductance de fuite totale ($= L_s + L_r'$), H
$L_{\sigma a}$	est l'inductance de fuite totale, abstraction faite de l'effet de peau, H
L_{ts}	est l'inductance du stator totale ($= L_m + L_s$), H
L_{tr}'	est l'inductance du rotor totale ($= L_m + L_r'$), H
n	est la vitesse de fonctionnement, s ⁻¹
n_N	est la vitesse assignée, s ⁻¹
n_{syn}	est la vitesse synchrone assignée, s ⁻¹
p	est le nombre de paires de pôles
P_1	est la puissance d'entrée électrique, W

H	is the motor frame size according to IEC 60072-1 (shaft height), mm
I	is the stator line-current, A
I_a	is a current component used for calculations, A
I_b	is a current component used for calculations, A
I_s	is the stator phase-current, A
I_r'	is the rotor current, A
I_{ra}	is a current component used for calculations, A
I_{rb}	is a current component used for calculations, A
I_m	is the magnetizing current, A
I_N	is the rated stator current, A
k_i	is the skin-effect factor for inductances
k_r	is the reciprocal of the temperature coefficient of resistance at 0 °C of the rotor conductor material, see Note 1
k_s	is the reciprocal of the temperature coefficient of resistance at 0 °C of the stator conductor material, see Note 1
k_σ	is the ratio of stator to rotor leakage inductance
L_m	is the magnetizing inductance, H
L_s	is the stator leakage inductance, H
L_r'	is the rotor leakage inductance, H
L_σ	is the total leakage inductance ($= L_s + L_r'$), H
$L_{\sigma a}$	is the total leakage inductance disregarding the skin effect, H
L_{ts}	is the total stator inductance ($= L_m + L_s$), H
L'_{tr}	is the total rotor inductance ($= L_m + L_r'$), H
n	is the operating speed, s ⁻¹
n_N	is the rated speed, s ⁻¹
n_{syn}	is the rated synchronous speed, s ⁻¹
p	is the number of pole pairs
P_1	is the electrical input power, W

P_k	sont les pertes constantes, W
P_{fw}	sont les pertes par frottement et par ventilation, W
P_{fe}	sont les pertes dans le fer, W
R	est la résistance de ligne, Ω
R_{fe}	est la résistance des pertes dans le fer du circuit équivalent, Ω
$R_{ll,m}$	est la résistance entre lignes du stator à la température initiale d'enroulement, Ω
$R_{s,25}$	est la résistance de phase du stator corrigée pour une température de 25 °C, Ω
R_r'	est la résistance de la cage du rotor, Ω
$R_{r,25}'$	est la résistance du rotor corrigée pour une température ambiante de 25 °C, Ω
$R_{r,m}'$	est la résistance du rotor à la température initiale d'enroulement, Ω
s	est le glissement, en valeur par unité de vitesse synchrone
s_N	est le glissement assigné
U	est la tension moyenne du stator, V
U_s	est la tension de phase du stator, V
U_m	est la chute de tension sur l'inductance magnétisante, V
U_{ma}	est une composante de la tension utilisée pour les calculs, V
U_{mb}	est une composante de la tension utilisée pour les calculs, V
U_N	est la tension assignée aux bornes, V
X_m	est la réactance magnétisante ($= 2\pi f_1 \cdot L_m$), Ω
X_s	est la réactance de fuite du stator ($= 2\pi f_1 \cdot L_s$), Ω
X_r'	est la réactance de fuite du rotor ($= 2\pi f_1 \cdot L_r'$), Ω
X_σ	est la réactance de fuite totale ($= 2\pi f_1 \cdot L_\sigma$), Ω
$X_{\sigma a}$	est la réactance de fuite totale, abstraction faite de l'effet de peau, Ω
X_{ts}	est la réactance totale du stator ($= 2\pi f_1 \cdot L_{ts}$), Ω
X'_{tr}	est la réactance totale du rotor ($= 2\pi f_1 \cdot L_{tr}'$), Ω
Z	est l'impédance du moteur, Ω

P_k	is the constant losses, W
P_{fw}	is the windage and friction losses, W
P_{fe}	is the iron losses, W
R	is the line resistance, Ω
R_{fe}	is the equivalent circuit resistance of iron losses, Ω
$R_{ll,m}$	is the stator line-to-line resistance at initial winding temperature, Ω
$R_{s,25}$	is the stator phase-resistance corrected to a temperature of 25 °C, Ω
R'_r	is the rotor cage resistance, Ω
$R'_{r,25}$	is the rotor resistance corrected to an ambient temperature of 25 °C, Ω
$R'_{r,m}$	is the rotor resistance at initial winding temperature, Ω
s	is the slip, in per unit value of synchronous speed
s_N	is the rated slip
U	is the stator terminal voltage, V
U_s	is the stator phase voltage, V
U_m	is the voltage drop over the magnetizing inductance, V
U_{ma}	is a voltage component used for calculations, V
U_{mb}	is a voltage component used for calculations, V
U_N	is the rated terminal voltage, V
X_m	is the magnetizing reactance ($= 2\pi f_1 \cdot L_m$), Ω
X_s	is the stator leakage reactance ($= 2\pi f_1 \cdot L_s$), Ω
X'_r	is the rotor leakage reactance ($= 2\pi f_1 \cdot L'_r$), Ω
X_σ	is the total leakage reactance ($= 2\pi f_1 \cdot L_\sigma$), Ω
$X_{\sigma a}$	is the total leakage reactance disregarding the skin-effect, Ω
X_{ts}	is the total stator reactance ($= 2\pi f_1 \cdot L_{ts}$), Ω
X'_{tr}	is the total rotor reactance ($= 2\pi f_1 \cdot L'_{tr}$), Ω
Z	is the motor impedance, Ω

- γ_r est la conductivité du conducteur du rotor, S/m, voir la Note 2
- ξ est le facteur de déplacement de courant du conducteur du rotor
- θ_0 est la température de l'enroulement à froid à la mesure de la résistance initiale, °C
- θ_L est la température de l'enroulement à la fin de l'essai thermique en charge, °C
- θ_{NL} est la température de l'enroulement à la fin de l'essai thermique à vide, °C

NOTE 1 Pour l'utilisation du cuivre $k = 235$, pour l'utilisation d'aluminium $k = 225$, sauf spécification contraire.

NOTE 2 Pour les barres en cuivre de rotor utiliser $\gamma_r = 56 \cdot 10^6$ S/m, pour les barres en aluminium de rotor utiliser $\gamma_r = 33 \cdot 10^6$ S/m sauf spécification contraire.

NOTE 3 Les symboles avec trait de soulignement (comme $\underline{U}$) représentent des valeurs complexes. Les symboles sans trait de soulignement représentent les valeurs absolues ($U = |\underline{U}| = \sqrt{[\text{Re}\{\underline{U}\}]^2 + [\text{Im}\{\underline{U}\}]^2}$). Les calculs conformément à cette norme sont limités aux valeurs absolues.

NOTE 4 Toutes les valeurs du rotor se réfèrent à l'enroulement du stator, les symboles correspondants sont marqués avec une prime (').

3.2 Connexion Y équivalente

Les grandeurs du schéma du circuit équivalent sont présentées comme des valeurs par phase dans la connexion en étoile équivalente. Le modèle mathématique de la machine doit être considéré comme connecté en étoile, y compris dans le cas de la connexion en triangle du moteur réel.

NOTE La connexion en étoile équivalente sert aussi de base d'expression des grandeurs des circuits équivalents en valeurs par unité.

4 Exigences d'essai

4.1 Fréquence et tension

La fréquence doit être égale à la fréquence d'essai spécifiée au cours des mesures $\pm 0,3$ %. La forme et la symétrie de la tension d'alimentation doivent être conformes aux exigences de 8.3.1 de la CEI 60034-1.

4.2 Instrumentation

4.2.1 Appareils de mesure pour les grandeurs électriques, la vitesse et la fréquence

Les appareils de mesure doivent avoir une classe de précision de 0,5 conformément à la CEI 60051-1. Toutefois, la classe de précision de mesure de la résistance doit être de 0,1.

Etant donné que la précision des appareils de mesure est généralement exprimée comme un pourcentage de la pleine échelle, la gamme des appareils de mesure choisis doit être la plus basse possible.

4.2.2 Transformateurs de mesure

Les transformateurs de mesure doivent avoir une classe de précision de 0,2 conformément à la CEI 60044.

4.2.3 Mesure de la température

Les appareils utilisés pour mesurer les températures doivent avoir une précision de ± 1 °C.

- γ_r is the conductivity of rotor conductor, S/m, see Note 2
- ξ is the current displacement factor of rotor conductor
- θ_0 is the temperature of the cold winding at initial resistance measurement, °C
- θ_L is the temperature of the winding at the end of the thermal load test, °C
- θ_{NL} is the temperature of the winding at the end of the thermal no-load test, °C

NOTE 1 For copper use $k = 235$, for aluminium use $k = 225$, unless otherwise specified.

