

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Rotating electrical machines –

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

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**





THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2012 IEC, Geneva, Switzerland

All rights reserved. Unless otherwise specified, 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 either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester.

If you have any questions about IEC copyright or have an enquiry about obtaining additional rights to this publication, please contact the address below or your local IEC member National Committee for further information.

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, 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 la CEI ou du Comité national de la CEI du pays du demandeur.

Si vous avez des questions sur le copyright de la CEI ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de la CEI de votre pays de résidence.

IEC Central Office
3, rue de Varembé
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel.: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00
info@iec.ch
www.iec.ch

About the IEC

The International Electrotechnical Commission (IEC) is the leading global organization that prepares and publishes International Standards for all electrical, electronic and related technologies.

About IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC. Please make sure that you have the latest edition, a corrigenda or an amendment might have been published.

Useful links:

IEC publications search - www.iec.ch/searchpub

The advanced search enables you to find IEC publications by a variety of criteria (reference number, text, technical committee,...).

It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Stay up to date on all new IEC publications. Just Published details all new publications released. Available on-line and also once a month by email.

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing more than 30 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) on-line.

Customer Service Centre - webstore.iec.ch/csc

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre: csc@iec.ch.

A propos de la CEI

La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est la première organisation mondiale qui élabore et publie des Normes internationales pour tout ce qui a trait à l'électricité, à l'électronique et aux technologies apparentées.

A propos des publications CEI

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu. Veuillez vous assurer que vous possédez l'édition la plus récente, un corrigendum ou amendement peut avoir été publié.

Liens utiles:

Recherche de publications CEI - www.iec.ch/searchpub

La recherche avancée vous permet de trouver des publications CEI en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...).

Elle donne aussi des informations sur les projets et les publications remplacées ou retirées.

Just Published CEI - webstore.iec.ch/justpublished

Restez informé sur les nouvelles publications de la CEI. Just Published détaille les nouvelles publications parues. Disponible en ligne et aussi une fois par mois par email.

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne au monde de termes électroniques et électriques. Il contient plus de 30 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans les langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) en ligne.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions contactez-nous: csc@iec.ch.

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Rotating electrical machines –

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

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**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX

U

ICS 29.160

ISBN 978-2-83220-553-2

Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor.

Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.

CONTENTS

FOREWORD.....	4
INTRODUCTION.....	6
1 Scope.....	7
2 Normative references	7
3 Terms, definitions, symbols and conventions	7
3.1 Terms and definitions	7
3.2 Symbols	8
3.3 Subscripts	9
3.4 Winding connection	9
4 Test requirements	10
4.1 General.....	10
4.2 Frequency and voltage	10
4.3 Instrumentation	10
4.3.1 Measuring instruments for electrical quantities, speed and frequency.....	10
4.3.2 Instrument transformers.....	10
4.3.3 Temperature measurement.....	10
5 Approximations and uncertainties	10
6 Test procedures	11
6.1 General.....	11
6.2 Stator d.c. line-to-line resistance measurement.....	11
6.3 Load-test at rated load	11
6.4 Load curve test.....	12
6.5 No-load test.....	12
6.6 Reverse rotation and locked rotor tests	13
6.6.1 General	13
6.6.2 Reverse rotation test	13
6.6.3 Locked rotor test.....	13
7 Determination of motor quantities	13
7.1 General.....	13
7.2 Resistance of stator winding R_S	15
7.3 Total stator inductance $L_{TS} = L_M + L_{\sigma S}$	15
7.3.1 General	15
7.3.2 Determination procedure	15
7.4 Equivalent resistance of iron losses $R_{fe\Gamma}$	16
7.4.1 Constant losses	16
7.4.2 Friction and windage losses.....	17
7.4.3 Iron losses.....	17
7.5 Total leakage inductance $L_{t\sigma}$	18
7.5.1 General	18
7.5.2 Distribution of leakage inductances between stator and rotor.....	18
7.5.3 Determination of total leakage inductance from a reverse rotation or locked rotor test (6.6)	18
7.5.4 Determination of total leakage inductance from a load curve test (6.4)	20
7.6 Magnetizing inductance L_M and voltage U_M	21
7.6.1 From a reverse rotation or locked rotor test (6.6)	21
7.6.2 From a load curve test (6.4).....	21

7.7	Stator and rotor leakage inductances $L_{\sigma S}$ and $L_{\sigma r}'$	22
7.7.1	From a reverse rotation or locked rotor test (6.6)	22
7.7.2	From a load curve test (6.4)	22
7.8	Inductances for calculations at constant flux (rated load)	22
7.9	Resistance of rotor cage R_r' referred to the stator winding and frequency	23
7.10	Equivalent resistance of iron losses R_{fe}	25
Annex A (informative)	Sample calculation	26
Figure 1	– Type-T equivalent circuit diagram	14
Figure 2	– Type-T equivalent circuit diagram (iron losses disregarded)	14
Figure 3	– Type-L equivalent circuit diagram (iron losses disregarded)	14
Figure 4	– Type-Γ equivalent circuit diagram	15
Figure 5	– Typical characteristics of inductance L over current I	16

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 itself does not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC is not responsible for any services carried out by independent certification bodies.
- 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.

This second edition cancels and replaces the first edition published in 2007. This edition constitutes a technical revision.

This edition includes the following significant technical changes with respect to the previous edition.

- a) The formulae are now all given for equivalent star-connection equivalent circuit diagrams. They are applied even in the case of delta connected windings. All formulae for delta-connected equivalent circuit diagrams have been moved to notes.
- b) Procedures for the determination of equivalent circuit parameters from a load curve test as an alternative to the reverse rotation and locked rotor tests have been added.

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

FDIS	Report on voting
2/1685/FDIS	2/1688/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.

NOTE A table of cross-references of all IEC TC 2 publications can be found in the IEC TC 2 dashboard on the IEC website.

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until the stability 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.

IMPORTANT – The 'colour inside' logo on the cover page of this publication indicates that it contains colours which are considered to be useful for the correct understanding of its contents. Users should therefore print this document using a colour printer.

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

NOTE This 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/TS 60034-25 where required motor parameters are listed, but their definition and methods of determination are not included.

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 the IEC 60034 series 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 documents, in whole or in part, are normatively referenced in this document and are indispensable for its application. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60034-1:2010, *Rotating electrical machines – Part 1: Rating and performance*

IEC 60034-2-1, *Rotating electrical machines – Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles)*

IEC 60034-2-2, *Rotating electrical machines – Part 2-2: Specific methods for determining separate losses of large machines from tests – Supplement to IEC 60034-2-1*

IEC 60034-2-3¹, *Rotating electrical machines – Part 2-3: Specific test methods for determining losses and efficiency of converter-fed AC motors*

IEC/TS 60034-25², *Rotating electrical machines – Part 25: A.C. Motors when used in power drive systems - Application guide*

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, symbols and conventions

3.1 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC 60034-1:2010 apply.

¹ To be published.

² A revision of this publication is currently under preparation.

3.2 Symbols

The following symbols apply:

$\cos \varphi$	is the power factor
$\cos \varphi_N$	is the rated power factor
f	is the stator supply frequency, Hz
f_r	is the frequency of the rotor current (slip frequency), Hz
f_N	is the rated frequency, Hz
h	is the height of the rotor-conductor bar, m
H	is the motor frame size according to IEC 60072-1 (distance from the centre-line of the shaft to the bottom of the feet (basic dimension)), mm
I	is the stator line current, A
I_S	is the stator phase current, A
I_r'	is the rotor phase current, 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 the stator to the rotor leakage inductances
L_m	is the magnetizing inductance, H
$L_{\sigma S}$	is the stator leakage inductance, H
$L_{\sigma r}'$	is the rotor leakage inductance, H
$L_{t\sigma}$	is the total leakage inductance ($= L_{\sigma S} + L_{\sigma r}'$), H
$L_{\sigma a}$	is the total leakage inductance disregarding the skin effect, H
L_{tS}	is the total stator inductance ($= L_m + L_{\sigma S}$), H
L_{tr}'	is the total rotor inductance ($= L_m + L_{\sigma r}'$), H
n	is the operating speed, min ⁻¹
n_N	is the rated speed, min ⁻¹
n_{syn}	is the rated synchronous speed, min ⁻¹
p	is the number of pole pairs
P_S	is the electrical input power, W
P_{2N}	is the mechanical output power, W
P_k	is the constant losses, W
P_{fw}	is the friction and windage losses, W
P_{fe}	is the iron losses, W
R	is the line-to-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
$R_{S,25^\circ}$	is the stator phase-resistance corrected to a temperature of 25 °C, Ω
R_r'	is the rotor cage resistance, Ω
$R_{r,25^\circ}'$	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_N	is the rated terminal voltage, V
X_m	is the magnetizing reactance ($= 2\pi f_N \cdot L_m$), Ω
$X_{\sigma s}$	is the stator leakage reactance ($= 2\pi f_N \cdot L_{\sigma s}$), Ω
$X_{\sigma r}'$	is the rotor leakage reactance ($= 2\pi f_N \cdot L_{\sigma r}'$), Ω
$X_{t\sigma}$	is the total leakage reactance ($= 2\pi f_N \cdot L_{t\sigma}$), Ω
$X_{\sigma a}$	is the total leakage reactance disregarding the skin effect ($= 2\pi f_N \cdot L_{\sigma a}$), Ω
X_{ts}	is the total stator reactance ($= 2\pi f_N \cdot L_{ts}$), Ω
X_{tr}'	is the total rotor reactance ($= 2\pi f_N \cdot L_{tr}'$), Ω
Z	is the line impedance, Ω
γ_r	is the conductivity of rotor conductor, S/m, see Note 2
θ_0	is the temperature of the cold winding at initial resistance measurement, $^{\circ}\text{C}$
θ_L	is the temperature of the winding at the end of the thermal load test, $^{\circ}\text{C}$
θ_{NL}	is the temperature of the winding at the end of the thermal no-load test, $^{\circ}\text{C}$

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

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

NOTE 3 For calculations in this standard, voltages and currents are r.m.s. magnitude values (different from vectors in complex calculations).

NOTE 4 All rotor values are referred to the stator winding and frequency.

3.3 Subscripts

L, NL, 0	test conditions
m, ma, mb	magnetizing quantities
N	rated value
r, tr	rotor quantities
s, ts	stator quantities
σ , $t\sigma$	leakage quantities

3.4 Winding connection

The mathematical model of the machine shall be regarded as Y-connected, regardless of the actual connection of the motor (delta or star). The quantities in the equivalent circuit diagram shall be presented as per phase values in equivalent Y-connection.

NOTE For reference purposes the formulae required to calculate a delta-connected equivalent circuit diagram are also given as notes. In case of delta connected motors these formulae can be used to create an equivalent circuit diagram which represents the internal winding currents better than a circuit diagram in equivalent Y-connection.

4 Test requirements

4.1 General

The tests shall be carried out with regard to the requirements for the tests given in IEC 60034-2-1, IEC 60034-2-2, IEC 60034-2-3 and IEC/TS 60034-25, as applicable.

4.2 Frequency and voltage

The frequency shall be within $\pm 0,3$ % of specified test frequency during measurements. The form and symmetry of the supply voltage shall conform to the requirements of 8.3.1 of IEC 60034-1:2010.

4.3 Instrumentation

4.3.1 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.

4.3.2 Instrument transformers

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

4.3.3 Temperature measurement

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

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 to $\pm 0,3$).

The assumption of short-circuited rotor resistance during the determination of the total leakage inductance $L_{t\sigma}$ (7.4) will typically result in an error less than 5 % on the obtained value. The effect on the magnetizing inductance L_m (7.6) is negligible.

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

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 7.5.3.3). But rotor design data is preferable. This standard introduces an alternative procedure (7.5.4) for the determination of leakage inductances from a load curve test that avoids these difficulties.

The distribution of the total leakage inductance $L_{t\sigma}$ into stator and rotor leakage inductances ($L_{\sigma s}$ and $L_{\sigma r}$, see 7.7) is based on rough assumptions and cannot be performed accurately by the methods described in this standard.

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

While iron losses in the stator are included, those in the rotor are disregarded. This is a valid assumption for slips between 0 and breakdown slip. Therefore, 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 6.6.2) since the rotor frequency becomes twice the rated frequency in this case.

To adjust the equivalent iron loss resistance to frequencies other than rated frequencies the distribution of hysteresis losses versus eddy current losses needs to be known. This standard presents a suitable approximation (see 7.4.3).

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.

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 60034-1:2010.

6.3 Load-test at rated load

Before starting to record data for this test, the temperature of the stator winding shall be within 2 K 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 I equals rated current I_N .

Measure and record U , I , P_S and n . Measure and record the winding temperature θ_L according to 8.6.2 of IEC 60034-1:2010. The first reading of resistance shall be taken within the time specified in Table 5 of IEC 60034-1:2010.

6.4 Load curve test

This test is only required for the determination procedure according to 7.5.4 and is an alternative to the reverse rotation and locked rotor tests (6.6).

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

Apply the load to the machine for at least 10 points. The load points should be chosen to be approximately equally spaced between not less than 25 % and up to and including 125 % load. When loading the machine, start at the highest load value and proceed in descending order to the lowest. The tests shall be performed as quickly as possible to minimize temperature changes in the machine during testing.

