

TECHNICAL SPECIFICATION

SPÉCIFICATION TECHNIQUE

**Electric traction – Rotating electrical machines for rail and road vehicles –
Part 3: Determination of the total losses of converter-fed alternating current
motors by summation of the component losses**

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

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



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2010 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 Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland
Email: inmail@iec.ch
Web: 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.

- Catalogue of IEC publications: www.iec.ch/searchpub

The IEC on-line Catalogue enables you to search by a variety of criteria (reference number, text, technical committee,...). It also gives information on projects, withdrawn and replaced publications.

- IEC Just Published: www.iec.ch/online_news/justpub

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

- Electropedia: www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing more than 20 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary online.

- Customer Service Centre: www.iec.ch/webstore/custserv

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please visit the Customer Service Centre FAQ or contact us:

Email: csc@iec.ch

Tel.: +41 22 919 02 11

Fax: +41 22 919 03 00

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.

- Catalogue des publications de la CEI: www.iec.ch/searchpub/cur_fut-f.htm

Le Catalogue en-ligne de la CEI vous permet d'effectuer des recherches en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...). Il donne aussi des informations sur les projets et les publications retirées ou remplacées.

- Just Published CEI: www.iec.ch/online_news/justpub

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

- Electropedia: www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne au monde de termes électroniques et électriques. Il contient plus de 20 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans les langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International en ligne.

- Service Clients: www.iec.ch/webstore/custserv/custserv_entry-f.htm

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions, visitez le FAQ du Service clients ou contactez-nous:

Email: csc@iec.ch

Tél.: +41 22 919 02 11

Fax: +41 22 919 03 00

TECHNICAL SPECIFICATION

SPÉCIFICATION TECHNIQUE

**Electric traction – Rotating electrical machines for rail and road vehicles –
Part 3: Determination of the total losses of converter-fed alternating current
motors by summation of the component losses**

**Traction électrique – Machines électriques tournantes des véhicules ferroviaires
et routiers –
Partie 3: Détermination des pertes totales des moteurs à courant alternatif
alimentés par convertisseur par sommation des pertes élémentaires**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX

Q

ICS 45.060

ISBN 2-8318-1085-8

CONTENTS

FOREWORD.....	3
1 Scope and object.....	5
2 Instrumentation	5
3 Summation of losses	6
3.1 The total losses are the sum of the following component losses.	6
3.2 Determination of the component losses	7
3.2.1 Asynchronous motors	7
3.2.2 Synchronous motors	8
Annex A (informative) The equivalent circuit of an asynchronous motor	10
Annex B (informative) Stray load loss	16
Figure 1 – Derivation of equivalent 50 Hz rated power input.....	8
Figure A.1 – Equivalent circuit of an asynchronous motor on no-load.....	10
Figure A.2 – Equivalent circuit of an asynchronous motor on load.....	13
Figure A.3 – Graphical method for determining friction and windage loss	15
Table 1 – Accuracy of external attenuators	6
Table 2 – Overall accuracy of power measurement	6
Table A.1 – Determination of parameters of the equivalent circuit	11
Table A.2 – Definition of parameters	14

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

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

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.

The main task of IEC technical committees is to prepare International Standards. In exceptional circumstances, a technical committee may propose the publication of a technical specification when

- the required support cannot be obtained for the publication of an International Standard, despite repeated efforts, or
- the subject is still under technical development or where, for any other reason, there is the future but no immediate possibility of an agreement on an International Standard.

Technical specifications are subject to review within three years of publication to decide whether they can be transformed into International Standards.

IEC 60349-3, which is a technical specification, has been prepared by IEC technical committee 9: Electrical equipment and systems for railways.

This second edition cancels and replaces the first edition, issued in 1995, and constitutes a technical revision.

The main technical changes with regard to the previous edition are as follows:

- Omissions in some formulas in 3.2.1.2 and Table A.2 were fixed.

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

Enquiry draft	Report on voting
9/1267/DTS	9/1342/RVC

Full information on the voting for the approval of this technical specification 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.

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 be

- transformed into an International standard,
- reconfirmed,
- withdrawn,
- replaced by a revised edition, or
- amended.

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

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

1 Scope and object

This technical specification applies to machines complying with IEC 60349-2.

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

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

2 Instrumentation

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

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

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

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

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

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

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

Table 1 – Accuracy of external attenuators

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

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

Table 2 – Overall accuracy of power measurement

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

NOTE The frequency range over which measurements are necessary depends on the harmonic content of the output from the particular converter used and should therefore be decided for each individual case. With the instrumentation presently available, the overall accuracy of the total harmonic loss measurement is likely to be of the order of ±10 %, but as the loss is unlikely to exceed 3 % of the total power input, this will result in only 0,3 % error in the calculated torque, which is well within the permitted tolerance of –5 % specified in IEC 60349-2.