NOTE 2 For copper rotor-bars use $\gamma_r = 56 \cdot 10^6$ S/m, for aluminium rotor-bars use $\gamma_r = 33 \cdot 10^6$ S/m unless otherwise specified.

NOTE 3 Symbols with underscore (like $\underline{U}$) represent complex values. Symbols without underscore represent absolute values ($U = |\underline{U}| = \sqrt{[\operatorname{Re}\{\underline{U}\}]^2 + [\operatorname{Im}\{\underline{U}\}]^2}$). The calculations according to this standard are limited to absolute values.

NOTE 4 All rotor values are referred to the stator winding; relevant symbols marked with a prime (').

3.2 Equivalent Y-connection

The quantities in the equivalent circuit diagram are presented as per-phase-values in equivalent Y-connection. The mathematical model of the machine shall be regarded as Y-connected, also in the case of delta connection of the actual motor.

NOTE The equivalent Y-connection is also the basis to express the equivalent circuit quantities as per-unit values.

4 Test requirements

4.1 Frequency and voltage

The frequency shall be within $\pm 0.3\%$ of the specified test frequency during measurements. The form and symmetry of the supply voltage shall conform to the requirements of 8.3.1 of IEC 60034-1.

4.2 Instrumentation

4.2.1 Measuring instruments for electrical quantities, speed and frequency

The measuring instruments shall have an accuracy class of 0,5 or better in accordance with IEC 60051-1. However, accuracy class for the measurement of resistance shall be 0,1.

Since instrument accuracy is generally expressed as a percentage of full scale, the range of the instrument chosen shall be as low as practical.

4.2.2 Instrument transformers

Instrument transformers shall have an accuracy class of 0,2 according to IEC 60044.

4.2.3 Temperature measurement

The instrumentation used to measure temperatures shall have an accuracy of ± 1 °C.

5 Approximations et incertitudes

Les procédures décrites pour obtenir les valeurs du schéma du circuit équivalent comprennent des approximations. En outre le schéma du circuit équivalent est en lui-même une approximation.

Les inductances sont déterminées en fonction du courant afin de prendre en compte les effets de saturation du noyau de fer. Cependant les pertes dans le fer sont négligées dans les formules de détermination de toutes les inductances.

Les effets des courants de Foucault sur les inductances et les résistances sont négligés parce que l'application des paramètres des circuits équivalents obtenus n'est pas destinée au processus de démarrage du moteur (c'est-à-dire application aux glissements entre 0 ... $\approx \pm 0,3$ uniquement).

L'hypothèse d'une résistance du rotor court-circuitée au cours de la détermination de l'inductance de fuite totale L_σ (voir 7.5) donnera généralement lieu à une erreur inférieure à 5 % sur la valeur obtenue ¹. L'effet sur l'inductance de magnétisation L_m (voir 7.6) est négligeable.

En outre, les fréquences du rotor relativement grandes (à $s = 2$ ou $s = 1$) au cours des essais pour l'inductance de fuite totale exigent la compensation de l'effet de peau. A moins que les données de la conception du rotor soient disponibles, le calcul doit être fondé sur une hauteur estimée de la barre-conducteur du rotor (voir 7.5.2).

La répartition de l'inductance de fuite totale L_σ dans les inductances de fuite du stator et du rotor (L_s et L_r' , voir 7.7) est fondée sur des hypothèses approximatives et ne peut pas être réalisée de manière précise par les méthodes décrites dans la présente norme.

La différence de la température du rotor et de la température d'enroulement est négligée au cours de la détermination de la résistance du rotor R_r' (voir 7.9).

Alors que les pertes dans le fer du stator sont comprises, celles du rotor ne sont pas prises en compte. Il s'agit d'une hypothèse valable pour des glissements compris entre 0 et le glissement de claquage. Cependant le processus de démarrage ne peut pas être représenté correctement.

En outre cette simplification donne lieu à des erreurs dans la détermination des inductances de fuite à partir de l'essai de rotation inverse (voir 6.5.2) étant donné que dans ce cas la fréquence du rotor devient deux fois la fréquence assignée.

Pour ajuster la résistance des pertes dans le fer du circuit équivalent à des fréquences différentes des fréquences assignées, il est nécessaire de connaître la répartition des pertes d'hystérésis par rapport aux pertes par courants de Foucault. La présente norme présente une approximation appropriée (voir 7.3.3).

6 Procédures d'essai

6.1 Généralités

Les sous-essais qui constituent cette procédure d'essai doivent être réalisés selon l'ordre indiqué. Il n'est pas essentiel que les essais soient réalisés immédiatement l'un après l'autre. Cependant, si les sous-essais sont réalisés individuellement, alors les conditions thermiques spécifiées doivent être rétablies avant d'obtenir les valeurs d'essais.

¹ Concernant de très petits moteurs (puissance assignée inférieure à 1 kW) l'erreur peut augmenter du fait des valeurs relativement grandes de la résistance du rotor.

5 Approximations and uncertainties

The procedures described to obtain the values of the equivalent circuit diagram include approximations. Furthermore, the equivalent circuit diagram is an approximation in itself.

The inductances are determined depending on current in order to take saturation effects of the iron core into account. However, iron losses are disregarded in the determination formulae of all inductances.

Eddy current effects on inductances and resistances are disregarded because the application of the obtained equivalent circuit parameters is not intended to the start-up process of the motor (i.e. application to slips between 0 ... $\approx \pm 0,3$ only).

The assumption of short-circuited rotor resistance during the determination of the total leakage inductance L_{σ} (see 7.5) will typically result in an error less than 5 % on the obtained value¹. The effect on the magnetizing inductance L_m (see 7.6) is negligible.

Furthermore the relatively large rotor frequencies (at $s = 2$ or $s = 1$) during the tests for total leakage inductance require skin-effect compensation. Unless rotor design data are available, the calculation must be based on an estimated rotor conductor-bar height (see 7.5.2).

The distribution of the total leakage inductance L_{σ} into stator and rotor leakage inductances (L_s and L'_r , see 7.7) is based on rough assumptions and cannot be performed accurately by the methods described in this standard.

The difference of rotor and winding temperature is neglected during the determination of rotor resistance R'_r (7.9).

While core losses in the stator are included, those in the rotor are disregarded. This is a valid assumption for slips between 0 and breakdown slip. However, the start-up situation cannot be represented correctly.

Furthermore, this simplification gives rise to errors in the determination of leakage inductances from the reverse rotation test (see 6.5.2) since the rotor frequency becomes twice the rated frequency in this case.

To adjust the equivalent iron loss resistance to other than rated frequencies, the distribution of hysteresis losses versus eddy current losses needs to be known. This standard presents a suitable approximation (see 7.3.3).

6 Test procedures

6.1 General

The subtests that make up this test procedure shall be performed in the sequence listed. It is not essential that the tests are carried out immediately one after another. However, if the subtests are performed individually, then the specified thermal conditions shall be re-established prior to obtaining the test data.

¹ For very small motors (rated power less than 1 kW) the error can increase due to the relatively large values of rotor resistance.

La moyenne arithmétique des trois courants de ligne et tensions de ligne doit être utilisée. La résistance entre lignes du stator est la valeur à travers deux bornes quelconques pour lesquelles une valeur de référence a été mesurée à une température connue.

Il est recommandé que chaque fois que des mesures de tension, courant, vitesse ou puissance pour un certain point de charge sont exigées les données d'essais réelles représentent une valeur moyenne de plusieurs échantillons prélevés à intervalles courts pour compenser les fluctuations de charge.

6.2 Mesure de la résistance entre lignes à courant continu du stator

La température de l'enroulement lorsque la résistance est mesurée ne doit pas différer du fluide de refroidissement de plus de 2 K.

Mesurer et enregistrer $R_{ll,m}$. La résistance doit être considérée comme la valeur moyenne des mesures des trois phases. Mesurer et enregistrer la température d'enroulement θ_0 conformément à 8.6.2. de la CEI 60034-1.

6.3 Charge d'essai

Avant de commencer à enregistrer les données pour cet essai, la température de l'enroulement du stator doit être au maximum égale à la température obtenue à partir d'un essai thermique en charge assignée à 5 °C près (voir la CEI 60034-1).

Appliquer la tension assignée de fréquence assignée aux bornes. Augmenter la charge jusqu'à ce que le courant de ligne I soit égal au courant assigné I_N .

Mesurer et enregistrer U , I , P_1 et n . Mesurer et enregistrer la température d'enroulement θ_1 conformément à 8.6.2. de la CEI 60034-1. La première lecture de la résistance doit être faite dans les temps spécifiés du Tableau 5 de la CEI 60034-1.

6.4 Essai à vide

L'essai à vide doit être effectué juste après l'essai de charge pour s'assurer de la stabilisation des pertes et d'une température définie.