Measure the line-to-line resistance R before the highest and after the lowest reading. The resistance for 100 % load and higher loads shall be the value determined before the highest load reading. The resistance used for loads less than 100 % shall then be determined as linear with load, using the reading before the test for the highest load and after the lowest reading for the lowest load.

Preferably, resistances may also be determined by measuring the stator winding temperatures using a temperature-sensing device installed on the winding. Resistances for each load point may then be determined from the temperature of the winding at that point in relation to the resistance and temperature measured before the start of the test.

Measure and record for each load point U , I , P_S and n .

Determine R for each load point.

6.5 No-load test

The no-load test shall be started after the load test. Decouple the motor from any load or other machine. Run the motor without load until the no-load losses have stabilized.

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.

By adjusting the supply voltage at rated frequency, measure and record U , I and P_S for at least 10 values of voltage.

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.

One of the test voltages shall be the rated voltage of the machine.

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

After the test, measure and record the winding temperature θ_{NL} according to 8.6.2 of IEC 60034-1:2010. The first reading of resistance shall be taken within the time specified in Table 5 of IEC 60034-1:2010.

6.6 Reverse rotation and locked rotor tests

6.6.1 General

Reverse rotation and locked rotor tests are only required for the determination procedure according to 7.5.3 and are an alternative to the load curve test (6.4).

For motors which do not use double-cage or deep bar rotor designs (i.e. small current displacement) the reverse rotation test (6.6.2) is recommended to improve accuracy. This is usually the case for motors up to frame size 132. For larger motors, the locked rotor test (6.6.3) may give better results. This test is not recommended for motors less than 1 kW rated output power (due to the inaccuracies resulting from the large rotor resistance of these machines).

6.6.2 Reverse rotation test

Couple the tested motor to an external machine. Drive the tested 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 .

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_S 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 (6.5) at the best. The test shall be carried out as quickly as possible with the readings taken in descending order of voltage and current.

6.6.3 Locked rotor test

Lock the rotor and apply low voltage of rated frequency $f = f_N$ to the terminals. The slip is then 1,0. Increase the voltage until the line current I reaches up to 1,5 times rated current I_N maximum.

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_S for at least 10 values of current approximately equally spaced between maximum 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 (6.5) 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 type-T 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.

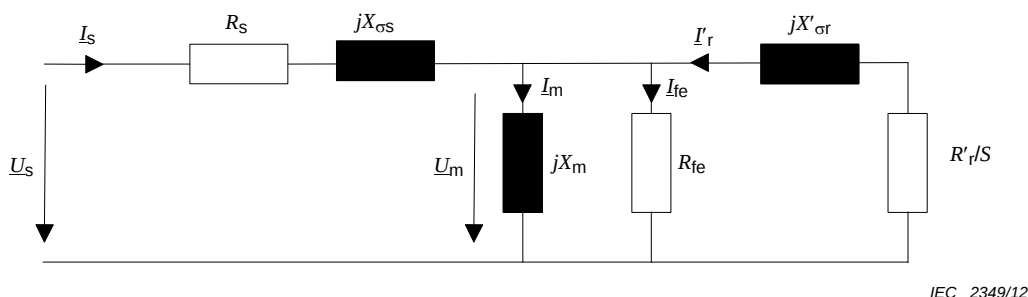


Figure 1 – Type-T equivalent circuit diagram

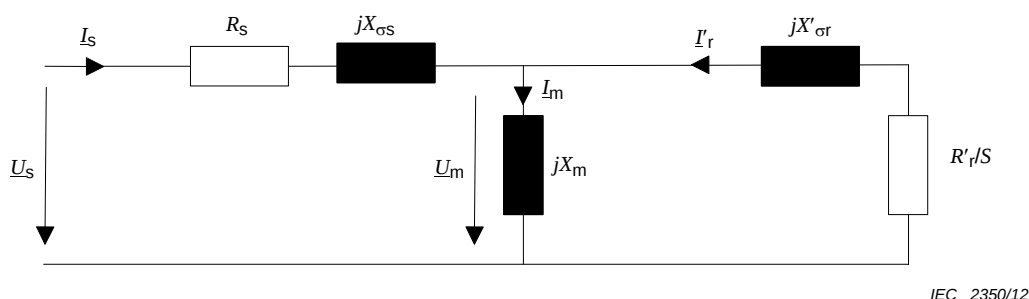


Figure 2 – Type-T equivalent circuit diagram (iron losses disregarded)

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 iron losses R_{fe} however shall not be temperature but frequency corrected when applying a frequency other than rated frequency.

The type-L (Figure 3) diagram is provided for illustrative purposes. Both type-L and type-Γ (Figure 4) diagrams are mathematically identical to the type-T diagram.

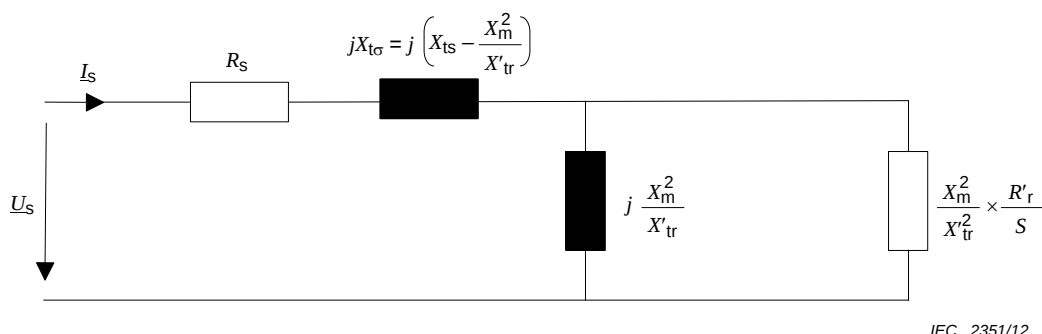


Figure 3 – Type-L equivalent circuit diagram (iron losses disregarded)

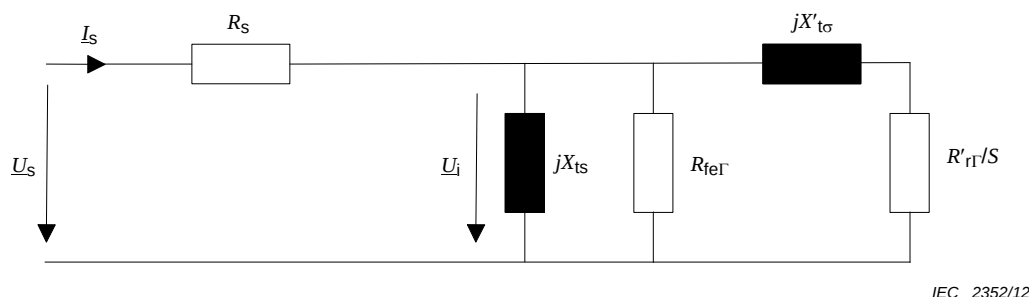


Figure 4 – Type-Γ equivalent circuit diagram

7.2 Resistance of stator winding R_s

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

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

NOTE For the calculation of an equivalent circuit diagram for delta-connection: $R_{s,25} = \frac{3}{2} \cdot R_{ll,m} \cdot \frac{k_s + 25}{k_s + \theta_0}$

7.3 Total stator inductance $L_{ts} = L_m + L_{\sigma s}$

7.3.1 General

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

NOTE See Figure 3: $L_{t\sigma} + \frac{L_m^2}{L_{tr}} = L_{ts} - \frac{L_m^2}{L_{tr}} + \frac{L_m^2}{L_{tr}} = L_{ts}$

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

7.3.2 Determination procedure

For each of the measured no-load points (6.5):

Determine the line impedance $Z_{s=0} = \frac{U}{I \cdot \sqrt{3}}$

NOTE 1 For the calculation of an equivalent circuit diagram for delta-connection: $Z_{s=0} = \frac{U \cdot \sqrt{3}}{I}$

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: $I_m = I$

NOTE 2 For the calculation of an equivalent circuit diagram for delta-connection: $I_m = \frac{I}{\sqrt{3}}$

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_m (see Figure 5 for a typical characteristic of inductance L against current I).

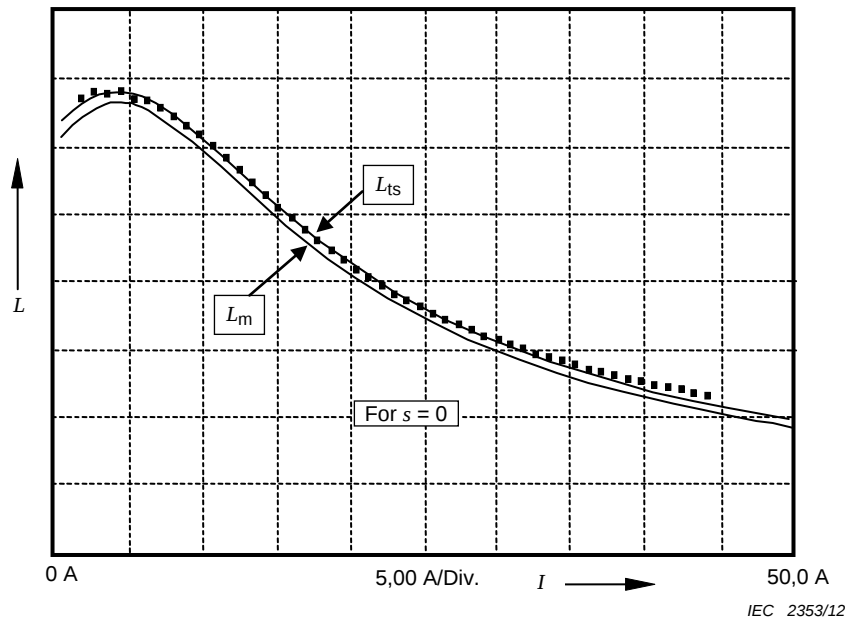


Figure 5 – Typical characteristics of inductance L over current I

Determine the inner machine voltage:

$$U_{i,s=0} = \sqrt{\left(\frac{U}{\sqrt{3}} - R_{s=0} \cdot I_m \cdot \cos \varphi\right)^2 + \left(\sqrt{1 - (\cos \varphi)^2} \cdot R_{s=0} \cdot I_m\right)^2}$$

NOTE 3 For the calculation of an equivalent circuit diagram for delta-connection:

$$U_{i,s=0} = \sqrt{(U - R_{s=0} \cdot I_m \cdot \cos \varphi)^2 + \left(\sqrt{1 - (\cos \varphi)^2} \cdot R_{s=0} \cdot I_m\right)^2}$$

Plot the values of L_{ts} against the values of $U_{i,s=0}$.

7.4 Equivalent resistance of iron losses $R_{fe\Gamma}$

7.4.1 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 6.5, subtract the no-load stator winding losses from the input power to obtain the constant losses:

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

where $I_s = I$.

NOTE For the calculation of an equivalent circuit diagram for delta-connection: $I_s = I/\sqrt{3}$.

7.4.2 Friction and windage losses

From the no-load loss values (6.5) use all those that show no significant saturation effect and develop a curve of constant losses (P_k), as determined in 7.4.1, against the voltage squared (U^2). Extrapolate a straight line to zero voltage. The intercept with the zero voltage axis is the friction and windage losses P_{fw} .

Friction and windage 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 .

7.4.3 Iron losses

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

Determine the equivalent resistance of iron losses for the type- Γ equivalent circuit diagram (Figure 4) for rated voltage U_N and frequency f_N :

$$R_{fe\Gamma} = \frac{3 \cdot U_{i,s=0}^2}{P_{fe}}$$

with $U_{i,s=0}$ being the inner voltage as determined in 7.3 at the test-point at rated voltage.

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

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

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

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 with losses of about 6,5 to 8,0 W/kg at 50 Hz, 1,5 T. For motors with electro sheet with losses of 4,0 W/kg or better, lower values may be more appropriate due to reduced impact of eddy current losses.

NOTE The formula for R_{feL}' applies to standard saturation of motors; it does not apply to oversaturated motors in which the R_{feL} value decreases.

7.5 Total leakage inductance $L_{t\sigma}$

7.5.1 General

The total leakage inductance can either be determined from a reverse rotation or locked rotor tests (6.6) or alternatively from a load curve test (6.4). The latter procedure is more accurate especially for motors with deep rotor bars since the rotor frequencies during the test are closer to the frequency at rated speed. A current displacement correction is not required for this procedure.

7.5.2 Distribution of leakage inductances between stator and rotor

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 $k_{\sigma} = L_s / L_r'$. Otherwise, for special design motors (such as double-cage or deep bar rotors) the ratio $k_{\sigma} = L_{\sigma s} / L_{\sigma r}' = 0,67$ and for single cage motors the ratio $k_{\sigma} = L_{\sigma s} / L_{\sigma r}' = 1$ shall be used by definition.

7.5.3 Determination of total leakage inductance from a reverse rotation or locked rotor test (6.6)

7.5.3.1 General

At large slip values the equivalent rotor resistance R_r' / s becomes negligible compared to the reactance $2\pi f \cdot L_m^2 / L_{tr}$ and therefore the reactive part of the measured impedance results mainly from the total leakage inductance $L_{t\sigma}$ (see Figure 3).