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

3 Summation of losses

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

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

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

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

- I^2R losses in the stator windings;
- I^2R losses in the rotor winding of asynchronous motors;
- additional load losses (load loss) consisting of:
 - losses in the active iron and metal parts other than the conductors;
 - eddy current losses in the stator and rotor windings arising from current dependent flux pulsation.

3.1.3 Losses supplied at other than the fundamental frequency.

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

3.2 Determination of the component losses

3.2.1 Asynchronous motors

3.2.1.1 No-load losses supplied at the fundamental frequency

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

3.2.1.2 Load dependent losses supplied at the fundamental frequency

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

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

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

where

s is the slip;

P_f is the fundamental frequency input power;

I^2R_{pf} is the stator fundamental frequency I^2R loss;

P_{of} are the fundamental frequency no-load losses;

P_{fw} is the friction and windage loss.

NOTE 1 The friction and windage loss should be determined either by driving the motor on open circuit by a calibrated machine or by the graphical method described in Annex A. The drive may be through a transmission system of known efficiency.

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

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

where

P_s is the additional load losses;

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

I_r is the total current at the guaranteed rating.

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

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

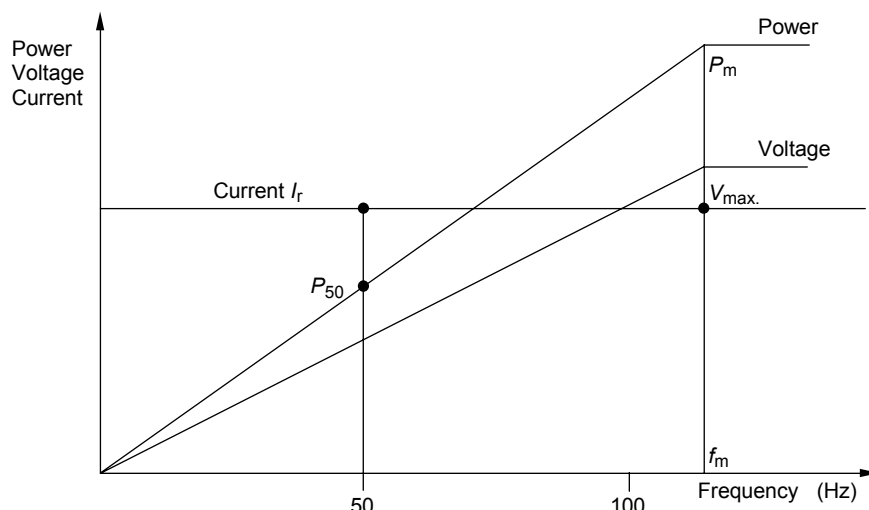
where

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

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

NOTE 2 At the time of publication of this specification, the validity of the formula in all cases had not been fully established by experience. Additional information may be obtained by carrying out a low power test described in Annex B.

NOTE 3 This calculation may be applied not only at 50 Hz but also similarly at 60 Hz.



IEC 536/10

Figure 1 – Derivation of equivalent 50 Hz rated power input

3.2.1.3 Losses supplied at other than the fundamental frequency

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

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

3.2.2 Synchronous motors

3.2.2.1 No-load losses supplied at the fundamental frequency

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

3.2.2.2 Load dependent losses supplied at the fundamental frequency

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

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

3.2.2.3 Losses supplied at other than the fundamental frequency

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

3.2.2.4 Loss in the excitation circuit

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

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

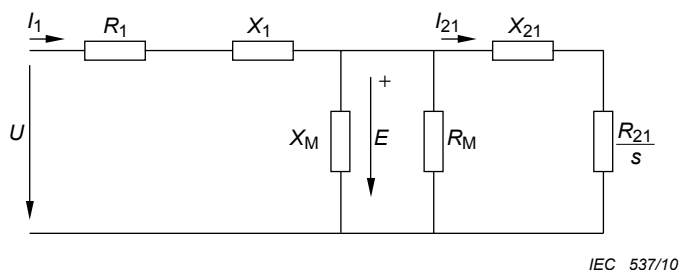
Annex A (informative)

The equivalent circuit of an asynchronous motor

A.1 Circuit description

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

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



Key

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

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

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

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

The definition of the parameters is given in Table A.2.