Découpler le moteur de toute charge ou d'une autre machine. En réglant la tension d'alimentation à fréquence assignée mesurer et enregistrer U , I et P_1 pour au moins 10 valeurs de courant.

NOTE Il convient que cet essai soit fait avec un glissement aussi proche de zéro que possible. De ce fait, il convient que les joints ou autres dispositifs provoquant un frottement supplémentaire soient enlevés, le cas échéant.

La tension la plus élevée doit être choisie conformément aux capacités du laboratoire. Cependant elle ne doit pas être inférieure à 110 % de la tension assignée du moteur et ne doit pas dépasser la valeur qui donne lieu à un courant à vide supérieur à 150 % de la tension assignée. La tension la plus basse doit représenter approximativement 20 % de la tension assignée. Cependant elle ne doit pas tomber en dessous de la valeur à laquelle une réduction supplémentaire augmente le courant.

L'essai doit être effectué aussi rapidement que possible avec les lectures faites dans l'ordre décroissant de tension.

The arithmetic average of the three line currents and voltages shall be used. The stator line-to-line resistance is the value across any two terminals for which a reference value has been measured at known temperature.

It is recommended that whenever measurements of voltage, current, speed or power for a certain load point are required the actual test data is an average value of several samples taken in short time intervals to compensate for load fluctuations.

6.2 Stator d.c. line-to-line resistance measurement

The temperature of the winding when the resistance is measured shall not differ from the coolant by more than 2 K.

Measure and record $R_{ll,m}$. The resistance shall be taken as the average value from measurements of all three phases. Measure and record the winding temperature θ_0 according to 8.6.2 of IEC 60034-1.

6.3 Load-test

Before starting to record data for this test, the temperature of the stator winding shall be within 5 °C of the temperature obtained from a rated load thermal test (see IEC 60034-1).

Apply rated voltage of rated frequency to the terminals. Increase the load until the line current is equal to rated current I_N .

Measure and record U, I, P_1 and n . Measure and record the winding temperature θ_1 according to 8.6.2 of IEC 60034-1. The first reading of resistance shall be taken within the time specified in Table 5 of IEC 60034-1.

6.4 No-load test

The no-load test shall be done right after the load test to ensure stabilization of the losses and a defined temperature.

Decouple the motor from any load or other machine. By adjusting the supply voltage of rated frequency, measure and record U, I and P_1 for at least 10 values of current.

NOTE This test should be done with a slip as close to zero as possible. Therefore, seals or other devices causing additional friction should be removed if suitable.

The highest voltage shall be selected according to the capabilities of the laboratory. However, it shall be not less than 110 % of the rated voltage of the motor and not exceed the value that will result in a no-load current greater than 150 % of rated current. The lowest voltage shall be approximately 20 % of rated voltage. However, it shall not fall below the value where further reduction increases the current.

The test shall be carried out as quickly as possible with the readings taken in descending order of voltage.

Après l'essai, mesurer et enregistrer la température d'enroulement θ_{NL} conformément à 8.6.2. de la CEI 60034-1. La première lecture de la résistance doit être faite dans les temps spécifiés du tableau 5 de la CEI 60034-1.

6.5 Essais de rotation inverse et à rotor bloqué

6.5.1 Généralités

Pour des moteurs qui n'utilisent pas des conceptions à double cage ou à barres à encoche profonde (c'est-à-dire petit déplacement de courant) l'essai de rotation inverse (voir 6.5.2) est recommandé pour améliorer la précision. C'est habituellement le cas pour les moteurs jusqu'à une taille de carcasse 132. Pour des moteurs plus grands l'essai à rotor bloqué (voir 6.5.3) peut donner de meilleurs résultats. Cet essai n'est pas recommandé pour des moteurs de puissance de sortie assignée inférieure à 1 kW (en raison de l'inexactitude résultant de la grande résistance du rotor de ces machines).

6.5.2 Essai de rotation inverse

Coupler le moteur d'essai à une machine externe. Entraîner le moteur d'essai à vitesse synchrone n_{syn} par la machine externe. Appliquer une basse tension de séquence de phase inverse aux bornes de la machine ($f = -f_N$). Le glissement passera à 2,0. Augmenter la tension jusqu'à ce que le courant de ligne I soit égal à 1,5 fois le courant assigné I_N .

NOTE Le taux d'échauffement dans les barres de rotor des machines à 2 pôles peut être très élevé. Dans ces cas, afin d'éviter la destruction du rotor, un courant maximal de 1,25 fois le courant assigné est recommandé.

Mesurer et enregistrer U , I et P_1 pour au moins 10 valeurs de courant espacées de façon approximativement égale entre 150 % et 10 % de courant assigné I_N y compris une lecture sous un courant assigné.

Il est recommandé que les valeurs de courant utilisées pour cet essai correspondent aux valeurs utilisées en 6.4 au mieux. L'essai doit être effectué aussi rapidement que possible avec les lectures effectuées dans l'ordre décroissant de tension et de courant.

6.5.3 Essai à rotor bloqué

Bloquer le rotor et appliquer une tension basse de fréquence assignée $f = f_N$ aux bornes. Le glissement passera à 1,0. Augmenter la tension jusqu'à ce que le courant de ligne I soit égal à 1,5 fois le courant assigné I_N .

Mesurer et enregistrer U , I et P_1 pour au moins 10 valeurs de courant espacées de façon approximativement égale entre 150 % et 10 % de courant assigné I_N y compris une lecture pour le courant assigné.

Il est recommandé que les valeurs de courant utilisées pour cet essai correspondent aux valeurs utilisées en 6.4 au mieux. L'essai doit être effectué aussi rapidement que possible avec les lectures effectuées dans l'ordre décroissant de tension et de courant.

7 Détermination des grandeurs de moteurs

7.1 Généralités

Le schéma des circuits équivalents de type T (Figure 1) est normatif pour les moteurs traités dans cette norme. Une variante simplifiée sans la résistance équivalente de pertes dans le fer est donnée à la Figure 2. Le schéma de type L (Figure 3) est fourni à titre illustratif. Les schémas sont mathématiquement identiques.

After the test, measure and record the winding temperature θ_{NL} according to 8.6.2 of IEC 60034-1. The first reading of resistance shall be taken within the time specified in Table 5 of IEC 60034-1.

6.5 Reverse rotation and locked rotor tests

6.5.1 General

For motors which do not use double-cage or deep bar rotor designs (i.e. small current displacement) the reverse rotation test (see 6.5.2) is recommended to improve accuracy. This is usually the case for motors up to frame size 132. For larger motors, the locked rotor test (see 6.5.3) may give better results. This test is not recommended for motors less than 1 kW rated output power (due to inaccuracies resulting from the large rotor resistance of these machines).

6.5.2 Reverse rotation test

Couple the test motor to an external machine. Drive the test motor at synchronous speed n_{syn} by the external machine. Apply a low voltage of opposite phase sequence to the terminals of the machine ($f = -f_N$). The slip will become 2,0. Increase the voltage until the line current I equals 1,5 times rated current I_N .

NOTE The rate of temperature rise in rotor bars of 2-pole machines can be very large. In these cases, in order to avoid the rotor from being destroyed, a maximum current of 1,25 times rated current is recommended.

Measure and record U , I and P_1 for at least 10 values of current approximately equally spaced between 150 % and 10 % of rated current I_N including one reading at rated current.

It is recommended that the current values used for this test match the values used in 6.4 at the best. The test shall be carried out as quickly as possible with the readings taken in descending order of voltage and current.

6.5.3 Locked rotor test

Lock the rotor and apply low voltage of rated frequency $f = f_N$ to the terminals. The slip will become 1,0. Increase the voltage until the line current I equals 1,5 times rated current I_N .

Measure and record U , I and P_1 for at least 10 values of current approximately equally spaced between 150 % and 10 % of rated current I_N including one reading at rated current.

It is recommended that the current values used for this test match the values used in 6.4 at the best. The test shall be carried out as quickly as possible with the readings taken in descending order of voltage and current.

7 Determination of motor quantities

7.1 General

The T-type equivalent circuit diagram (Figure 1) is normative for the motors addressed in this standard. A simplified variant without the equivalent resistance of iron losses is given in Figure 2. The L-type diagram (Figure 3) is provided for illustrative purposes. The diagrams are mathematically identical.