If the reverse rotation test according to 6.6.2 has been performed, the slip will be larger ($s = 2$, $f_r = 2 f_N$) compared to the locked rotor test 6.6.3 ($s = 1$; $f_r = f_N$), but the results are not always more accurate as the current displacement is much larger and differs more from rated operation ($f_r \approx 0$).

7.5.3.2 Determination procedure

For each of the measured line-currents I (6.6.2 or 6.6.3):

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

NOTE 1 For the calculation of an equivalent circuit diagram for delta-connection: $Z = \frac{U \cdot \sqrt{3}}{I}$

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 $I_s = I$

NOTE 2 For the calculation of an equivalent circuit diagram for delta-connection: $I_s = \frac{I}{\sqrt{3}}$

Determine the total leakage reactance:

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

Determine the total leakage inductance:

$$L_{\sigma a} = \frac{X_{\sigma a}}{2\pi \cdot f_N}$$

7.5.3.3 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 shall be used if the internal motor-design is known. Especially in the case of double-cage rotors the actual skin effect factor k_i shall be used if available from the manufacturer.

Determine h' : $h' = h \cdot \sqrt{\pi \cdot 2 f_N \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \gamma_r}$ for tests according to (6.6.2)

or: $h' = h \cdot \sqrt{\pi \cdot f_N \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \gamma_r}$ for tests according to (6.6.3)

where

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

Determine the skin effect factor:

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

Determine the total leakage inductance:

$$L_{t\sigma} = L_{\sigma a} \cdot \frac{k_{\sigma} + 1}{k_{\sigma} + k_i} \quad \text{with } k_{\sigma} \text{ from (7.5.2).}$$

Plot the values of $L_{t\sigma}$ against the values of I_s .

7.5.3.4 Current displacement correction by measurement

The tests according to 6.6 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 (7.5.3) shall be plotted against frequency and a curve shall be obtained to extrapolate the inductance to $f_r = 0$.

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 7.5.3.3.

7.5.4 Determination of total leakage inductance from a load curve test (6.4)

For the determination of the total leakage inductance from the load curve test the type-Γ equivalent circuit diagram is used, see Figure 4.

For each of the measured loads (6.4):

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

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

Determine the stator current:
$$I_s = I$$

NOTE 1 For the calculation of an equivalent circuit diagram for delta-connection: $I_s = \frac{I}{\sqrt{3}}$

Determine the stator current components:

$$I_{sa} = I_s \cdot \cos \varphi \quad ; \quad I_{sb} = -I_s \cdot \sqrt{1 - (\cos \varphi)^2}$$

Determine the inner machine voltage:
$$U_i = \sqrt{U_{ia}^2 + U_{ib}^2}$$

with
$$U_{ia} = \frac{U}{\sqrt{3}} - \frac{R}{2} \cdot I_{sa} \quad ; \quad U_{ib} = -\frac{R}{2} \cdot I_{sb}$$

NOTE 2 For the calculation of an equivalent circuit diagram for delta-connection:

with
$$U_{ia} = U - \frac{3R}{2} \cdot I_{sa} \quad ; \quad U_{ib} = -\frac{3R}{2} \cdot I_{sb}$$

Determine the total stator inductance L_{ts} from the no-load test (7.3) by linear interpolation of the inductance between two adjacent voltages $U_{i,s=0}$ at the inner machine voltage U_i .

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

Determine the corrected iron loss resistance:
$$R_{fe\Gamma}' = R_{fe\Gamma} \cdot \frac{U_i^2}{U_{i,s=0}^2}$$

with $U_{i,s=0}$ being the inner voltage as determined in 7.3 at the test-point at rated voltage.

Determine the components of the magnetizing current:

$$I_{ma} = U_{ia} \cdot \frac{1}{R_{fe\Gamma'}} + U_{ib} \cdot \frac{1}{X_{ts}}; \quad I_{mb} = U_{ib} \cdot \frac{1}{R_{fe\Gamma'}} - U_{ia} \cdot \frac{1}{X_{ts}}$$

Determine the rotor reactance:

$$X_{t\sigma}' = \frac{U_{ib} \cdot (I_{sa} - I_{ma}) - U_{ia} \cdot (I_{sb} - I_{mb})}{(I_{sa} - I_{ma})^2 + (I_{sb} - I_{mb})^2}$$

It must be ensured that $X_{t\sigma}'$ is strictly monotonic increasing with decreasing current. Due to measurement inaccuracies this may not always be the case. Those values of $X_{t\sigma}'$ which are not increasing with decreasing current shall be discarded and replaced by new values $X_{t\sigma}''$ derived from a linear extrapolation of the last two good values of $X_{t\sigma}'$.

Determine the rotor inductance: $L_{t\sigma}'' = \frac{X_{t\sigma}'}{2\pi \cdot f_N}$ or $L_{t\sigma}'' = \frac{X_{t\sigma}''}{2\pi \cdot f_N}$

Transform the rotor inductance into a type-L equivalent circuit diagram:

$$L_{t\sigma} = L_{t\sigma}'' \cdot \frac{L_{ts}}{L_{ts} + L_{t\sigma}''}$$

Plot the values of $L_{t\sigma}$ against the values of I_s .

7.6 Magnetizing inductance L_m and voltage U_m

7.6.1 From a reverse rotation or locked rotor test (6.6)

For each of the determined values of total stator inductance L_{ts} and magnetizing current I_m (7.3):

Calculate the corresponding total leakage inductance L_{σ} from (7.5.3) by linear interpolation using the magnetizing current I_m (7.3) against the stator current I_s (7.5.3).

Determine the magnetizing inductance: $L_m = L_{ts} - \frac{L_{t\sigma}}{1 + \frac{1}{k_s}}$

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 .

7.6.2 From a load curve test (6.4)

For each of the determined values of total stator inductance L_{ts} and total leakage inductance L_{σ} from load curve test (7.5.4):

Determine the magnetizing inductance: $L_m = L_{ts} - \frac{L_{t\sigma}}{1 + \frac{1}{k_{\sigma}}}$

Determine the stator leakage inductance: $L_{\sigma s} = L_{ts} - L_m$

Determine the magnetizing voltage: $U_m = \sqrt{U_{ma}^2 + U_{mb}^2}$

$$\text{with } U_{ma} = \frac{U}{\sqrt{3}} - \frac{R}{2} \cdot I_{sa} + 2\pi \cdot f_N \cdot L_{\sigma s} \cdot I_{sb} \quad ; \quad U_{mb} = -\frac{R}{2} \cdot I_{sb} - 2\pi \cdot f_N \cdot L_{\sigma s} \cdot I_{sa}$$

NOTE For the calculation of an equivalent circuit diagram for delta-connection:

$$\text{with } U_{ma} = U - \frac{3R}{2} \cdot I_{sa} + 2\pi \cdot f_N \cdot L_{\sigma s} \cdot I_{sb} \quad ; \quad U_{mb} = -\frac{3R}{2} \cdot I_{sb} - 2\pi \cdot f_N \cdot L_{\sigma s} \cdot I_{sa}$$

Plot the values of L_m against the values of U_m .

7.7 Stator and rotor leakage inductances $L_{\sigma s}$ and $L_{\sigma r}'$

7.7.1 From a reverse rotation or locked rotor test (6.6)

For each of the determined values of total stator inductance L_{ts} (7.3), total leakage inductance $L_{t\sigma}$ (7.5.3) and magnetizing inductance L_m (7.6.1), the leakage inductances become:

$$L_{\sigma s} = L_{ts} - L_m$$

$$L_{\sigma r}' = L_{t\sigma} - L_s$$

Plot the values of $L_{\sigma s}$ and $L_{\sigma r}'$ against the values of I_m .

7.7.2 From a load curve test (6.4)

For each of the determined values of total stator inductance L_{ts} and total leakage inductance $L_{t\sigma}$ (7.5.4) and magnetizing inductance L_m (7.6.2), the leakage inductances become:

$$L_{\sigma s} = L_{ts} - L_m$$

$$L_{\sigma r}' = L_{t\sigma} - L_s$$

Plot the values of $L_{\sigma s}$ and $L_{\sigma r}'$ against the values of I_s (7.5.4).

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:

So far, all inductances have been calculated in dependence 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: $I_s = I_N$

NOTE 1 For the calculation of an equivalent circuit diagram for delta-connection: $I_s = \frac{I_N}{\sqrt{3}}$

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

Determine the stator voltage: $U_s = \frac{U_N}{\sqrt{3}}$

NOTE 2 For the calculation of an equivalent circuit diagram for delta-connection: $U_s = U_N$

Determine the magnetizing voltage:

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

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 the stator winding and frequency

From the load test (6.3):

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

Determine stator voltage and current $U_s = \frac{U}{\sqrt{3}}$; $I_s = I$

NOTE 1 For the calculation of an equivalent circuit diagram for delta-connection: $U_s = U$; $I_s = \frac{I}{\sqrt{3}}$

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

Determine the stator leakage inductance L_s from (7.7) by linear-interpolation with the stator current I_s .

Determine the magnetizing voltage:

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

$$U_{mb} = I_s \cdot \left(\sqrt{1 - (\cos \varphi)^2} \cdot R_{s,25^\circ} \cdot \frac{k_s + \theta_L}{k_2 + 25} - \cos \varphi \cdot 2\pi \cdot f_N \cdot L_{\sigma s} \right)$$

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

Determine the magnetizing inductance L_m from (7.6) by linear interpolation 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 $L_{\sigma r}'$ from (7.7) by linear interpolation with the rotor current I_r' .

Determine the line impedance:

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

NOTE 2 For the calculation of an equivalent circuit diagram for delta-connection: $Z = \frac{U \cdot \sqrt{3}}{I}$

Determine the line reactance:

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

Determine the reactances:

$$X_{\sigma r}' = 2\pi \cdot f_N \cdot L_{\sigma r}'$$

$$X_{\sigma s} = 2\pi \cdot f_N \cdot L_{\sigma s}$$

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

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

$$R_{r,25^\circ}' = s \cdot (X_{\sigma r}' + X_m) \cdot \sqrt{\frac{X_m \cdot X_{\sigma r}' - (X - X_{\sigma s})}{X_m + X_{\sigma r}'}} \cdot \frac{k_r + 25}{k_r + \theta_L}$$

7.10 Equivalent resistance of iron losses R_{fe}

Determine the equivalent resistance of iron losses for the type-T equivalent circuit diagram (Figure 1) for rated voltage U_N and frequency f_N :

$$R_{fe} = R_{feT} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{X_{os}}{X_m}\right)^2}$$

Annex A (informative)

Sample calculation

Rated Data			
Type=	IEC 60034-28	Shaft height=	132 mm
P _{2n} =	5500 W	k _m =	235 °C
Connection=	Y ('Y' or 'D')	k _r =	225 °C
f _n =	50 Hz	γ=	3,00E+07 S/m conductivity of rotor bars
2p=	4		
U _n =	417 V (line voltage)	U _s =	241 V (phase voltage)
I _n =	10,67 A (line current)	I _s =	10,67 A (phase current)
cos φ _n =	0,81		
η=	85,7 %		

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

R _{ll,m} =	1,736 Ohm
Θ ₀ =	23,4 °C

(6.3) Load-test at rated load

U	I	P ₁	n	Θ _l
V	A	W	1/min	°C
417,8	10,89	6411	1445	105,1

(6.4) Load curve test (alternative to 6.6)

P ₁ target	P ₁	U	I	n	Θ _W	R	R
W	W	V	A	1/min	°C	Ohm	Ohm
before test						2,306	(only needed when Θ _W not measured)
8022	8670,0	417,1	14,21	1421,5	108,1	-	2,305
7060	7220,0	417,6	12,04	1436,9	110,0	-	2,318
6418	6310,0	417,5	10,74	1446,0	109,8	-	2,316
5776	5810,0	417,6	10,05	1451,0	108,2	-	2,306
5134	4990,0	417,7	8,96	1458,8	107,0	-	2,298
4492	4540,0	417,9	8,39	1463,0	104,4	-	2,280
3851	3710,0	417,7	7,39	1470,5	102,5	-	2,267
3209	3280,0	417,9	6,92	1474,3	99,7	-	2,249
2567	2560,0	417,9	6,20	1480,5	97,7	-	2,235
1604	1990,0	418,0	5,75	1485,3	95,9	-	2,223
after test						2,224	(only needed when Θ _W not measured)

(6.5) No-load test

U target	U	I	P ₁	Θ _{nl}
V	V	A	W	°C
459	460,0	8,50	450,0	-
417	417,4	4,99	250,0	-
375	375,8	3,27	170,0	-
334	334,0	2,55	130,0	-
292	292,4	2,14	110,0	-
250	250,7	1,79	90,0	-
209	208,8	1,47	70,0	-
167	166,8	1,18	60,0	-
125	125,2	0,90	49,0	-
83	104,1	0,78	45,0	29,1

(6.6) Reverse rotation or locked rotor test (alternative to 6.4)

I target	I	U	P ₁	slip s=
A	A	V	W	(use 1 for locked rotor and 2 for reverse rotation)
15,5	16,09	135,5	1170,0	1
13,9	13,36	120,2	830,0	
12,3	10,59	102,3	530,0	
10,7	8,02	83,7	300,0	
9,1	5,33	62,6	140,0	
7,5	4,84	58,6	110,0	
5,9	3,73	49,4	70,0	
4,3	2,72	40,8	40,0	
2,7	2,10	35,3	20,0	
1,1	0,99	24,9	10,0	