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

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

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

Parameter	Description	Equation
X_M	U_{10} , I_{10} , P_{10} are measured on no-load. The values of X_1 and X_M at the first iteration are the theoretical calculated ones. $Q_{10} = \sqrt{[(3 \times U_{10} \times I_{10})^2 - P_{10}^2]}$	$X_M = 3 \frac{U_{10}^2}{Q_{10} - 3 I_{10}^2 X_1} \times \frac{1}{(1 + X_1 / X_M)^2} \quad (1)$
X_{1L}	X_{1L} is the stator reactance at the frequency f_L used for the impedance test. The values of X_1 and X_{21} at the first iteration are the theoretically calculated ones. X_m is obtained from equation (1) $Q_{1L} = \sqrt{[(3 \times U_{1L} \times I_{1L})^2 - P_{1L}^2]}$	$X_{1L} = \frac{Q_{1L}}{3 I_{1L}^2} \times \frac{X_1 / X_{21} + X_1 / X_M}{1 + X_1 / X_{21} + X_1 / X_M} \quad (2)$
X_1	X_1 is the stator reactance at frequency f . X_{1L} is obtained from equation (2).	$X_1 = \frac{f}{f_L} \times X_{1L} \quad (3)$
b_M	b_M is the magnetic susceptance. X_M is obtained from equation (1).	$b_M = \frac{1}{X_M} \quad (4)$
X_{21}	X_{21} is the rotor reactance transformed to the stator side. X_1 is obtained from equation (3).	$X_{21} = \frac{X_1}{(X_1 / X_{21})} \quad (5)$
P_{Fe}	P_{Fe} is the core loss. P_{10} and I_{10} are measured values of the no-load active power and current. P_{fw} is the friction and windage loss which is determined graphically or measured by driving the motor disconnected from the supply. R_1 is the stator resistance at the temperature of the winding during the no-load test.	$P_{Fe} = P_{10} - P_{fw} - 3 I_{10}^2 R_1 \quad (6)$
G_M	G_M is the magnetizing conductance. P_{Fe} is obtained from equation (6). U_{10} is the measured no-load voltage. X_1 is obtained from equation (3) and X_M from equation (1).	$G_M = \frac{P_{Fe}}{3 U_{10}^2} \left(1 + \frac{X_1}{X_M} \right)^2 \quad (7)$
R_M	R_M is the magnetizing resistance. G_M is obtained from equation (7).	$R_M = \frac{1}{G_M} \quad (8)$
R_{21}	R_{21} is the rotor resistance, at a specified temperature, transformed to the stator side.	(see note 4)

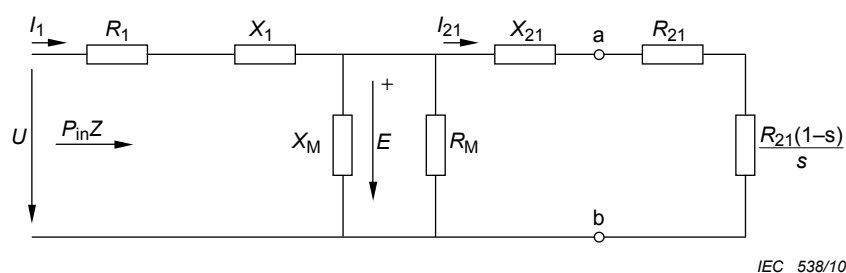
NOTE 1 Equations (1), (2) and (3) should be calculated in ascending order, i.e. (1), (2), (3); (1), (2), (3); (1), (2), (3) and so on. The calculations should be iterated until the errors for X_1 and X_M are less than 0,1 %, i.e. the difference between the values of two successive iterations should be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

Parameter	Description	Equation
The calculation gives correct values of the parameters if a sufficient number of iterations is carried out. Its accuracy is dependent only on the accuracy of the results of no load and impedance tests. The calculation gives a correct value of $X_1 + X_{21}$ with a fixed ratio of X_1/X_{21} equal to the theoretical value of the ratio. NOTE 2 On no-load the rotor and friction and windage losses are negligible compared with the stator losses which enables the magnetizing reactance to be calculated by equation (1) based on the results of a no-load test applied to a simplified circuit. NOTE 3 The stator reactance X_1 and the rotor reactance X_{21} are calculated from the results of a locked rotor test at a frequency as close as practicable to the actual rotor frequency. (In practice, the test frequency is normally above the actual frequency, 15 Hz being a suitable value.) Current, voltage and power factor are measured. The magnetizing resistance R_M is much higher than the transformed rotor resistance to the stator side R_{21} and therefore a simplified circuit is used. NOTE 4 The rotor resistance R_{21} can either be derived from the impedance test results or from measurements made on a load test. The latter is preferred because: a) thermal steady state conditions can be achieved; b) the rotor frequency is the actual value, which is not generally the case during an impedance locked rotor) test. <i>Determination from an impedance test</i> $R_{21} = \left(\frac{P_{1L}}{3 I_{1L}^2} - R_1 \right) \left(1 + \frac{X_{21}}{X_M} \right)^2 - \left(\frac{X_{21}}{X_1} \right)^2 \frac{X_{1L}^2}{R_M}$ P_{1L} and I_{1L} are the active power and stator current with a locked rotor. Note that this equation is only valid if R_{21} is determined from an impedance test. <i>Determination from a load test</i> The parameters at the test point are calculated by the equivalent circuit method using chosen values of R_{21} until the calculated input current equals the test value. The final value of R_{21} is then used for all subsequent calculations.		