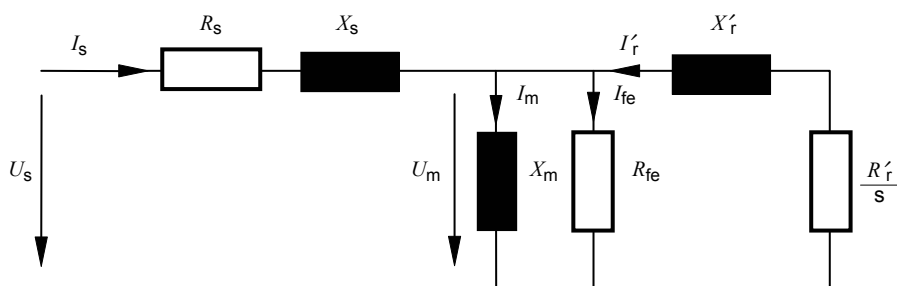


Figure 1 – Schéma des circuits équivalents de type T

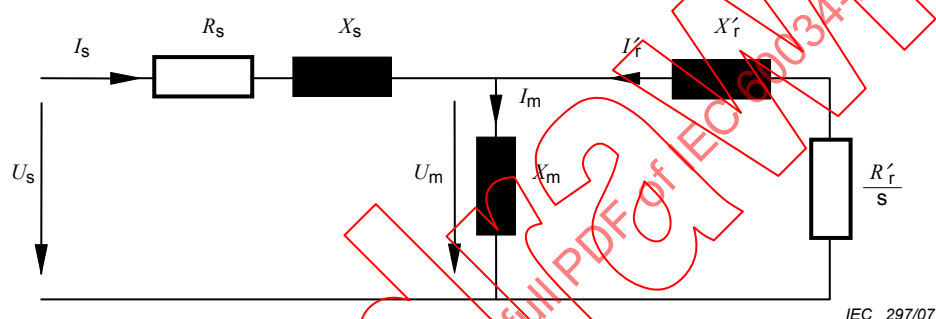


Figure 2 – Schéma des circuits équivalents de type T
(sans tenir compte des pertes dans le fer)

Les résistances sont corrigées à une température ambiante de 25 °C. Elles doivent être converties en température réelle de moteur par l'utilisateur avant application des valeurs (par exemple par l'inverseur de fréquence en fonction des lectures d'un dispositif thermosensible).

La résistance équivalente des pertes dans le fer R_{fe} ne doit cependant pas être corrigée en température mais en fréquence lors de l'application d'une fréquence autre que la fréquence assignée.

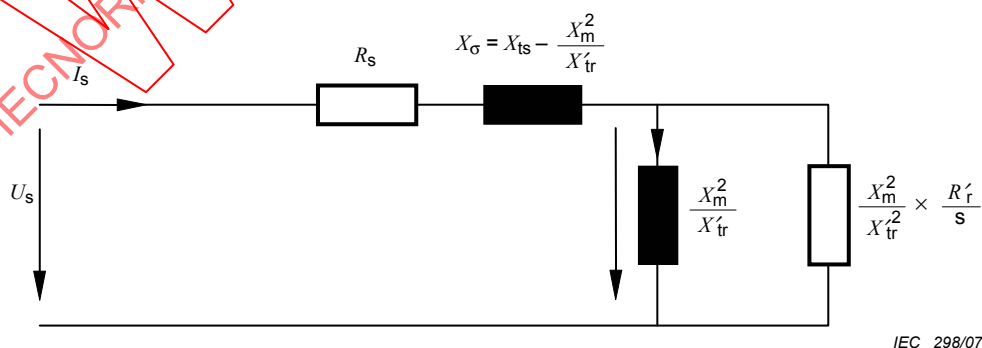


Figure 3 – Schéma des circuits équivalents de type L
(sans tenir compte des pertes dans le fer)

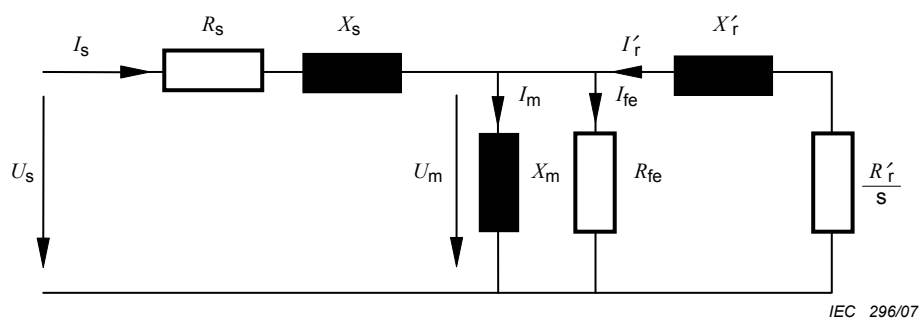


Figure 1 – Type-T equivalent circuit diagram

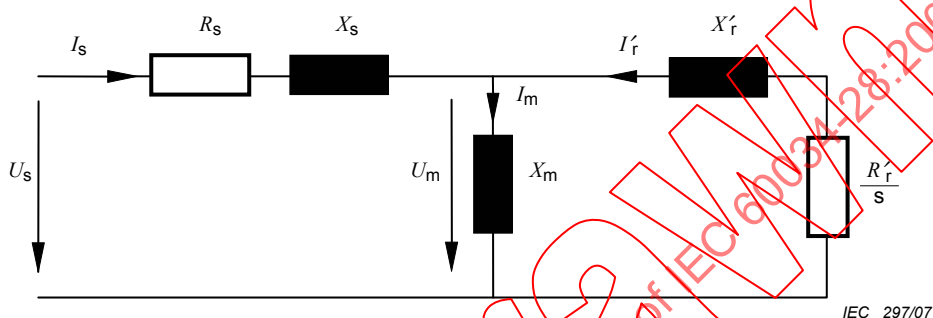


Figure 2 – Type-T equivalent circuit diagram (iron losses disregarded)

Resistances are corrected to an ambient temperature of 25 °C. They shall be converted to the actual motor temperature by the user before application of the values (for example by the frequency inverter depending on readings of a temperature sensing device).

The equivalent resistance of core losses R_{fe} however shall not be temperature but frequency corrected when applying other than rated frequency.

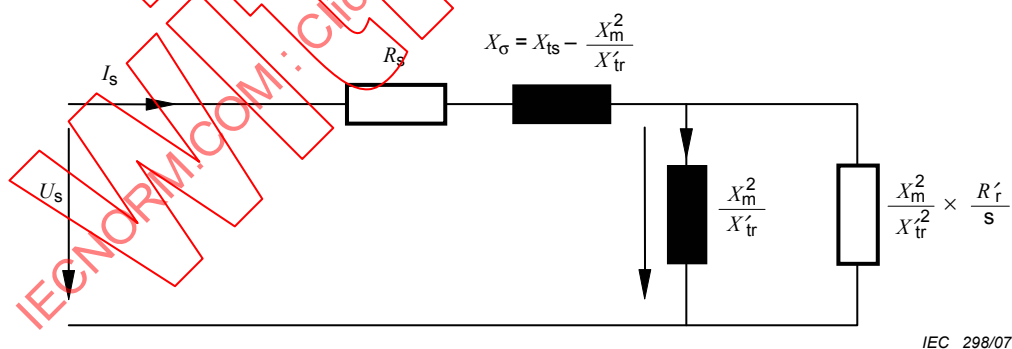


Figure 3 – Type-L equivalent circuit diagram (iron losses disregarded)

7.2 Résistance de l'enroulement du stator R_s

La résistance de l'enroulement du stator R_s est déterminée par la résistance de ligne mesurée $R_{ll,m}$ (voir 6.2) corrigée à une température d'enroulement de référence de 25 °C

- en cas d'enroulements à couplage en étoile (Y) ou d'enroulements à couplage en étoile équivalents:

$$R_{s,25} = \frac{1}{2} \cdot R_{ll,m} \cdot \frac{k_s + 25}{k_s + \theta_0}$$

- en cas d'enroulements à couplage en triangle (Δ):

$$R_{s,25} = \frac{3}{2} \cdot R_{ll,m} \cdot \frac{k_s + 25}{k_s + \theta_0}$$

7.3 Résistance équivalente de pertes dans le fer R_{fe}

7.3.1 Pertes constantes

La soustraction des pertes d'enroulement du stator à vide de la puissance d'entrée à vide donne les pertes constantes P_k qui sont les sommes des pertes par frottement, par ventilation et dans le fer.

Pour chaque valeur de tension enregistrée en 6.4, soustraire les pertes d'enroulement du stator à vide de la puissance d'entrée pour obtenir les pertes constantes:

$$P_k = P_1 - 3 \cdot I_s^2 \cdot R_{s,25} \cdot \frac{k_s + \theta_{NL}}{k_s + 25}$$

où

$I_s = I$ pour les enroulements à couplage en étoile (Y) ou les enroulements équivalents à couplage en étoile.

$I_s = I / \sqrt{3}$ pour les enroulements à couplage en triangle (Δ).

7.3.2 Pertes par ventilation et par frottement

Pour chacune des valeurs de tension enregistrées avec 50 % ou inférieures de tension assignée au cours de l'essai à vide (voir 6.4) tracer les pertes constantes P_k , comme défini en 7.3.1 par rapport à la tension au carré U^2 . En extrapolant une ligne droite jusqu'à la tension zéro, l'intersection avec l'axe de la tension zéro correspond aux pertes par ventilation et par frottement P_{fw} .