(7.2) Resistance of stator winding

 $R_{s,25^{\circ}\text{C}} = 0,873 \text{ Ohm@}25^{\circ}\text{C}$

(7.3) Total stator inductance

Z_{s-0}	$\cos \varphi$	R_{s-0}	I_m	X_{ls}	L_{ls}	U_{ls-0}	Ψ_{ls}
Ohm		Ohm	A	Ohm	H	V	Wb
31,24	0,07	2,08	8,50	31,2	0,0992	265,0	0,844
48,32	0,07	3,35	4,99	48,2	0,1534	240,4	0,765
66,28	0,08	5,29	3,27	66,1	0,2103	216,3	0,688
75,73	0,09	6,68	2,55	75,4	0,2401	192,1	0,611
79,00	0,10	8,03	2,14	78,6	0,2502	167,9	0,535
80,70	0,12	9,33	1,79	80,2	0,2552	143,8	0,458
82,21	0,13	10,85	1,47	81,5	0,2594	119,5	0,380
81,63	0,18	14,36	1,18	80,4	0,2558	94,8	0,302
80,32	0,25	20,16	0,90	77,7	0,2475	70,0	0,223
77,03	0,32	24,65	0,78	73,0	0,2323	56,9	0,181

(7.4) Equivalent resistance of iron losses

I_s	P_k	$(U_{ls-0})^2$	P_{fe}	
A	W	V ²	W	
8,50	257,7	70222	221,4	
4,99	183,8	57786	147,5	
3,27	141,5	46776	105,2	
2,55	112,7	36903	76,4	$U_{ls-0} = 240,3 \text{ V}$
2,14	97,8	28198	61,5	
1,79	81,4	20665	45,1	
1,47	64,3	14284	28,0	Correlation = 0,9957
1,18	56,3	8990	20,0	$P_{fw} = 36,3 \text{ W}$
0,90	46,8	4896	10,5	$P_{fe} = 147,0 \text{ W}$
0,78	43,4	3240	7,1	$R_{fe\Gamma} = 11/9 \text{ Ohm}$

(7.5.3) Total leakage inductance from a reverse rotation or locked rotor test

$k_0 = 0,67$	$k = 0,67$	$k = 0,67$	$k = 0,67$	$k = 0,67$	$k = 0,67$	$k = 0,67$	$k = 0,67$
Z	$\cos \varphi$	R	I_s	$X_{\sigma a}$	$L_{\sigma a}$	L_{σ}	Ψ_{σ}
Ohm		Ohm	A	Ohm	H	H	Wb
4,86	0,31	1,51	16,09	4,6	0,0147	0,0163	0,263
5,19	0,30	1,55	13,36	5,0	0,0158	0,0175	0,234
5,58	0,28	1,58	10,59	5,3	0,0170	0,0189	0,200
6,03	0,26	1,55	8,02	5,8	0,0185	0,0206	0,165
6,78	0,24	1,64	5,33	6,6	0,0209	0,0233	0,124
6,99	0,22	1,57	4,84	6,8	0,0217	0,0241	0,117
7,64	0,22	1,68	3,73	7,5	0,0237	0,0264	0,098
8,67	0,21	1,80	2,72	8,5	0,0270	0,0300	0,082
9,71	0,16	1,51	2,10	9,6	0,0305	0,0339	0,071
14,52	0,23	3,40	0,99	14,1	0,0449	0,0499	0,049

(7.5.4) Total leakage inductance from a load curve test

$\cos \varphi$	s	I_s	I_{sa}	I_{sb}	U_{ls}	U_{lb}	U_i	L_{ls}	
		A	A	A	V	V	V	H	
0,84	0,052	14,21	12,00	-7,60	227,0	8,8	227,2	0,1846	
0,83	0,042	12,04	9,98	-6,73	229,5	7,8	229,6	0,1788	
0,81	0,036	10,74	8,73	-6,26	231,0	7,2	231,1	0,1754	
0,80	0,033	10,05	8,03	-6,04	231,8	7,0	231,9	0,1734	
0,77	0,027	8,96	6,90	-5,71	233,3	6,6	233,3	0,1700	
0,75	0,025	8,39	6,27	-5,57	234,1	6,4	234,2	0,1681	
0,69	0,020	7,39	5,13	-5,33	235,3	6,0	235,4	0,1652	
0,65	0,017	6,92	4,53	-5,23	236,2	5,9	236,2	0,1632	
0,57	0,013	6,20	3,54	-5,10	237,3	5,7	237,4	0,1605	
0,48	0,010	5,75	2,75	-5,05	238,3	5,6	238,3	0,1583	
X_{ls}	$R_{fe\Gamma}$	I_{ms}	I_{mb}	I_m	X_{σ}	X_{σ}	L_{σ}	L_{σ}	Ψ_{σ}
Ohm	Ohm	A	A	A	Ohm	Ohm	H	H	Wb
58,0	1053	0,4	-3,9	3,9	6,32	6,32	0,0201	0,0181	0,258
56,2	1076	0,4	-4,1	4,1	6,85	6,85	0,0218	0,0194	0,234
55,1	1090	0,3	-4,2	4,2	7,24	7,24	0,0230	0,0204	0,219
54,5	1098	0,3	-4,3	4,3	7,51	7,51	0,0239	0,0210	0,211
53,4	1111	0,3	-4,4	4,4	7,99	7,99	0,0254	0,0221	0,198
52,8	1119	0,3	-4,4	4,4	8,34	8,34	0,0265	0,0229	0,192
51,9	1131	0,3	-4,5	4,5	9,12	9,12	0,0290	0,0247	0,183
51,3	1139	0,3	-4,6	4,6	9,57	9,57	0,0305	0,0257	0,178
50,4	1150	0,3	-4,7	4,7	10,63	10,63	0,0338	0,0280	0,173
49,7	1159	0,3	-4,8	4,8	12,83	12,83	0,0408	0,0325	0,187

(7.6.1) and (7.7.1) Magnetizing inductance and voltage, leakage inductances of stator and rotor
From a reverse rotation or locked rotor test

I_m	L_{ls}	L_σ	L_m	Ψ_m	U_m	$L_{\sigma s}$	$L_{\sigma r}'$
A	H	H	H	Wb	V	H	H
8,50	0,0992	0,0203	0,0911	0,774	243,3	0,0081	0,0121
4,99	0,1534	0,0238	0,1439	0,717	225,4	0,0096	0,0143
3,27	0,2103	0,0280	0,1991	0,652	204,7	0,0112	0,0168
2,55	0,2401	0,0311	0,2276	0,580	182,1	0,0125	0,0186
2,14	0,2502	0,0337	0,2367	0,506	158,9	0,0135	0,0202
1,79	0,2552	0,0383	0,2398	0,430	135,1	0,0154	0,0229
1,47	0,2594	0,0430	0,2421	0,355	111,6	0,0173	0,0258
1,18	0,2558	0,0472	0,2369	0,279	87,8	0,0189	0,0282
0,90	0,2475	0,0512	0,2269	0,204	64,2	0,0205	0,0306
0,78	0,2323	0,0529	0,2111	0,165	51,7	0,0212	0,0317

(7.6.2) and (7.7.2) Magnetizing inductance and voltage, leakage inductances of stator and rotor
From a load curve test

I_s	L_{ls}	L_σ	L_m	Ψ_m	$L_{\sigma s}$	$L_{\sigma r}'$	U_{ms}	U_{mb}	U_m
A	H	H	H	Wb	H	H	V	V	V
14,21	0,1846	0,0181	0,1773	0,696	0,0073	0,0109	209,6	-18,7	210,4
12,04	0,1788	0,0194	0,1710	0,700	0,0078	0,0116	213,0	-16,7	213,7
10,74	0,1754	0,0204	0,1673	0,702	0,0082	0,0122	214,9	-15,1	215,4
10,05	0,1734	0,0210	0,1649	0,703	0,0084	0,0126	215,9	-14,3	216,3
8,96	0,1700	0,0221	0,1612	0,705	0,0089	0,0133	217,3	-12,7	217,7
8,39	0,1681	0,0229	0,1589	0,705	0,0092	0,0137	218,0	-11,8	218,3
7,39	0,1652	0,0247	0,1552	0,705	0,0099	0,0148	218,8	-9,9	219,0
6,92	0,1632	0,0257	0,1529	0,705	0,0103	0,0154	219,2	-8,8	219,4
6,20	0,1605	0,0280	0,1493	0,704	0,0112	0,0167	219,4	-6,8	219,5
5,75	0,1583	0,0325	0,1453	0,697	0,0130	0,0194	217,6	-5,6	217,7

(7.8) Inductances for calculations at constant flux (rated load) from a reverse rotation or locked rotor test

$I_s =$	10,67 A	$U_{ms} =$	219,0 V
$L_{\sigma s} =$	0,0073 H	$U_{mb} =$	-14,2 V
$U_s =$	240,8 V	$U_m =$	219,4 V
		$L_m =$	0,1599 H
		$I_r' =$	9,13 A
		$L_{\sigma r}' =$	0,0118 H

(7.8) Inductances for calculations at constant flux (rated load) from a load curve test

$I_s =$	10,67 A	$U_{ms} =$	217,1 V
$L_{\sigma s} =$	0,0082 H	$U_{mb} =$	-16,8 V
$U_s =$	240,8 V	$U_m =$	217,7 V
		$L_m =$	0,1629 H
		$I_r' =$	9,19 A
		$L_{\sigma r}' =$	0,0131 H

(7.9) Resistance of rotor cage from a reverse rotation or locked rotor test

$n_{syn} =$	1500 1/min	$U_{ms} =$	216,8 V
$s =$	0,037	$U_{mb} =$	-12,7 V
$U_s =$	241,2 V	$U_m =$	217,2 V
$I_s =$	10,89 A	$L_m =$	0,1657 H
$\cos \varphi =$	0,81	$X_m =$	52,07 Ohm
$L_{\sigma s} =$	0,0072 H	$I_r' =$	9,36 A
$X_{\sigma s} =$	2,25 Ohm	$L_{\sigma r}' =$	0,0116 H
		$X_{\sigma r}' =$	3,65 Ohm
$Z =$	22,15 Ohm		
$X =$	12,88 Ohm		
$R_{i,2s}' =$	0,65 Ohm		

(7.9) Resistance of rotor cage from a load curve test

$n_{syn} =$	1500 1/min	$U_{ms} =$	214,9 V
$s =$	0,037	$U_{mb} =$	-15,4 V
$U_s =$	241,2 V	$U_m =$	215,5 V
$I_s =$	10,89 A	$L_m =$	0,1405 H
$\cos \varphi =$	0,81	$X_m =$	44,15 Ohm
$L_{\sigma s} =$	0,0081 H	$I_r' =$	9,32 A
$X_{\sigma s} =$	2,55 Ohm	$L_{\sigma r}' =$	0,0130 H
		$X_{\sigma r}' =$	4,09 Ohm
$Z =$	22,15 Ohm		
$X =$	12,88 Ohm		
$R_{i,2s}' =$	0,59 Ohm		

(7.10) Resistance of iron losses from a reverse rotation or locked rotor test	
R_{fe} =	1083 Ohm

(7.10) Resistance of iron losses from a load curve test	
R_{fe} =	1054 Ohm

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	32
INTRODUCTION.....	34
1 Domaine d'application	35
2 Références normatives.....	35
3 Termes, définitions, symboles et conventions	36
3.1 Termes et définitions	36
3.2 Symboles	36
3.3 Indices	37
3.4 Couplage des enroulements	38
4 Exigences d'essai.....	38
4.1 Généralités.....	38
4.2 Fréquence et tension.....	38
4.3 Instrumentation	38
4.3.1 Appareils de mesure pour les grandeurs électriques, la vitesse et la fréquence	38
4.3.2 Transformateurs de mesure.....	38
4.3.3 Mesure de la température.....	38
5 Approximations et incertitudes.....	38
6 Procédures d'essai.....	39
6.1 Généralités.....	39
6.2 Mesure de la résistance entre lignes à courant continu du stator.....	39
6.3 Essai de charge à la charge assignée	40
6.4 Essai de la courbe de charge	40
6.5 Essai à vide.....	40
6.6 Essais de rotation inverse et à rotor bloqué.....	41
6.6.1 Généralités.....	41
6.6.2 Essai de rotation inverse	41
6.6.3 Essai à rotor bloqué	42
7 Détermination des grandeurs de moteurs	42
7.1 Généralités.....	42
7.2 Résistance de l'enroulement du stator R_S	44
7.3 Inductance du stator totale $L_{TS} = L_M + L_{\sigma S}$	44
7.3.1 Généralités.....	44
7.3.2 Procédure de détermination.....	44
7.4 Résistance équivalente de pertes dans le fer $R_{fe\Gamma}$	45
7.4.1 Pertes constantes.....	45
7.4.2 Pertes par frottement et par ventilation.....	46
7.4.3 Pertes fer	46
7.5 Inductance de fuite totale $L_{t\sigma}$	46
7.5.1 Généralités.....	46
7.5.2 Répartition des inductances de fuite entre stator et rotor	47
7.5.3 Détermination de l'inductance de fuite totale à partir d'un essai de rotation inverse ou à partir d'un essai à rotor bloqué (6.6)	47
7.5.4 Détermination de l'inductance de fuite totale à partir d'un essai de la courbe de charge (6.4)	49
7.6 Inductance de magnétisation L_M et tension U_M	50

7.6.1	A partir d'un essai en rotation inverse ou d'un essai à rotor bloqué (6.6)	50
7.6.2	A partir de l'essai de la courbe de charge (6.4)	50
7.7	Inductances de fuite du stator et du rotor $L_{\sigma S}$ et $L_{\sigma r'}$	51
7.7.1	A partir d'un essai en rotation inverse ou d'un essai à rotor bloqué (6.6)	51
7.7.2	A partir de l'essai de la courbe de charge (6.4)	51
7.8	Inductances pour calculs à flux constant (charge assignée)	51
7.9	Résistance de la cage du rotor R_r' en référence à l'enroulement du stator et à la fréquence	52
7.10	Résistance équivalente de pertes dans le fer R_{fe}	54
Annexe A (informative) Calcul d'échantillons		55
Figure 1 – Schéma des circuits équivalents de type T		42
Figure 2 – Schéma des circuits équivalents de type T (sans tenir compte des pertes dans le fer)		43
Figure 3 – Schéma des circuits équivalents de type L (sans tenir compte des pertes dans le fer)		43
Figure 4 – Schéma des circuits équivalents de type Γ		43
Figure 5 – Caractéristiques typiques de l'inductance L en fonction du courant I		45

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 elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de la CEI. La CEI n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 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 brevet. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets 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.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition publiée en 2007. Cette édition constitue une révision technique.

Cette édition inclut les modifications techniques significatives suivantes par rapport à l'édition précédente:

- a) Toutes les formules sont maintenant données pour des circuits de connexion en étoile équivalente. Elles sont appliquées même dans le cas d'enroulements connectés en triangle. Toutes les formules des circuits de connexion en triangle équivalents ont été déplacées vers des notes.

- b) Les procédures pour la détermination des paramètres du circuit équivalent à partir d'un test de courbe de charge, comme alternative aux tests en rotation en sens inverse et rotor bloqué rotors, ont été ajoutées.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
2/1685/FDIS	2/1688/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.

NOTE Un tableau des correspondances de toutes les publications du comité d'études 2 de la CEI peut être trouvé sur le site web de la CEI, à la page d'accueil de ce comité.

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

IMPORTANT – Le logo "colour inside" qui se trouve sur la page de couverture de cette publication indique qu'elle contient des couleurs qui sont considérées comme utiles à une bonne compréhension de son contenu. Les utilisateurs devraient, par conséquent, imprimer cette publication en utilisant une imprimante couleur.

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 norme fournit une méthode d'essai normalisée pour déterminer les paramètres des moteurs électriques. En même temps ce projet 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.

Une spécification technique, en rapport avec la présente norme, la CEI/TS 60034-25 énumère les paramètres exigés pour le moteur, mais ni leur définition ni leurs méthodes de détermination ne sont incluses.

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

La présente partie de la série 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.

La présente 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 suivants sont cités en référence de manière normative, en intégralité ou en partie, dans le présent document et sont indispensables pour son application. 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 60034-1:2010, *Machines électriques tournantes – Partie 1: Caractéristiques assignées et caractéristiques de fonctionnement*

CEI 60034-2-1, *Machines électriques tournantes – Partie 2-1: Méthodes normalisées pour la détermination des pertes et du rendement à partir d'essais (à l'exclusion des machines pour véhicules de traction)*

CEI 60034-2-2, *Machines électriques tournantes – Partie 2-2: Méthodes spécifiques pour déterminer les pertes séparées des machines de grande taille à partir d'essais – Complément à la CEI 60034-2-1*

CEI 60034-2-3¹, *Machines électriques tournantes – Partie 2-3: Méthodes d'essai spécifiques pour la détermination des pertes et du rendement des moteurs en courant alternatif alimentés par convertisseurs*

CEI/TS 60034-25², *Machines électriques tournantes – Partie 25: Guide pour la conception et la performance des moteurs en courant alternatif spécialement conçus pour être alimentés par convertisseurs*

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 prescriptions générales communes à toutes les parties*

¹ A publier.

² Une révision de cette publication est actuellement en cours.

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, symboles et conventions

3.1 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions donnés dans la CEI 60034-1:2010 s'appliquent.

3.2 Symboles

Les symboles suivants s'appliquent.

$\cos \varphi$	est le facteur de puissance
$\cos \varphi_N$	est le facteur de puissance assigné
f	est la fréquence d'alimentation du stator, Hz
f_r	est la fréquence du courant du rotor (fréquence de glissement), Hz
f_N	est la fréquence assignée, Hz
h	est la hauteur de la barre de conducteur-rotor, m
H	est la taille de la carcasse du moteur selon la CEI 60072-1 (distance entre la ligne centrale de l'arbre et le plancher de la machine (dimension de base)), mm
I	est le courant de ligne du stator, A
I_S	est le courant de phase du stator, A
I_r'	est le courant de phase du rotor, 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
$L_{\sigma S}$	est l'inductance de fuite du stator, H
$L_{\sigma r}'$	est l'inductance de fuite du rotor, H
$L_{t\sigma}$	est l'inductance de fuite totale ($= L_{\sigma S} + L_{\sigma r}'$), 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 ($= L_m + L_{\sigma S}$), H
L_{tr}'	est l'inductance du rotor totale ($= L_m + L_{\sigma r}'$), H
n	est la vitesse de fonctionnement, min^{-1}
n_N	est la vitesse assignée, min^{-1}
n_{syn}	est la vitesse synchrone assignée, min^{-1}
p	est le nombre de paires de pôles
P_S	est la puissance d'entrée électrique, W
P_{2N}	est la puissance de sortie mécanique, 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 entre lignes, 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
$R_{s,25^\circ}$	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
$R_{r,25^\circ}'$	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_N	est la tension assignée aux bornes, V
X_m	est la réactance magnétisante ($= 2\pi f_N \cdot L_m$), Ω
$X_{\sigma s}$	est la réactance de fuite du stator ($= 2\pi f_N \cdot L_{\sigma s}$), Ω
$X_{\sigma r}'$	est la réactance de fuite du rotor ($= 2\pi f_N \cdot L_{\sigma r}'$), Ω
$X_{t\sigma}$	est la réactance de fuite totale ($= 2\pi f_N \cdot L_{t\sigma}$), Ω
$X_{\sigma a}$	est la réactance de fuite totale, abstraction faite de l'effet de peau, ($= 2\pi f_N \cdot L_{\sigma a}$), Ω
X_{ts}	est la réactance totale du stator ($= 2\pi f_N \cdot L_{ts}$), Ω
X_{tr}'	est la réactance totale du rotor ($= 2\pi f_N \cdot L_{tr}'$), Ω
Z	est l'impédance de ligne, Ω
γ_r	est la conductivité du conducteur du rotor, S/m, voir la Note 2
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 le cuivre utiliser $k = 235$, pour l'aluminium, utiliser $k = 225$, 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 Concernant les calculs de la présente norme, les tensions et courants sont exprimés en valeurs efficaces (ce qui est différent de l'expression vectorielle en calcul complexe).

NOTE 4 Toutes les valeurs relatives au rotor font référence à l'enroulement et à la fréquence du stator.

3.3 Indices

L, NL, 0	conditions d'essai
m, ma, mb	grandeurs magnétisantes
N	valeurs assignées
r, tr	grandeurs côté rotor
s, ts	grandeurs côté stator
σ , $t\sigma$	grandeurs relatives aux fuites

3.4 Couplage des enroulements

Le modèle mathématique de la machine doit être considéré comme couplé en étoile, quelle que soit le couplage réel du moteur (triangle ou étoile). Les grandeurs du schéma du circuit équivalent doivent être présentées comme des valeurs par phase dans la connexion en étoile équivalente.

NOTE En tant que référence, les formules nécessaires pour calculer un schéma du circuit équivalent couplé en triangle sont également données sous forme de notes. Dans le cas des moteurs couplés en triangle, ces formules peuvent être utilisées pour créer un schéma du circuit équivalent représentant mieux les courants des enroulements internes qu'un schéma du circuit dans une connexion en étoile équivalente.

4 Exigences d'essai

4.1 Généralités

Les essais doivent être effectués en considérant les exigences d'essai données dans les CEI 60034-2-1, CEI 60034-2-2, CEI 60034-2-3 et IEC/TS 60034-25, selon le cas.

4.2 Fréquence et tension

La fréquence doit être égale à la fréquence d'essai spécifiée au cours des mesures, à $\pm 0,3$ % près. La forme et la symétrie de la tension d'alimentation doivent être conformes aux exigences de 8.3.1 de la CEI 60034-1:2010.

4.3 Instrumentation

4.3.1 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.

4.3.2 Transformateurs de mesure

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

4.3.3 Mesure de la température

Les appareils utilisés pour mesurer les températures doivent avoir une précision de ± 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 et $\pm 0,3$).

L'hypothèse d'une résistance du rotor court-circuitée au cours de la détermination de l'inductance de fuite totale $L_{t\sigma}$ (7.4) donnera généralement lieu à une erreur inférieure à 5 % sur la valeur obtenue. L'effet sur l'inductance de magnétisation L_m (7.6) est négligeable.

NOTE 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.

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 (7.5.3.3). Mais les données de la conception du rotor sont préférables. La présente norme introduit une procédure alternative (7.5.4) de détermination des inductances de fuite à partir d'un essai de la courbe de charge, évitant ces difficultés.

La répartition de l'inductance de fuite totale $L_{t\sigma}$ dans les inductances de fuite du stator et du rotor ($L_{\sigma s}$ et $L_{\sigma r}$, 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 entre la température du rotor et la température d'enroulement est négligée au cours de la détermination de la résistance du rotor R_r' (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. Pour cette raison 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 6.6.2), 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 de celles 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 7.4.3).

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'essai.

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 60034-1:2010.

6.3 Essai de charge à la charge assignée

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 à la charge assignée à 2 K 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_S et n . Mesurer et enregistrer la température d'enroulement θ_L conformément à 8.6.2 de la CEI 60034-1:2010. La première lecture de la résistance doit être faite dans les temps spécifiés du Tableau 5 de la CEI 60034-1:2010.

6.4 Essai de la courbe de charge

Cet essai n'est exigé que pour la procédure de détermination, conformément au 7.5.4, et constitue une alternative aux essais de rotation inverse et à rotor bloqué (6.6).

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 à la charge assignée à 5 K près (voir la CEI 60034-1).

Appliquer la charge à la machine en au moins dix points. Il convient de choisir les points de charge de telle façon qu'ils soient espacés de manière approximativement égale, entre une charge d'au moins 25 % jusqu'à une charge inférieure ou égale à 125 %. Lors de la charge de la machine, débiter à la valeur de charge la plus élevée et procéder par ordre décroissant vers la plus faible. Les essais doivent être réalisés aussi rapidement que possible afin de réduire les variations de températures dans la machine pendant les essais.

Mesurer résistance entre lignes, R , avant la valeur lue la plus élevée et après la valeur lue la plus faible. La résistance pour une charge de 100 % et pour des charges supérieures doit être la valeur déterminée avant la valeur de charge lue la plus élevée. La résistance utilisée pour des charges inférieures à 100 % doit alors être déterminée comme linéaire en fonction de la charge, à l'aide de la valeur lue avant l'essai pour la charge la plus élevée et après la valeur lue la plus faible pour la charge la plus faible.

De préférence, les résistances peuvent également être déterminées en mesurant les températures de l'enroulement du stator à l'aide d'un dispositif sensible à la température installé sur l'enroulement. Les résistances pour chaque point de charge peuvent alors être déterminées à partir de la température de l'enroulement au point considéré en rapport avec la résistance et la température mesurées avant le début de l'essai.

Mesurer et enregistrer, pour chaque point de charge, U , I , P_S et n .

Déterminer R pour chaque point de charge.

6.5 Essai à vide

L'essai à vide doit être effectué après l'essai de charge. Découpler le moteur de toute charge ou d'une autre machine. Lancer le moteur sans charge jusqu'à la stabilisation des pertes à vide.

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.

En réglant la tension d'alimentation à la fréquence assignée, mesurer et enregistrer U , I et P_S pour au moins dix valeurs de tension.

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 donnant lieu à un courant à vide supérieur à 150 % du courant assigné.

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'une des tensions d'essai doit être la tension assignée de la machine.

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

Après l'essai, mesurer et enregistrer la température d'enroulement θ_{NL} , conformément à 8.6.2 de la CEI 60034-1:2010. La première lecture de la résistance doit être faite dans les temps spécifiés du Tableau 5 de la CEI 60034-1:2010.

6.6 Essais de rotation inverse et à rotor bloqué

6.6.1 Généralités

Les essais de rotation inverse et à rotor bloqué ne sont exigés que pour la procédure de détermination, conformément au 7.5.3 et constituent une alternative à l'essai de la courbe de charge (6.4).

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 (6.6.2) 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 (6.6.3) 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 des inexactitudes résultant de la grande résistance du rotor de ces machines).

6.6.2 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 .

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_S 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 (6.5), au mieux. L'essai doit être effectué aussi rapidement que possible avec les lectures effectuées dans l'ordre décroissant de tension et de courant.

6.6.3 Essai à rotor bloqué

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

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.