Les pertes par ventilation et par frottement sont considérées comme indépendantes de la charge. Elles ne sont pas comprises dans le schéma des circuits équivalents mais peuvent être prises en compte par la réduction de la puissance de sortie mécanique calculée. Les pertes par frottement dépendent linéairement de la vitesse du moteur n . Les pertes par ventilation dépendent de la puissance trois de la vitesse n^3 .

7.3.3 Pertes fer

Déterminer les pertes dans le fer par $P_{fe} = P_k - P_{fw}$.

7.2 Resistance of stator winding R_s

The stator winding resistance R_s is determined from the measured line resistance $R_{ll,m}$ (see 6.2) corrected to a reference winding temperature of 25 °C

- in the case of star-connected (Y) or equivalent star-connected windings:

$$R_{s,25} = \frac{1}{2} \cdot R_{ll,m} \cdot \frac{k_s + 25}{k_s + \theta_0}$$

- in the case of delta-connected (Δ) windings:

$$R_{s,25} = \frac{3}{2} \cdot R_{ll,m} \cdot \frac{k_s + 25}{k_s + \theta_0}$$

7.3 Equivalent resistance of iron losses R_{fe}

7.3.1 Constant losses

Subtracting the no-load stator winding losses from the no-load power input gives the constant losses P_k which are the sum of the friction, windage and core losses.

For each value of voltage recorded in 6.4, subtract the no-load stator winding losses from the input power to obtain the constant losses:

$$P_k = P_1 - 3 \cdot I_s^2 \cdot R_{s,25} \cdot \frac{k_s + \theta_{NL}}{k_s + 25}$$

where

$I_s = I$ for star-connected (Y) or equivalent star-connected windings;

$I_s = I / \sqrt{3}$ for delta-connected (Δ) windings.

7.3.2 Windage and friction losses

For each of the values of voltage recorded with 50 % or less of rated voltage during the no-load test (see 6.4) plot the constant losses P_k , as determined in 7.3.1 against the voltage squared U^2 . Extrapolating a straight line to zero voltage, the intercept with the zero voltage axis is the friction and windage losses P_{fw} .

Windage and friction losses are considered to be independent of load. They are not included in the equivalent circuit diagram but can be taken into account by reduction of the calculated mechanical output power. Friction losses are linearly dependent on motor speed n . Windage losses depend on the third power of the speed n^3 .

7.3.3 Iron losses

Determine the iron losses from $P_{fe} = P_k - P_{fw}$.

Déterminer la résistance équivalente des pertes dans le fer:

$$R_{fe} = \frac{3 \cdot U_s^2}{P_{fe}}$$

où

$U_s = U_N / \sqrt{3}$ pour les enroulements à couplage en étoile (Y) ou les enroulements équivalents à couplage en étoile;

$U_s = U_N$ pour les enroulements à couplage en triangle (Δ).

La résistance R_{fe} ne doit pas être corrigée en température lors de l'application du schéma des circuits équivalents.

Cependant la résistance R_{fe} doit être corrigée en fréquence lors du calcul du circuit équivalent pour une fréquence f autre que la fréquence assignée f_N par la formule suivante:

$$R_{fe}' = R_{fe} \cdot \left(\frac{f}{f_N} \right)^{0,5} \quad \text{sachant que} \quad \frac{P_{fe}'}{P_{fe}} = \frac{U^2}{R_{fe}'} \cdot \frac{R_{fe}}{U_N^2} \sim \frac{f^{1,5} \cdot \left(\frac{U}{f} \right)^2}{f_N^{1,5} \cdot \left(\frac{U_N}{f_N} \right)^2}$$

NOTE La valeur de la puissance de 1,5 par rapport aux variations de fréquence est un compromis entre les deux parties qui constituent la perte dans le fer (pertes par hystérésis $\sim f$ et pertes par courant de Foucault $\sim f^2$) et bien adaptée à la tôle ayant des pertes spécifiques de 6,5 ... 8,0 W/kg à 50 Hz, 1,5 T. Pour des moteurs avec tôle ayant des pertes spécifiques de 4,0 W/kg ou supérieure, des valeurs inférieures peuvent être appropriées en raison de l'impact réduit des pertes par courant de Foucault.

7.4 Inductance du stator totale $L_{ts} = L_m + L_s$

A $s = 0$ la résistance du rotor équivalente R_r' / s devient infinie et de ce fait la partie réactive des résultats de l'impédance mesurée résulte uniquement de la connexion en série des deux inductances.

NOTE $L_\sigma + \frac{L_m^2}{L_{tr}} = L_{ts} - \frac{L_m^2}{L_{tr}} + \frac{L_m^2}{L_{tr}} = L_{ts}$, voir Figure 3.

Dans ce cas, le courant de ligne I est égal au courant de magnétisation I_m .

Pour chacun des courants de ligne mesurés I (voir 6.4):

Déterminer l'impédance du moteur et le facteur de puissance

- dans le cas d'enroulements à couplage en étoile (Y) ou d'enroulements équivalents à couplage en étoile:

$$Z_{s=0} = \frac{U}{I \cdot \sqrt{3}}$$

Determine the equivalent resistance of iron losses:

$$R_{fe} = \frac{3 \cdot U_s^2}{P_{fe}}$$

where

$$U_s = U_N / \sqrt{3} \quad \text{for star-connected (Y) or equivalent star-connected windings;}$$

$$U_s = U_N \quad \text{for delta-connected (Δ) windings.}$$

The resistance R_{fe} must not be temperature-corrected when applying the equivalent circuit diagram.

However, the resistance R_{fe} shall be frequency-corrected when calculating the equivalent circuit for a frequency f other than rated frequency f_N by the following formula:

$$R'_{fe} = R_{fe} \cdot \left(\frac{f}{f_N} \right)^{0.5} \quad \text{since} \quad \frac{P'_{fe}}{P_{fe}} = \frac{U^2}{R'_{fe} U_N^2} \cdot \frac{R_{fe}}{U_N^2} \sim \frac{f^{1.5} \cdot \left(\frac{U}{f} \right)^2}{f_N^{1.5} \cdot \left(\frac{U_N}{f_N} \right)^2}$$

NOTE The power value of 1,5 related to frequency variations is a compromise between the two parts that make up the iron losses (hysteresis losses $\sim f$ and eddy current losses $\sim f^2$) and well-suited for electro sheet having specific losses of 6,5 ... 8,0 W/kg at 50 Hz, 1,5 T. In cases of electro sheet having specific losses of 4,0 W/kg or better, lower values may be more appropriate due to reduced impact of the eddy current loss component.

7.4 Total stator inductance $L_{ts} = L_m + L_s$

At $s = 0$, the equivalent rotor resistance R'_s becomes infinite and therefore the reactive part of the measured impedance results only from the serial connection of the two inductances.

NOTE $L_\sigma + \frac{L_m^2}{L_{tr}} = L_{ts} - \frac{L_m^2}{L_{tr}} + \frac{L_m^2}{L_{tr}} = L_{ts}$; see Figure 3.

In this case, the line-current I is equal to the magnetizing current I_m .

For each of the measured line-currents I (see 6.4):

Determine the motor impedance and power factor

– in the case of star-connected (Y) or equivalent star-connected windings:

$$Z_{s=0} = \frac{U}{I \cdot \sqrt{3}}$$

- dans le cas d'enroulements à couplage en triangle (Δ):

$$Z_{s=0} = \frac{U \cdot \sqrt{3}}{I}$$

Déterminer le facteur de puissance: $\cos \varphi = \frac{P_1}{U \cdot I \cdot \sqrt{3}}$

Déterminer la résistance: $R_{s=0} = Z_{s=0} \cdot \cos \varphi$

Déterminer le courant de magnétisation

- en cas d'enroulements à couplage en étoile (Y) ou d'enroulements équivalents à couplage en étoile:

$$I_m = I$$

- en cas d'enroulements à couplage en triangle (Δ):

$$I_m = \frac{I}{\sqrt{3}}$$

Déterminer la réactance totale du stator: $X_{ts} = \sqrt{Z_{s=0}^2 - R_{s=0}^2}$

Déterminer l'inductance totale du stator: $L_{ts} = \frac{X_{ts}}{2\pi \cdot f_N}$

Tracer les valeurs de L_{ts} par rapport aux valeurs de I (voir la Figure 4 pour une caractéristique typique).

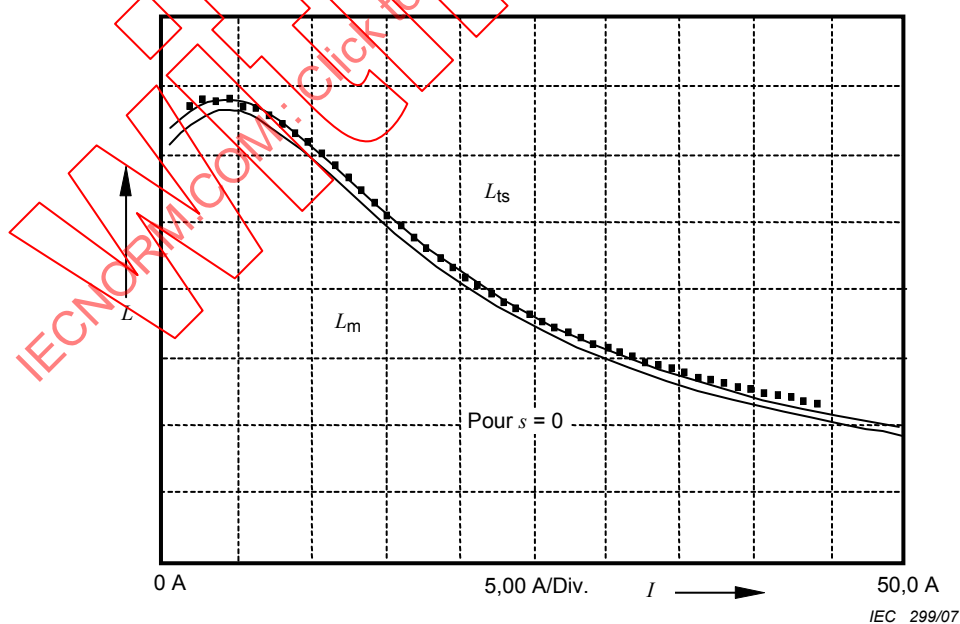


Figure 4 – Caractéristiques typiques d'inductance L sur le courant I

- in the case of delta-connected (Δ) windings:

$$Z_{s=0} = \frac{U \cdot \sqrt{3}}{I}$$

Determine the power factor: $\cos \varphi = \frac{P_1}{U \cdot I \cdot \sqrt{3}}$

Determine the resistance: $R_{s=0} = Z_{s=0} \cdot \cos \varphi$

Determine the magnetizing-current

- in the case of star-connected (Y) or equivalent star-connected windings:

$$I_m = I$$

- in the case of delta-connected (Δ) windings:

$$I_m = \frac{I}{\sqrt{3}}$$

Determine the total stator reactance:

$$X_{ts} = \sqrt{Z_{s=0}^2 - R_{s=0}^2}$$

Determine the total stator inductance: $L_{ts} = \frac{X_{ts}}{2\pi \cdot f_N}$

Plot the values of L_{ts} against the values of I (see Figure 4 for a typical characteristic).

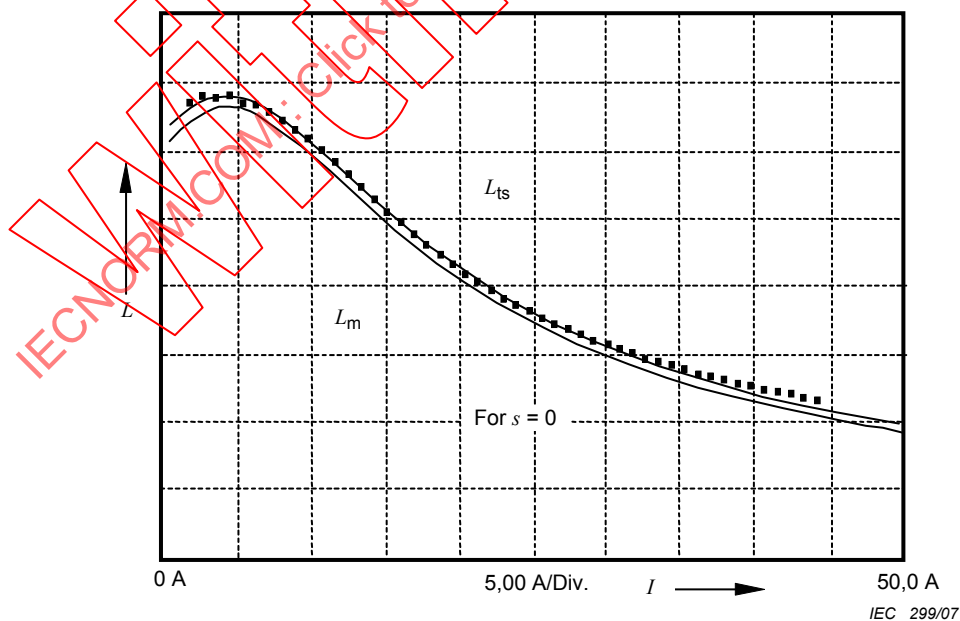


Figure 4 – Typical characteristic of inductance L over current I

7.5 Inductance de fuite totale L_{σ}

7.5.1 Généralités

Avec de grandes valeurs de glissement, la résistance du rotor équivalente R_r' / s devient négligeable comparée à la réactance $2\pi f L_m^2 / L_r'$ et de ce fait la partie réactive de l'impédance mesurée résulte principalement de l'inductance de fuite totale L_{σ} (voir la Figure 4).

Si l'essai de rotation inverse selon 6.5.2 a été réalisé le glissement sera plus grand ($s = 2$, $f_{\text{rotor}} = 2 \cdot f_N$) comparé à l'essai à rotor bloqué 6.5.3 ($s = 1$; $f_{\text{rotor}} = f_N$), mais les résultats ne sont pas toujours plus précis étant donné que le déplacement de courant est bien plus grand et diffère davantage du fonctionnement assigné ($f_{\text{rotor}} \approx 0$).

Les méthodes décrites dans la présente norme permettent uniquement de déterminer la somme des inductances de fuite du stator et du rotor.

Si des détails de conception sont disponibles, utiliser le rapport calculé $k_{\sigma} = L_s / L_r$. Sinon pour des moteurs de conception spéciale (tels que les rotors à double cage ou à barres en cuivre à encoche profonde) il faut utiliser par définition le rapport $k_{\sigma} = L_s / L_r' = 0,67$ et pour les moteurs à une seule cage, le rapport $k_{\sigma} = L_s / L_r' = 1$.

Pour chacun des courants de ligne mesurés I (6.5.2 ou 6.5.3):

Déterminer l'impédance du moteur et le facteur de puissance

- en cas d'enroulements à couplage en étoile (Y) ou d'enroulements équivalents à couplage en étoile:

$$Z = \frac{U}{I \cdot \sqrt{3}}$$

- en cas d'enroulements à couplage en triangle (Δ):

$$Z = \frac{U \cdot \sqrt{3}}{I}$$

Déterminer le facteur de puissance:

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{U \cdot I \cdot \sqrt{3}}$$

Déterminer la résistance:

$$R = Z \cdot \cos \varphi$$

Déterminer le courant du stator

- dans le cas d'enroulements à couplage en étoile (Y) ou d'enroulements équivalents à couplage en étoile:

$$I_s = I$$

- dans le cas d'enroulements à couplage en triangle (Δ):

$$I_s = \frac{I}{\sqrt{3}}$$

Déterminer la réactance totale de fuite:

$$X_{\sigma a} = \sqrt{Z^2 - R^2}$$

7.5 Total leakage inductance L_{σ}

7.5.1 General

At large slip values the equivalent rotor resistance R_r'/s becomes negligible compared to the reactance $2\pi f L_m^2 / L_{lr}'$ and therefore the reactive part of the measured impedance results mainly from the total leakage inductance L_{σ} (see Figure 4).

If the reverse rotation test according to 6.5.2 has been performed, the slip will be larger ($s = 2$, $f_{\text{rotor}} = 2 \cdot f_N$) compared to the locked rotor test 6.5.3 ($s = 1$; $f_{\text{rotor}} = f_N$), but the results are not always more accurate as the current displacement is much larger and differs more from rated operation ($f_{\text{rotor}} \approx 0$).

The methods described in this standard permit only to determine the sum of the stator and rotor leakage inductances.

If design details are available, use the calculated ratio $k = L_s/L_r'$. Otherwise, for special design motors (such as double-cage or deep bar rotors) the ratio $k = L_s/L_r' = 0,67$ and for single cage motors the ratio $k = L_s/L_r' = 1$ shall be used by definition.

For each of the measured line-currents I (6.5.2 or 6.5.3).

Determine motor impedance and power factor

- in the case of star-connected (Y) or equivalent star-connected windings:

$$Z = \frac{U}{I \cdot \sqrt{3}}$$

- in the case of delta-connected (Δ) windings:

$$Z = \frac{U \cdot \sqrt{3}}{I}$$

Determine the power factor:

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{U \cdot I \cdot \sqrt{3}}$$

Determine the resistance:

$$R = Z \cdot \cos \varphi$$

Determine the stator current

- in the case of star-connected (Y) or equivalent star-connected windings:

$$I_s = I$$

- in the case of delta-connected (Δ) windings:

$$I_s = \frac{I}{\sqrt{3}}$$

Determine the total leakage reactance:

$$X_{\sigma a} = \sqrt{Z^2 - R^2}$$

Déterminer l'inductance totale de fuite:
$$L_{\sigma a} = \frac{X_{\sigma a}}{2\pi \cdot f_N}$$

7.5.2 Correction du déplacement de courant par calcul

Le calcul est fondé sur l'hypothèse de barres de rotor de forme rectangulaire. Pour les cas les plus pratiques la précision de cette procédure est suffisante.