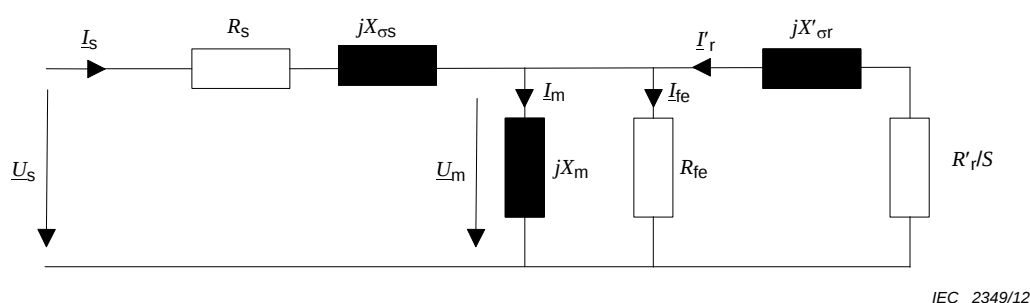
Mesurer et enregistrer U , I et P_S pour au moins 10 valeurs de courant espacées de façon approximativement égale entre 150 % maximum et 10 % de courant assigné I_N , y compris une lecture pour le courant assigné.

Il est recommandé que les valeurs de courant utilisées pour cet essai correspondent aux valeurs utilisées en (6.5), 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

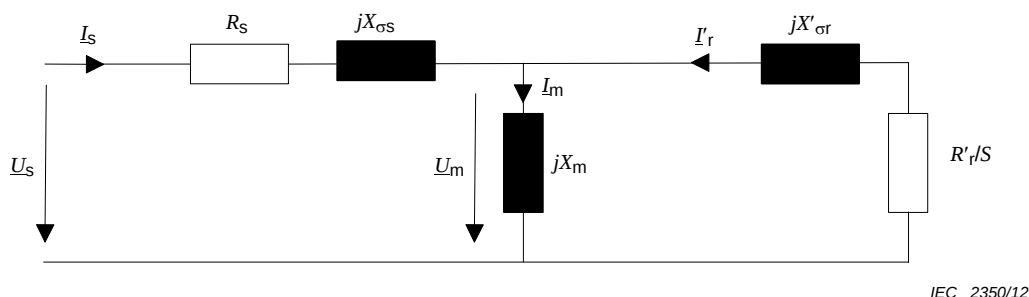
7.1 Généralités

Le schéma des circuits équivalents de type T (Figure 1) est normatif pour les moteurs traités dans la présente norme. Une variante simplifiée, sans la résistance équivalente de pertes dans le fer, est donnée à la Figure 2.



IEC 2349/12

Figure 1 – Schéma des circuits équivalents de type T

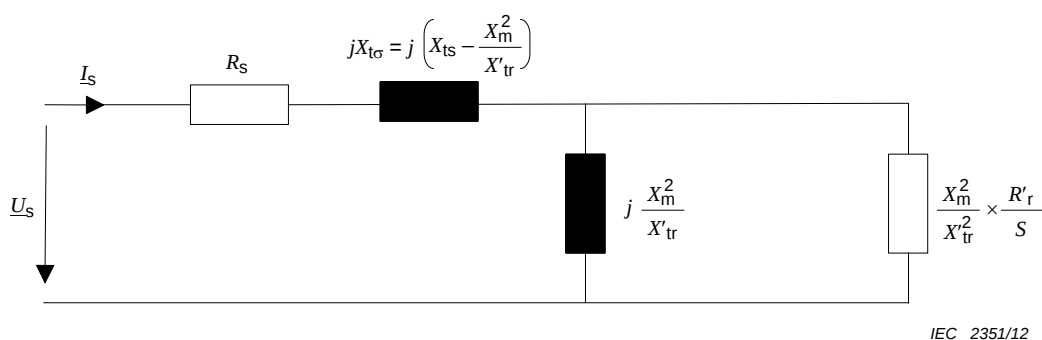


**Figure 2 – Schéma des circuits équivalents de type T
(sans tenir compte des pertes dans le fer)**

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 celle assignée.

Le schéma de type L (Figure 3) est fourni à titre illustratif. Les schémas de type L et de type Γ (Figure 4) sont mathématiquement identiques au schéma de type T.



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

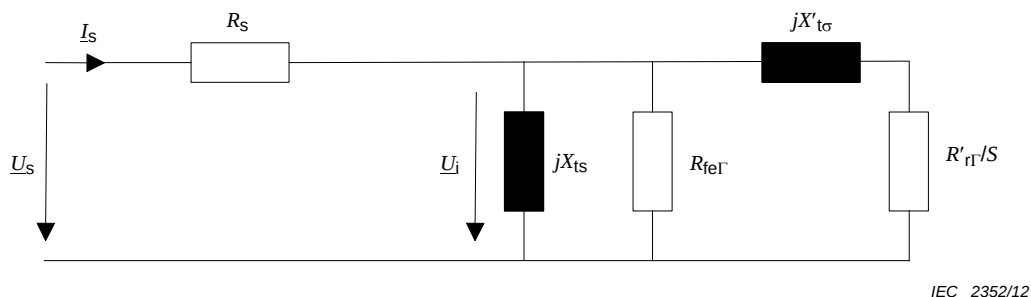


Figure 4 – Schéma des circuits équivalents de type Γ

7.2 Résistance de l'enroulement du stator R_s

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

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

NOTE Pour le calcul d'un schéma de circuit équivalent dans le cas d'un couplage en triangle:

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

7.3 Inductance du stator totale $L_{ts} = L_m + L_{\sigma s}$

7.3.1 Généralités

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 Voir la Figure 3:

$$L_{t\sigma} + \frac{L_m^2}{L_{tr}} = L_{ts} - \frac{L_m^2}{L_{tr}} + \frac{L_m^2}{L_{tr}} = L_{ts}$$

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

7.3.2 Procédure de détermination

Pour chacun des points à vide mesurés (6.5):

Déterminer l'impédance de ligne $Z_{s=0} = \frac{U}{I \cdot \sqrt{3}}$

NOTE 1 Pour le calcul d'un schéma de circuit équivalent dans le cas d'un couplage en triangle:

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

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: $I_m = I$

NOTE 2 Pour le calcul d'un schéma de circuit équivalent dans le cas d'un couplage en triangle: $I_m = \frac{I}{\sqrt{3}}$

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} en fonction des valeurs de I_m (voir la Figure 5 donnant des caractéristiques typiques de l'inductance L en fonction du courant I).

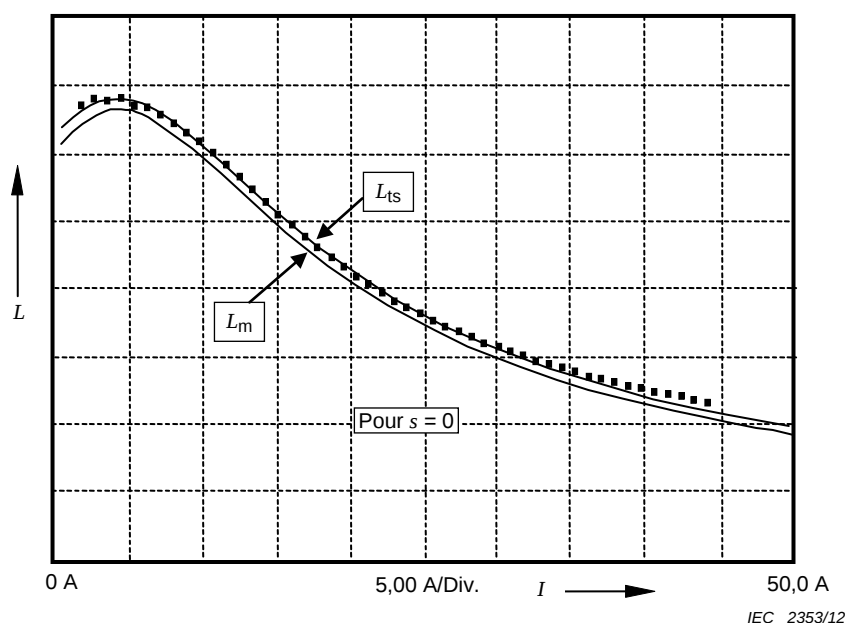


Figure 5 – Caractéristiques typiques de l'inductance L en fonction du courant I

Déterminer la tension interne de la machine:

$$U_{i,s=0} = \sqrt{\left(\frac{U}{\sqrt{3}} - R_{s=0} \cdot I_m \cdot \cos \varphi\right)^2 + \left(\sqrt{1 - (\cos \varphi)^2} \cdot R_{s=0} \cdot I_m\right)^2}$$

NOTE 3 Pour le calcul d'un schéma de circuit équivalent dans le cas d'un couplage en triangle:

$$U_{i,s=0} = \sqrt{(U - R_{s=0} \cdot I_m \cdot \cos \varphi)^2 + \left(\sqrt{1 - (\cos \varphi)^2} \cdot R_{s=0} \cdot I_m\right)^2}$$

Tracer les valeurs de L_{ts} en fonction des valeurs de $U_{i,s=0}$.

7.4 Résistance équivalente de pertes dans le fer R_{feT}

7.4.1 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 6.5, soustraire les pertes d'enroulement du stator à vide de la puissance d'entrée, pour obtenir les pertes constantes:

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

où $I_s = I$.

NOTE Pour le calcul d'un schéma de circuit équivalent dans le cas d'un couplage en triangle: $I_s = I / \sqrt{3}$.

7.4.2 Pertes par frottement et par ventilation

A partir des valeurs de pertes à vide (6.5), utiliser tous ceux qui ne présentent aucun effet de saturation significatif et élaborer une courbe des pertes constantes (P_k), comme déterminé en 7.4.1, en fonction de la tension au carré (U^2). Extrapoler 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 frottement et par ventilation 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 .

7.4.3 Pertes fer

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

Déterminer la résistance équivalente des pertes dans le fer pour le schéma des circuits équivalents de type Γ (Figure 4) relative à une tension assignée U_N et à une fréquence assignée f_N :

$$R_{fe\Gamma} = \frac{3 \cdot U_{i,s=0}^2}{P_{fe}}$$

avec $U_{i,s=0}$ qui est la tension interne déterminée en 7.3, au point d'essai à la tension assignée.

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

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

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

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

NOTE La formule relative à $R_{fe\Gamma}'$ s'applique à la saturation standard des moteurs; elle ne s'applique pas aux moteurs sursaturés, dans lesquels la valeur $R_{fe\Gamma}$ décroît.

7.5 Inductance de fuite totale L_{σ}

7.5.1 Généralités

L'inductance de fuite totale peut être déterminée soit à partir d'un essai de rotation inverse, soit à partir d'un essai à rotor bloqué (6.6), soit encore à partir d'un essai de la courbe de

charge (6.4). La dernière procédure est plus précise, en particulier pour les moteurs à barres à encoche profonde, du fait que les fréquences du rotor pendant l'essai sont plus proches de la fréquence à la vitesse assignée. Dans le cadre de cette procédure, une correction du déplacement de courant n'est pas nécessaire.

7.5.2 Répartition des inductances de fuite entre stator et rotor

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 à encoche profonde) on doit utiliser par définition le rapport $k_{\sigma} = L_{\sigma s} / L_{\sigma r}' = 0,67$ et pour les moteurs à une seule cage, le rapport $k_{\sigma} = L_{\sigma s} / L_{\sigma r}' = 1$.

7.5.3 Détermination de l'inductance de fuite totale à partir d'un essai de rotation inverse ou à partir d'un essai à rotor bloqué (6.6)

7.5.3.1 Généralités

Avec de grandes valeurs de glissement, la résistance du rotor équivalente R_r' / s devient négligeable comparée à la réactance $2\pi f \cdot L_m^2 / L_{tr}$ et de ce fait, la partie réactive de l'impédance mesurée résulte principalement de l'inductance de fuite totale $L_{t\sigma}$ (voir la Figure 3).

Si l'essai de rotation inverse selon 6.6.2 a été réalisé, le glissement sera plus grand ($s = 2$, $f_r = 2 f_N$) comparé à l'essai à rotor bloqué 6.6.3 ($s = 1$, $f_r = f_N$), 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 ($f_r \approx 0$).

7.5.3.2 Procédure de détermination

Pour chacun des courants de ligne mesurés I (6.6.2 ou 6.6.3):

Déterminer l'impédance de ligne $Z = \frac{U}{I \cdot \sqrt{3}}$

NOTE 1 Pour le calcul d'un schéma de circuit équivalent dans le cas d'un couplage en triangle: $Z = \frac{U \cdot \sqrt{3}}{I}$

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: $I_s = I$

NOTE 2 Pour le calcul d'un schéma de circuit équivalent dans le cas d'un couplage en triangle: $I_s = \frac{I}{\sqrt{3}}$

Déterminer la réactance totale de fuite:

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

Déterminer l'inductance totale de fuite:

$$L_{\sigma a} = \frac{X_{\sigma a}}{2\pi \cdot f_N}$$

7.5.3.3 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.

La hauteur réelle de la partie conductrice de la barre doit être utilisée, si la conception interne du moteur est connue. En particulier dans le cas de rotors à double cage, le facteur réel d'effet de peau k_i doit être utilisé, s'il est disponible auprès du fabricant.