Déterminer la hauteur estimée conductrice de la barre du rotor:

$$h = \left(0,21 - \frac{2p}{100}\right) \cdot \frac{H}{1000}$$

où p est le nombre de paires de pôles.

NOTE La taille H de la carcasse du moteur est la hauteur d'arbre en millimètres. Il convient que la hauteur réelle de la partie conductrice de la barre soit utilisée si la conception interne du moteur est connue. Il convient que le facteur réel d'effet de peau soit utilisé s'il est disponible auprès du fabricant, surtout en cas de rotors à double cage.

Déterminer la hauteur réduite ξ :
$$\xi = h \cdot \sqrt{\pi \cdot 2f \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \gamma_r}$$
 pour des essais selon 6.5.2

ou:
$$\xi = h \cdot \sqrt{\pi \cdot f \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \gamma_r}$$
 pour des essais selon 6.5.3

où γ_r est la conductivité des barres de rotor en S/m.

Déterminer le facteur d'effet de peau:

$$k_i = \frac{3}{2\xi} \cdot \frac{\sinh(2\xi) - \sin(2\xi)}{\cosh(2\xi) - \cos(2\xi)}$$

Déterminer l'inductance totale de fuite:

$$L_{\sigma} = L_{\sigma a} \cdot \frac{k_{\sigma} + 1}{k_{\sigma} + k_i}$$

Tracer les valeurs de L_{σ} par rapport aux valeurs de I .

7.5.3 Correction du déplacement de courant par mesure

Les essais conformes à 6.5 doivent être répétés à des fréquences d'alimentation différentes. Il est recommandé d'utiliser au moins trois fréquences (fréquence assignée, moitié et quart de fréquence assignée).

Pour chacun des courants de ligne mesurés, les valeurs d'inductance de fuite (7.5) doivent être tracées par rapport à la fréquence et une courbe doit être obtenue pour extrapoler l'inductance à $f_{\text{rotor}} = 0$.

Etant donné que la dépendance par rapport à la fréquence du déplacement de courant est une fonction complexe, aucune formule d'extrapolation ne peut être donnée.

La précision des résultats n'est pas toujours meilleure que la formule d'estimation utilisée en 7.5.2.

Determine the total leakage inductance:
$$L_{\sigma a} = \frac{X_{\sigma a}}{2\pi \cdot f_N}$$

7.5.2 Current displacement correction by calculation

The calculation is based on the assumption of rectangular shaped rotor bars. For most practical cases the accuracy of this procedure is sufficient.

Determine the estimated rotor conductor-bar height:

$$h = \left(0,21 - \frac{2p}{100} \right) \cdot \frac{H}{1000}$$

where p is the number of pole-pairs.

NOTE Motor frame size H is the shaft height in millimetres. The actual conductor-bar height should be used if the internal motor-design is known. Especially, in the case of double-cage rotors, the actual skin-effect factor k_i should be used if available from the manufacturer.

Determine ξ :
$$\xi = h \cdot \sqrt{\pi \cdot 2f \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \gamma_r}$$
 for tests according to 6.5.2

or:
$$\xi = h \cdot \sqrt{\pi \cdot f \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \gamma_r}$$
 for tests according to 6.5.3

where γ_r is the conductivity of the rotor-bars in S/m.

Determine the skin-effect factor:

$$k_i = \frac{3}{2\xi} \cdot \frac{\sinh(2\xi) - \sin(2\xi)}{\cosh(2\xi) - \cos(2\xi)}$$

Determine the total leakage inductance:

$$L_{\sigma} = L_{\sigma a} \cdot \frac{k_{\sigma} + 1}{k_{\sigma} + k_i}$$

Plot the values of L_{σ} against the values of I .

7.5.3 Current displacement correction by measurement

The tests according to 6.5 shall be repeated at different supply frequencies. It is advisable to use at least three frequencies (rated frequency, half and one quarter of rated frequency).

For each of the measured line currents the values of leakage inductance (see 7.5) shall be plotted against frequency and a curve shall be obtained to extrapolate the inductance to $f_{\text{rotor}} = 0$.

Since the frequency dependency of current displacement is a complex function, no extrapolation formula can be given.

The accuracy of the results is not always better than the estimation formulae used in 7.5.2.

7.6 Inductance de magnétisation L_m et tension U_m

Pour chacun des courants de magnétisation I_m , déterminer l'inductance totale du stator L_{ts} de 7.4 et calculer l'inductance de fuite totale correspondante L_σ de 7.5 par interpolation des valeurs déterminées linéaires avec le courant de phase I_s . L'inductance de magnétisation L_m devient:

$$L_m = L_{ts} - L_s = L_{ts} - \frac{L_\sigma}{1 + 1/k_\sigma}$$

Tracer les valeurs de L_m par rapport aux valeurs de I (voir la figure 4 pour des caractéristiques types).

Déterminer la tension de magnétisation:

$$U_m = 2\pi \cdot f_N \cdot L_m \cdot I_m$$

Tracer les valeurs de L_m par rapport aux valeurs de U_m .

7.7 Inductances de fuite du stator et du rotor L_s et L_r'

Pour chacune des valeurs déterminées de l'inductance totale du stator L_{ts} (voir 7.4), de l'inductance de fuite totale L_σ (voir 7.5) et de l'inductance de magnétisation L_m (voir 7.6), les inductances de fuite deviennent:

$$L_s = L_{ts} - L_m ; \quad L_r' = L_\sigma - L_s$$

Tracer les valeurs de L_s et de L_r' par rapport aux valeurs de I_m .

7.8 Inductances pour calculs à flux constant (charge assignée)

Pour des calculs simplifiés dans de nombreuses applications, les inductances sont supposées être constantes. Dans ce cas, les inductances doivent être données pour un fonctionnement assigné:

NOTE Jusqu'à présent toutes les inductances ont été calculées en fonction du courant qui les parcourt. Afin de déterminer les inductances pour le fonctionnement assigné, il est ainsi nécessaire d'obtenir I_s , I_r' et I_m (ou U_m) pour le fonctionnement assigné.

Déterminer le courant du stator pour le fonctionnement assigné:

- dans le cas d'enroulements à couplage en étoile (Y) ou d'enroulements équivalents couplage en étoile:

$$I_s = I_N$$

- dans le cas d'enroulements à couplage en triangle (Δ):

$$I_s = \frac{I_N}{\sqrt{3}}$$

Déterminer l'inductance L_s de 7.7 par interpolation linéaire avec le courant du stator I_s .

Déterminer la tension du stator:

dans le cas d'enroulements à couplage en étoile (Y) ou d'enroulements à couplage équivalents en étoile:

7.6 Magnetizing inductance L_m and voltage U_m

For each of the magnetizing currents I_m determine the total stator inductance L_{ts} from 7.4, and calculate the corresponding total leakage inductance L_σ from 7.5 by interpolating the determined values linear with phase current I_s . The magnetizing inductance L_m becomes:

$$L_m = L_{ts} - L_s = L_{ts} - \frac{L_\sigma}{1 + 1/k_\sigma}$$

Plot the values of L_m against the values of I (see Figure 4 for a typical characteristic).

Determine the magnetizing voltage:

$$U_m = 2\pi \cdot f_N \cdot L_m \cdot I_m$$

Plot the values of L_m against the values of U_m .

7.7 Stator and rotor leakage inductances L_s and L_r'

For each of the determined values of total stator inductance L_{ts} (see 7.4), total leakage inductance L_σ (see 7.5) and magnetizing inductance L_m (see 7.6) the leakage inductances become:

$$L_s = L_{ts} - L_m ; \quad L_r' = L_\sigma - L_s$$

Plot the values of L_s and L_r' against the values of I_m .

7.8 Inductances for calculations at constant flux (rated load)

For simplified calculations in many applications the inductances are assumed to be constant. In that case, the inductances shall be given for rated operation:

NOTE So far, all inductances have been calculated dependent on the current flowing through them. In order to determine the inductances for rated operation, it is therefore required to obtain I_s , I_r' and I_m (or U_m) for rated load.

Determine the stator current for rated operation:

in the case of star-connected (Y) or equivalent star-connected windings:

$$I_s = I_N$$

in the case of delta-connected (Δ) windings:

$$I_s = \frac{I_N}{\sqrt{3}}$$

Determine the inductance L_s from 7.7 by linear interpolation with the stator current I_s .

Determine the stator voltage:

in the case of star-connected (Y) or equivalent star-connected windings:

$$U_s = \frac{U_N}{\sqrt{3}}$$

dans le cas d'enroulements à couplage en triangle (Δ):

$$U_s = U_N$$

Déterminer la tension de magnétisation:

$$\begin{aligned} U_{ma} &= U_s - I_s \cdot \left(\cos \varphi_N \cdot R_{s,25} + \sqrt{1 - (\cos \varphi_N)^2} \cdot 2\pi \cdot f_N \cdot L_s \right) \\ U_{mb} &= I_s \cdot \left(\sqrt{1 - (\cos \varphi_N)^2} \cdot R_{s,25} - \cos \varphi_N \cdot 2\pi \cdot f_N \cdot L_s \right) \\ U_m &= \sqrt{U_{ma}^2 + U_{mb}^2} \end{aligned}$$

Déterminer l'inductance L_m de 7.6 par interpolation linéaire avec la tension de magnétisation U_m .

Déterminer le courant à travers l'inductance de fuite du rotor L_r' :

$$I_r' = \sqrt{\left(\frac{U_{mb}}{2\pi \cdot f_N \cdot L_m} - I_s \cdot \cos \varphi_N \right)^2 + \left(I_s \cdot \sqrt{1 - (\cos \varphi_N)^2} - \frac{U_{ma}}{2\pi \cdot f_N \cdot L_m} \right)^2}$$

Déterminer l'inductance L_r' de 7.7 par interpolation linéaire avec le courant du stator I_r' .

7.9 Résistance de la cage du rotor R_r' en référence à l'enroulement du stator

A partir de l'essai de 6.3:

Déterminer le glissement:
$$s = \frac{n_{syn} - n}{n_{syn}}$$

Déterminer la tension et le courant du stator

- dans le cas d'enroulements à couplage en étoile (Y) ou d'enroulements à couplage équivalents en étoile:

$$U_s = \frac{U}{\sqrt{3}} \quad ; \quad I_s = I$$

- dans le cas d'enroulements à couplage en triangle (Δ):

$$U_s = U \quad ; \quad I_s = \frac{I}{\sqrt{3}}$$

Déterminer le facteur de puissance:
$$\cos \varphi = \frac{P_1}{U \cdot I \cdot \sqrt{3}}$$

Déterminer l'inductance de fuite du stator L_s de 7.7 par interpolation linéaire avec le courant du stator I_s .

$$U_s = \frac{U_N}{\sqrt{3}}$$

in the case of delta-connected (Δ) windings:

$$U_s = U_N$$

Determine the magnetizing voltage:

$$U_{ma} = U_s - I_s \cdot \left(\cos \varphi_N \cdot R_{s,25} + \sqrt{1 - (\cos \varphi_N)^2} \cdot 2\pi \cdot f_N \cdot L_s \right)$$

$$U_{mb} = I_s \cdot \left(\sqrt{1 - (\cos \varphi_N)^2} \cdot R_{s,25} - \cos \varphi_N \cdot 2\pi \cdot f_N \cdot L_s \right)$$

$$U_m = \sqrt{U_{ma}^2 + U_{mb}^2}$$

Determine the inductance L_m from 7.6 by linear interpolation with the magnetizing voltage U_m .

Determine the current through rotor leakage inductance L_r' :

$$I_r' = \sqrt{\left(\frac{U_{mb}}{2\pi \cdot f_N \cdot L_m} - I_s \cdot \cos \varphi_N \right)^2 + \left(I_s \cdot \sqrt{1 - (\cos \varphi_N)^2} - \frac{U_{ma}}{2\pi \cdot f_N \cdot L_m} \right)^2}$$

Determine the inductance L_r' from 7.7 by linear interpolation with the rotor current I_r' .

7.9 Resistance of rotor cage R_r' referred to stator winding

From the load test of 6.3:

Determine the slip:
$$s = \frac{n_{syn} - n}{n_{syn}}$$

Determine stator voltage and current

- in the case of star-connected (Y) or equivalent star-connected windings:

$$U_s = \frac{U}{\sqrt{3}} \quad ; \quad I_s = I$$

- in the case of delta-connected (Δ) windings:

$$U_s = U \quad ; \quad I_s = \frac{I}{\sqrt{3}}$$

Determine the power factor:
$$\cos \varphi = \frac{P_1}{U \cdot I \cdot \sqrt{3}}$$

Determine the stator leakage inductance L_s from 7.7 by interpolating linear with the stator current I_s .

Déterminer la tension de magnétisation:

$$U_{ma} = U_s - I_s \cdot \left[\cos \varphi \cdot R_{s,25} \cdot \frac{k_s + \theta_L}{k_s + 25} + \sqrt{1 - (\cos \varphi)^2} \cdot 2\pi \cdot f_N \cdot L_s \right]$$

$$U_{mb} = I_s \cdot \left[\sqrt{1 - (\cos \varphi)^2} \cdot R_{s,25} \cdot \frac{k_s + \theta_L}{k_s + 25} - \cos \varphi \cdot 2\pi \cdot f_N \cdot L_s \right]$$

$$U_m = \sqrt{U_{ma}^2 + U_{mb}^2}$$

Déterminer l'inductance de magnétisation L_m de 7.6 par interpolation linéaire avec la tension de magnétisation U_m .

Déterminer le courant du stator:

$$I_r' = \sqrt{\left(\frac{U_{mb}}{2\pi \cdot f_N \cdot L_m} - I_s \cdot \cos \varphi \right)^2 + \left(I_s \cdot \sqrt{1 - (\cos \varphi)^2} - \frac{U_{ma}}{2\pi \cdot f_N \cdot L_m} \right)^2}$$

Déterminer l'inductance de fuite du rotor L_r' de 7.7 par interpolation linéaire avec le courant du stator I_r' .

Déterminer l'impédance du moteur

- dans le cas d'enroulements à couplage en étoile (Y) ou d'enroulements équivalents à couplage en étoile:

$$Z = \frac{U}{I \cdot \sqrt{3}}$$

- dans le cas d'enroulements à couplage en triangle (Δ):

$$Z = \frac{U \cdot \sqrt{3}}{I}$$

Déterminer la réactance du moteur

$$X = Z \cdot \sqrt{1 - (\cos \varphi)^2}$$

Déterminer les réactances.

$$X_r' = 2\pi \cdot f_N \cdot L_r'$$

$$X_s = 2\pi \cdot f_N \cdot L_s$$

$$X_m = 2\pi \cdot f_N \cdot L_m$$

Déterminer la résistance du rotor en référence à l'enroulement du stator et corrigée pour une température de référence de 25 °C:

$$R_{r,25}' = s \cdot (X_r' + X_m) \cdot \sqrt{\frac{X_m \cdot X_r' - (X - X_s)}{X_m + X_r'}} \cdot \frac{k_r + 25}{k_r + \theta_L}$$

Determine the magnetizing voltage:

$$U_{ma} = U_s - I_s \cdot \left[\cos \varphi \cdot R_{s,25} \cdot \frac{k_s + \theta_L}{k_s + 25} + \sqrt{1 - (\cos \varphi)^2} \cdot 2\pi \cdot f_N \cdot L_s \right]$$

$$U_{mb} = I_s \cdot \left[\sqrt{1 - (\cos \varphi)^2} \cdot R_{s,25} \cdot \frac{k_s + \theta_L}{k_s + 25} - \cos \varphi \cdot 2\pi \cdot f_N \cdot L_s \right]$$

$$U_m = \sqrt{U_{ma}^2 + U_{mb}^2}$$

Determine the magnetizing inductance L_m from 7.6 by interpolating linear with the magnetizing voltage U_m .

Determine the rotor current:

$$I_r' = \sqrt{\left(\frac{U_{mb}}{2\pi \cdot f_N \cdot L_m} - I_s \cdot \cos \varphi \right)^2 + \left(I_s \cdot \sqrt{1 - (\cos \varphi)^2} - \frac{U_{ma}}{2\pi \cdot f_N \cdot L_m} \right)^2}$$

Determine the rotor leakage inductance L_r' from 7.7 by linear interpolation with the rotor current I_r' .

Determine the motor impedance

- in the case of star-connected (Y) or equivalent star-connected windings:

$$Z = \frac{U}{I \cdot \sqrt{3}}$$

- in the case of delta-connected (Δ) windings.

$$Z = \frac{U \cdot \sqrt{3}}{I}$$

Determine the motor reactance

$$X = Z \cdot \sqrt{1 - (\cos \varphi)^2}$$

Determine the reactances:

$$X_r' = 2\pi \cdot f_N \cdot L_r'$$

$$X_s = 2\pi \cdot f_N \cdot L_s$$

$$X_m = 2\pi \cdot f_N \cdot L_m$$

Determine the rotor resistance referred to stator winding and corrected to a reference temperature of 25 °C:

$$R_{r,25}' = s \cdot (X_r' + X_m) \cdot \sqrt{\frac{X_m \cdot X_r' - (X - X_s)}{X_m + X_r'}} \cdot \frac{k_r + 25}{k_r + \theta_L}$$

Annexe A (informative)

Formulaire pour le calcul de résistance des pertes dans le fer R_{fe}

[illegible]

Annex A

(informative)

Form for calculation of resistance of iron losses R_{fe}

[illegible]

Annexe B (informative)

Formulaire pour le calcul de l'inductance totale du stator L_{ts}

[illegible]