Déterminer h' : $h' = h \cdot \sqrt{\pi \cdot 2 f_N \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \gamma_r}$ pour des essais selon (6.6.2)

ou: $h' = h \cdot \sqrt{\pi \cdot f_N \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \gamma_r}$ pour des essais selon (6.6.3)

où

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

Déterminer le facteur d'effet de peau:

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

Déterminer l'inductance totale de fuite:

$$L_{t\sigma} = L_{\sigma a} \cdot \frac{k_{\sigma} + 1}{k_{\sigma} + k_i} \quad \text{avec } k_{\sigma}, \text{ à partir de (7.5.2).}$$

Tracer les valeurs de $L_{t\sigma}$ en fonction des valeurs de I_s .

7.5.3.4 Correction du déplacement de courant par mesure

Les essais conformes à 6.6 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 (7.5.3) doivent être tracées par rapport à la fréquence et une courbe doit être obtenue pour extrapoler l'inductance à $f_r = 0$.

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 les formules d'estimation utilisées en 7.5.3.3.

7.5.4 Détermination de l'inductance de fuite totale à partir d'un essai de la courbe de charge (6.4)

Pour la détermination de l'inductance de fuite totale à partir de l'essai de la courbe de charge le schéma des circuits équivalents de type Γ est utilisé, voir la Figure 4.

Pour chacune des charges mesurées (6.4):

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

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

Déterminer le courant du stator: $I_s = I$

NOTE 1 Pour le calcul d'un schéma de circuit équivalent dans le cas d'un couplage en triangle: $I_s = \frac{I}{\sqrt{3}}$

Déterminer les composantes du courant du stator:

$$I_{sa} = I_s \cdot \cos\varphi \quad ; \quad I_{sb} = -I_s \cdot \sqrt{1 - (\cos\varphi)^2}$$

Déterminer la tension interne de la machine: $U_i = \sqrt{U_{ia}^2 + U_{ib}^2}$

avec $U_{ia} = \frac{U}{\sqrt{3}} - \frac{R}{2} \cdot I_{sa} \quad ; \quad U_{ib} = -\frac{R}{2} \cdot I_{sb}$

NOTE 2 Pour le calcul d'un schéma de circuit équivalent dans le cas d'un couplage en triangle:

avec $U_{ia} = U - \frac{3R}{2} \cdot I_{sa} \quad ; \quad U_{ib} = -\frac{3R}{2} \cdot I_{sb}$

Déterminer l'inductance totale du stator L_{ts} à partir de l'essai à vide (7.3) par interpolation linéaire de l'inductance entre deux tensions adjacentes $U_{i,s=0}$ à la tension interne de la machine U_i .

Déterminer la réactance totale du stator X_{ts} : $X_{ts} = 2\pi \cdot f_N \cdot L_{ts}$

Déterminer la résistance des pertes dans le fer, corrigée: $R_{fe\Gamma}' = R_{fe\Gamma} \cdot \frac{U_i^2}{U_{i,s=0}^2}$

avec $U_{i,s=0}$ qui est la tension interne déterminée en 7.3, au point d'essai à la tension assignée.

Déterminer les composantes du courant magnétisant:

$$I_{ma} = U_{ia} \cdot \frac{1}{R_{fe\Gamma'}} + U_{ib} \cdot \frac{1}{X_{ts}}; \quad I_{mb} = U_{ib} \cdot \frac{1}{R_{fe\Gamma'}} - U_{ia} \cdot \frac{1}{X_{ts}}$$

Déterminer la réactance du rotor:
$$X_{t\sigma}' = \frac{U_{ib} \cdot (I_{sa} - I_{ma}) - U_{ia} \cdot (I_{sb} - I_{mb})}{(I_{sa} - I_{ma})^2 + (I_{sb} - I_{mb})^2}$$

On doit s'assurer que $X_{t\sigma}'$ croît de manière strictement monotone avec la décroissance du courant. En raison des imprécisions de mesure, ceci peut ne pas être toujours le cas. Les valeurs de $X_{t\sigma}'$ ne croissant pas avec la décroissance du courant doivent être éliminées et remplacées par de nouvelles valeurs $X_{t\sigma}''$ issues d'une extrapolation linéaire des deux dernières valeurs correctes de $X_{t\sigma}'$.

Déterminer l'inductance du rotor:
$$L_{t\sigma}'' = \frac{X_{t\sigma}'}{2\pi \cdot f_N} \quad \text{ou} \quad L_{t\sigma}'' = \frac{X_{t\sigma}''}{2\pi \cdot f_N}$$

Transformer l'inductance du rotor dans un schéma des circuits équivalents de type L:

$$L_{t\sigma} = L_{t\sigma}'' \cdot \frac{L_{ts}}{L_{ts} + L_{t\sigma}''}$$

Tracer les valeurs de $L_{t\sigma}$ en fonction des valeurs de I_s .

7.6 Inductance de magnétisation L_m et tension U_m

7.6.1 A partir d'un essai en rotation inverse ou d'un essai à rotor bloqué (6.6)

Pour chacune des valeurs déterminées d'inductance totale du stator L_{ts} et de courant magnétisant I_m (7.3):

Calculer l'inductance de fuite totale L_σ correspondante, à partir du (7.5.3), par interpolation linéaire, en utilisant le courant magnétisant I_m (7.3) par rapport au courant du stator I_s (7.5.3).

Déterminer l'inductance de magnétisation:
$$L_m = L_{ts} - \frac{L_{t\sigma}}{1 + \frac{1}{k_s}}$$

Déterminer la tension de magnétisation:
$$U_m = 2\pi \cdot f_N \cdot L_m \cdot I_m$$

Tracer les valeurs de L_m en fonction des valeurs de U_m .

7.6.2 A partir de l'essai de la courbe de charge (6.4)

Pour chacune des valeurs d'inductance totale du stator L_{ts} et de l'inductance de fuite totale L_σ déterminées à partir de l'essai de la courbe de charge (7.5.4):

Déterminer l'inductance de magnétisation:
$$L_m = L_{ts} - \frac{L_{t\sigma}}{1 + \frac{1}{k_\sigma}}$$

Déterminer l'inductance de fuite du stator:
$$L_{\sigma s} = L_{ts} - L_m$$

Déterminer la tension de magnétisation:
$$U_m = \sqrt{U_{ma}^2 + U_{mb}^2}$$

avec
$$U_{ma} = \frac{U}{\sqrt{3}} - \frac{R}{2} \cdot I_{sa} + 2\pi \cdot f_N \cdot L_{\sigma s} \cdot I_{sb}; \quad U_{mb} = -\frac{R}{2} \cdot I_{sb} - 2\pi \cdot f_N \cdot L_{\sigma s} \cdot I_{sa}$$

NOTE Pour le calcul d'un schéma de circuit équivalent dans le cas d'un couplage en triangle:

avec
$$U_{ma} = U - \frac{3R}{2} \cdot I_{sa} + 2\pi \cdot f_N \cdot L_{\sigma s} \cdot I_{sb}; \quad U_{mb} = -\frac{3R}{2} \cdot I_{sb} - 2\pi \cdot f_N \cdot L_{\sigma s} \cdot I_{sa}$$

Tracer les valeurs de L_m en fonction des valeurs de U_m .

7.7 Inductances de fuite du stator et du rotor $L_{\sigma s}$ et $L_{\sigma r}'$

7.7.1 A partir d'un essai en rotation inverse ou d'un essai à rotor bloqué (6.6)

Pour chacune des valeurs déterminées de l'inductance totale du stator L_{ts} (7.3), de l'inductance de fuite totale $L_{t\sigma}$ (7.5.3) et de l'inductance de magnétisation L_m (7.6.1), les inductances de fuite deviennent:

$$L_{\sigma s} = L_{ts} - L_m$$

$$L_{\sigma r}' = L_{t\sigma} - L_s$$

Tracer les valeurs de $L_{\sigma s}$ et de $L_{\sigma r}'$ en fonction des valeurs de I_m .

7.7.2 A partir de l'essai de la courbe de charge (6.4)

Pour chacune des valeurs déterminées de l'inductance totale du stator L_{ts} et de l'inductance de fuite totale $L_{t\sigma}$ (7.5.4) et de l'inductance de magnétisation L_m (7.6.2), les inductances de fuite deviennent:

$$L_{\sigma s} = L_{ts} - L_m$$

$$L_{\sigma r}' = L_{t\sigma} - L_s$$

Tracer les valeurs de $L_{\sigma s}$ et de $L_{\sigma r}'$ en fonction des valeurs de I_s (7.5.4).

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:

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' and I_m (ou U_m) pour le fonctionnement assigné.

Déterminer le courant du stator pour le fonctionnement assigné: $I_s = I_N$

NOTE 1 Pour le calcul d'un schéma de circuit équivalent dans le cas d'un couplage en triangle: $I_s = \frac{I_N}{\sqrt{3}}$

Déterminer l'inductance L_s à partir de (7.7), par interpolation linéaire avec le courant du stator I_s .

Déterminer la tension du stator: $U_s = \frac{U_N}{\sqrt{3}}$

NOTE 2 Pour le calcul d'un schéma de circuit équivalent dans le cas d'un couplage en triangle: $U_s = U_N$

Déterminer la tension de magnétisation:

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

Déterminer l'inductance L_m à partir 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' à partir de (7.7), par interpolation linéaire avec le courant du rotor I_r' .

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

A partir de l'essai de charge de (6.3):

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

Déterminer la tension et le courant du stator $U_s = \frac{U}{\sqrt{3}}$; $I_s = I$

NOTE 1 Pour le calcul d'un schéma de circuit équivalent dans le cas d'un couplage en triangle: $U_s = U$;

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

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

Déterminer l'inductance de fuite du stator L_s à partir de (7.7), par interpolation linéaire avec le courant du stator I_s .

Déterminer la tension de magnétisation:

$$\begin{aligned} U_{ma} &= U_s - I_s \cdot \left(\cos\varphi \cdot R_{s,25^\circ} \cdot \frac{k_s + \theta_L}{k_s + 25} + \sqrt{1 - (\cos\varphi)^2} \cdot 2\pi \cdot f_N \cdot L_{\sigma s} \right) \\ U_{mb} &= I_s \cdot \left(\sqrt{1 - (\cos\varphi)^2} \cdot R_{s,25^\circ} \cdot \frac{k_s + \theta_L}{k_2 + 25} - \cos\varphi \cdot 2\pi \cdot f_N \cdot L_{\sigma s} \right) \\ U_m &= \sqrt{U_{ma}^2 + U_{mb}^2} \end{aligned}$$

Déterminer l'inductance de magnétisation L_m à partir de (7.6), par interpolation linéaire avec la tension de magnétisation U_m .

Déterminer le courant du rotor:

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

Déterminer l'inductance de fuite du rotor $L_{\sigma r}'$ à partir de (7.7), par interpolation linéaire avec le courant du rotor I_r' .

Déterminer l'impédance ligne: $Z = \frac{U}{I \cdot \sqrt{3}}$

NOTE 2 Pour le calcul d'un schéma de circuit équivalent dans le cas d'un couplage en triangle: $Z = \frac{U \cdot \sqrt{3}}{I}$

Déterminer la réactance ligne: $X = Z \cdot \sqrt{1 - (\cos\varphi)^2}$

Déterminer les réactances:

$$X_{\sigma r}' = 2\pi \cdot f_N \cdot L_{\sigma r}'$$

$$X_{\sigma s} = 2\pi \cdot f_N \cdot L_{\sigma s}$$

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

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

$$R_{r,25^\circ}' = s \cdot (X_{\sigma r}' + X_m) \cdot \sqrt{\frac{X_m \cdot X_{\sigma r}' - (X - X_{\sigma s})}{X_m + X_{\sigma r}'}} \cdot \frac{k_r + 25}{k_r + \theta_L}$$

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

Déterminer la résistance équivalente des pertes dans le fer pour le schéma des circuits équivalents de type T (Figure 1) relative à une tension assignée U_N et à une fréquence assignée f_N :

$$R_{fe} = R_{fe\Gamma} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{X_{os}}{X_m}\right)^2}$$

Annexe A (informative)

Calcul d'échantillons

Données assignées			
Type=	CEI 60034-28	Hauteur d'arbre=	132 mm
P _{2N} =	5500 W	k _s =	235 °C
Connexion=	Y ('Y' or 'D')	k _r =	225 °C
f _N =	50 Hz	g _r =	3,00E+07 S/m conductivité des barres de rotors
2p=	4		
U _N =	417 V (tension de ligne)	U _s =	241 V (tension de phase)
I _N =	10,67 A (courant de ligne)	I _s =	10,67 A (courant de phase)
cos f _N =	0,81		
h=	85,7 %		

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

R _{ll,m} =	1,736 Ohm
Q ₀ =	23,4 °C

(6.3) Essai de charge à la charge assignée

U	I	P ₁	n	Q _L
V	A	W	1/min	°C
417,8	10,89	6411	1445	105,1

(6.4) Essai de la courbe de charge (alternative au 6.6)

P ₁ cible	P ₁	U	I	n	Q _w	R	R
W	W	V	A	1/min	°C	Ohm	Ohm
avant essai						2,306	(n'est nécessaire que si Q _w n'est pas mesuré)
8022	8670,0	417,1	14,21	1421,5	108,1	-	2,305
7060	7220,0	417,6	12,04	1436,9	110,0	-	2,318
6418	6310,0	417,5	10,74	1446,0	109,8	-	2,316
5776	5810,0	417,6	10,05	1451,0	108,2	-	2,306
5134	4990,0	417,7	8,96	1458,8	107,0	-	2,298
4492	4540,0	417,9	8,39	1463,0	104,4	-	2,280
3851	3710,0	417,7	7,39	1470,5	102,5	-	2,267
3209	3280,0	417,9	6,92	1474,3	99,7	-	2,249
2567	2560,0	417,9	6,20	1480,5	97,7	-	2,235
1604	1990,0	418,0	5,75	1485,3	95,9	-	2,223
après essai						2,224	(n'est nécessaire que si Q _w n'est pas mesuré)

(6.5) Essai à vide

U cible	U	I	P ₁	Q _{NL}
V	V	A	W	°C
459	460,0	8,50	450,0	-
417	417,4	4,99	250,0	-
375	375,8	3,27	170,0	-
334	334,0	2,55	130,0	-
292	292,4	2,14	110,0	-
250	250,7	1,79	90,0	-
209	208,8	1,47	70,0	-
167	166,8	1,18	60,0	-
125	125,2	0,90	49,0	-
83	104,1	0,78	45,0	29,1

(6.6) Essai en rotation inverse ou à rotor bloqué (alternative au 6.4)

I cible	I	U	P ₁ glissement s=
A	A	V	W (utiliser 1 pour l'essai à rotor bloqué et 2 pour l'essai en rotation inverse)
15,5	16,09	135,5	1170,0
13,9	13,36	120,2	830,0
12,3	10,59	102,3	530,0
10,7	8,02	83,7	300,0
9,1	5,33	62,6	140,0
7,5	4,84	58,6	110,0
5,9	3,73	49,4	70,0
4,3	2,72	40,8	40,0
2,7	2,10	35,3	20,0
1,1	0,99	24,9	10,0

(7.2) Résistance de l'enroulement du stator

$$R_{s,25^{\circ}} = 0,873 \text{ Ohm}@25^{\circ}\text{C}$$

(7.3) Inductance totale du stator

$Z_{s=0}$ Ohm	$\cos \phi$	$R_{s=0}$ Ohm	I_m A	X_{ts} Ohm	L_{ts} H	$U_{i,s=0}$ V	Y_{ts} Wb
31,24	0,07	2,08	8,50	31,2	0,0992	265,0	0,844
48,32	0,07	3,35	4,99	48,2	0,1534	240,4	0,765
66,28	0,08	5,29	3,27	66,1	0,2103	216,3	0,688
75,73	0,09	6,68	2,55	75,4	0,2401	192,1	0,611
79,00	0,10	8,03	2,14	78,6	0,2502	167,9	0,535
80,70	0,12	9,33	1,79	80,2	0,2552	143,8	0,458
82,21	0,13	10,85	1,47	81,5	0,2594	119,5	0,380
81,63	0,18	14,36	1,18	80,4	0,2558	94,8	0,302
80,32	0,25	20,16	0,90	77,7	0,2475	70,0	0,223
77,03	0,32	24,65	0,78	73,0	0,2323	56,9	0,181

(7.4) Résistance équivalente des pertes dans le fer

I_s A	P_k W	$(U_{i,s=0})^2$ V ²	P_{fe} W	
8,50	257,7	70222	221,4	
4,99	183,8	57786	147,5	
3,27	141,5	46776	105,2	
2,55	112,7	36903	76,4	$U_{i,s=0} = 240,3 \text{ V}$
2,14	97,8	28198	61,5	
1,79	81,4	20665	45,1	
1,47	64,3	14284	28,0	Correlation = 0,9957
1,18	56,3	8990	20,0	$P_{fw} = 36,3 \text{ W}$
0,90	46,8	4896	10,5	$P_{fe} = 147,0 \text{ W}$
0,78	43,4	3240	7,1	$R_{feG} = 1179 \text{ Ohm}$

(7.5.3) Inductance de fuite totale à partir d'un essai en rotation inverse ou d'un essai à rotor bloqué

$k_s = 0,67$		$h = 0,02244 \text{ m}$		$k_i = 0,834$			
		$h' = 1,727$					
Z Ohm	$\cos \phi$	R Ohm	I_s A	X_{sa} Ohm	L_{sa} H	L_s H	Y_s Wb
4,86	0,31	1,51	16,09	4,6	0,0147	0,0163	0,263
5,19	0,30	1,55	13,36	5,0	0,0158	0,0175	0,234
5,58	0,28	1,58	10,59	5,3	0,0170	0,0189	0,200
6,03	0,26	1,55	8,02	5,8	0,0185	0,0206	0,165
6,78	0,24	1,64	5,33	6,6	0,0209	0,0233	0,124
6,99	0,22	1,57	4,84	6,8	0,0217	0,0241	0,117
7,64	0,22	1,68	3,73	7,5	0,0237	0,0264	0,098
8,67	0,21	1,80	2,72	8,5	0,0270	0,0300	0,082
9,71	0,16	1,51	2,10	9,6	0,0305	0,0339	0,071
14,52	0,23	3,40	0,99	14,1	0,0449	0,0499	0,049

(7.5.4) Inductance de fuite totale à partir d'un essai de la courbe de charge

$\cos \phi$	s	I_s A	I_{sa} A	I_{sb} A	U_{ia} V	U_{ib} V	U_i V	L_{ts} H
0,84	0,052	14,21	12,00	-7,60	227,0	8,8	227,2	0,1846
0,83	0,042	12,04	9,98	-6,73	229,5	7,8	229,6	0,1788
0,81	0,036	10,74	8,73	-6,26	231,0	7,2	231,1	0,1754
0,80	0,033	10,05	8,03	-6,04	231,8	7,0	231,9	0,1734
0,77	0,027	8,96	6,90	-5,71	233,3	6,6	233,3	0,1700
0,75	0,025	8,39	6,27	-5,57	234,1	6,4	234,2	0,1681
0,69	0,020	7,39	5,13	-5,33	235,3	6,0	235,4	0,1652
0,65	0,017	6,92	4,53	-5,23	236,2	5,9	236,2	0,1632
0,57	0,013	6,20	3,54	-5,10	237,3	5,7	237,4	0,1605
0,48	0,010	5,75	2,75	-5,05	238,3	5,6	238,3	0,1583

X_{ts} Ohm	R_{feG} Ohm	I_{ma} A	I_{mb} A	I_m A	X_s' Ohm	X_s'' Ohm	L_s'' H	L_s H	Y_s Wb
58,0	1053	0,4	-3,9	3,9	6,32	6,32	0,0201	0,0181	0,258
56,2	1076	0,4	-4,1	4,1	6,85	6,85	0,0218	0,0194	0,234
55,1	1090	0,3	-4,2	4,2	7,24	7,24	0,0230	0,0204	0,219
54,5	1098	0,3	-4,3	4,3	7,51	7,51	0,0239	0,0210	0,211
53,4	1111	0,3	-4,4	4,4	7,99	7,99	0,0254	0,0221	0,198
52,8	1119	0,3	-4,4	4,4	8,34	8,34	0,0265	0,0229	0,192
51,9	1131	0,3	-4,5	4,5	9,12	9,12	0,0290	0,0247	0,183
51,3	1139	0,3	-4,6	4,6	9,57	9,57	0,0305	0,0257	0,178
50,4	1150	0,3	-4,7	4,7	10,63	10,63	0,0338	0,0280	0,173
49,7	1159	0,3	-4,8	4,8	12,83	12,83	0,0408	0,0325	0,187

(7.6.1) and (7.7.1) Inductance et tension de magnétisation, inductance de fuite du stator et du rotor à partir d'un essai en rotation inverse ou d'un essai à rotor bloqué

I_m A	L_{ts} H	L_s H	L_m H	Y_m Wb	U_m V	$L_{\sigma s}$ H	$L_{\sigma r'}$ H
8,50	0,0992	0,0203	0,0911	0,774	243,3	0,0081	0,0121
4,99	0,1534	0,0238	0,1439	0,717	225,4	0,0096	0,0143
3,27	0,2103	0,0280	0,1991	0,652	204,7	0,0112	0,0168
2,55	0,2401	0,0311	0,2276	0,580	182,1	0,0125	0,0186
2,14	0,2502	0,0337	0,2367	0,506	158,9	0,0135	0,0202
1,79	0,2552	0,0383	0,2398	0,430	135,1	0,0154	0,0229
1,47	0,2594	0,0430	0,2421	0,355	111,6	0,0173	0,0258
1,18	0,2558	0,0472	0,2369	0,279	87,8	0,0189	0,0282
0,90	0,2475	0,0512	0,2269	0,204	64,2	0,0205	0,0306
0,78	0,2323	0,0529	0,2111	0,165	51,7	0,0212	0,0317

(7.6.2) and (7.7.2) Inductance et tension de magnétisation, inductance de fuite du stator et du rotor à partir d'un essai de la courbe de charge

I_s A	L_{ts} H	L_s H	L_m H	Y_m Wb	$L_{\sigma s}$ H	$L_{\sigma r'}$ H	U_{ma} V	U_{mb} V	U_m V
14,21	0,1846	0,0181	0,1773	0,696	0,0073	0,0109	209,6	-18,7	210,4
12,04	0,1788	0,0194	0,1710	0,700	0,0078	0,0116	213,0	-16,7	213,7
10,74	0,1754	0,0204	0,1673	0,702	0,0082	0,0122	214,9	-15,1	215,4
10,05	0,1734	0,0210	0,1649	0,703	0,0084	0,0126	215,9	-14,3	216,3
8,96	0,1700	0,0221	0,1612	0,705	0,0089	0,0133	217,3	-12,7	217,7
8,39	0,1681	0,0229	0,1589	0,705	0,0092	0,0137	218,0	-11,8	218,3
7,39	0,1652	0,0247	0,1552	0,705	0,0099	0,0148	218,8	-9,9	219,0
6,92	0,1632	0,0257	0,1529	0,705	0,0103	0,0154	219,2	-8,8	219,4
6,20	0,1605	0,0280	0,1493	0,704	0,0112	0,0167	219,4	-6,8	219,5
5,75	0,1583	0,0325	0,1453	0,697	0,0130	0,0194	217,6	-5,6	217,7

(7.8) Inductances pour calculs à flux constant (charge assignée)

à partir d'un essai en rotation inverse ou d'un essai à rotor bloqué

$I_s =$	10,67 A	$U_{ma} =$	219,0 V
$L_{\sigma s} =$	0,0073 H	$U_{mb} =$	-14,2 V
$U_s =$	240,8 V	$U_m =$	219,4 V
		$L_m =$	0,1599 H
		$I_r' =$	9,13 A
		$L_{\sigma r'} =$	0,0118 H

(7.8) Inductances pour calculs à flux constant (charge assignée) à partir d'un essai de la courbe de charge

$I_s =$	10,67 A	$U_{ma} =$	217,1 V
$L_{\sigma s} =$	0,0082 H	$U_{mb} =$	-16,8 V
$U_s =$	240,8 V	$U_m =$	217,7 V
		$L_m =$	0,1629 H
		$I_r' =$	9,19 A
		$L_{\sigma r'} =$	0,0131 H

(7.9) Résistance de la cage du rotor à partir d'un essai de la courbe de charge

$n_{syn} =$	1500 1/min		
$s =$	0,037		
$U_s =$	241,2 V	$U_{ma} =$	216,8 V
$I_s =$	10,89 A	$U_{mb} =$	-12,7 V
$\cos \phi =$	0,81	$U_m =$	217,2 V
$L_{\sigma s} =$	0,0072 H	$L_m =$	0,1657 H
$X_{\sigma s} =$	2,25 Ohm	$X_m =$	52,07 Ohm
		$I_r' =$	9,36 A
		$L_{\sigma r'} =$	0,0116 H
		$X_{\sigma r'} =$	3,65 Ohm
$Z =$	22,15 Ohm		
$X =$	12,88 Ohm		
$R_{r,25^\circ} =$	0,65 Ohm		

(7.9) Résistance de la cage du rotor à partir d'un essai de la courbe de charge

$n_{syn} =$	1500 1/min		
$s =$	0,037		
$U_s =$	241,2 V	$U_{ma} =$	214,9 V
$I_s =$	10,89 A	$U_{mb} =$	-15,4 V
$\cos \phi =$	0,81	$U_m =$	215,5 V
$L_{\sigma s} =$	0,0081 H	$L_m =$	0,1405 H
$X_{\sigma s} =$	2,55 Ohm	$X_m =$	44,15 Ohm
		$I_r' =$	9,32 A
		$L_{\sigma r'} =$	0,0130 H
		$X_{\sigma r'} =$	4,09 Ohm
$Z =$	22,15 Ohm		
$X =$	12,88 Ohm		
$R_{r,25^\circ} =$	0,59 Ohm		

(7.10) Résistance de pertes dans le fer à partir d'un essai en rotation inverse ou d'un essai à rotor bloqué	
$R_{fe} =$	1083 Ohm

(7.10) Résistance des pertes dans le fer à partir d'un essai de la courbe de charge	
$R_{fe} =$	1054 Ohm

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

3, rue de Varembé
PO Box 131
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel: + 41 22 919 02 11
Fax: + 41 22 919 03 00
info@iec.ch
www.iec.ch