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

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

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

**NOTE** Input data

Phase voltage

Fundamental supply frequency

Slip

Friction and windage losses

Stray losses

Harmonic losses arising from the converter supply

Equivalent circuit parameters at the fundamental frequency:

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

Output data

Stator current

Input power

Output power

Efficiency

Power factor

Shaft torque

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

Table A.2 – Definition of parameters

Item	Parameter	Equation*
1	s is the slip	[p.u] input data
2	X_1 is the stator reactance	[Ω] input data
3	X_{21} is the rotor reactance transformed to the stator side	[Ω] input data
4	X_M is the magnetizing reactance	[Ω] input data
5	R_1 is the stator resistance	[Ω] input data
6	R_{21} is the rotor resistance transformed to the stator side	[Ω] input data
7	R_M is the magnetizing resistance	[Ω] input data
8	U is the phase voltage	[V] input data
9	f is the fundamental supply frequency	[Hz] input data
10	m is the number of phases ($m=3$)	input data
11	P_h is the harmonic loss caused by the converter supply	[W] input data (see note 1)
12	R_{21}/s is a resistance in the equivalent circuit	[Ω] (6)/(1)
13	Z_{21}^2 is an auxiliary variable	(3) ² + (12) ²
14	G_{21} is an auxiliary variable	(12)/(13)
15	G_{Fe} is the core conductance	[Ω^{-1}] (1)/(7)
16	G is an auxiliary variable	(14) + (15)
17	B_2 is an auxiliary variable	(3)/(13)
18	b_M is the magnetizing susceptance	[Ω^{-1}] 1/(4)
19	B is an auxiliary variable	(17) + (18)
20	Y^2 is an auxiliary variable	(16) + (19)
21	R_G is an auxiliary variable	(16)/(20)
22	R is the auxiliary variable	(5) + (21)
23	X_G is an auxiliary variable	(19)/(20)
24	X is an auxiliary variable	(23)+(2)
25	Z is the total impedance of the equivalent circuit	[Ω] $\sqrt{[(21)^2 + (23)^2]}$
26	I_1 is the stator current	[A] $U / (25)$
27	P_{in} is the input power excluding item (11)	[W] (10) $\times$ (26) ² $\times$ (22)
28	P_{cu1} is the I^2R loss in the stator	(10) $\times$ (26) ² $\times$ (5)
29	P_{Fe} is the core loss	[W] (10) $\times$ (26) ² $\times$ (15)/(20)
30	P_{in2} is the rotor input	[W] (27) – (28) – (29)
31	P_{cu2} is the I^2R loss in the rotor	[W] (1) $\times$ (30)
32	n is the motor speed	[tr/min] $ns \times [1 - (1)]$
	ns is the synchronous speed	
33	P_{fw} is the friction and windage loss	[W] (see note 2)
34	P_s is the stray loss	[W] (see note 3)
35	ΣP_1 is the total power loss excluding item (11)	[W] (28) + (29) + (31) + (33) + (34)
36	P_{ou} is the output power	(27) – (35)
37	η_1 is the efficiency excluding item (11)	[p.u] $1 - (35)/(27)$
38	η_2 is the efficiency including item (11)	[p.u] $1 - [(11) + (35)]/[(27) + (11)]$
39	PF is the power factor excluding item (11)	[p.u] (22)/(25)
40	T is the output torque	[Nm] $(60 / 2\pi) \times [(36)/(32)]$

* In the equations, numbers in parentheses, e.g. (21), are item numbers.

NOTE 1 The harmonic losses arising from the converter supply are measured on load as specified in 3.2.1.3.

NOTE 2 Determination of the friction and windage loss from no-load tests.

The graph of the total no-load loss as a function of the square of the terminal voltage at constant frequency is a straight line. Extrapolating the graphs to zero voltage for a number of frequencies and voltages, Figure A.3 allows a curve of the friction and windage loss against speed to be plotted. Alternatively, the loss can be measured by driving the motor disconnected from the supply.

NOTE 3 The stray losses are allowed for by the formula specified in 3.2.1.2.

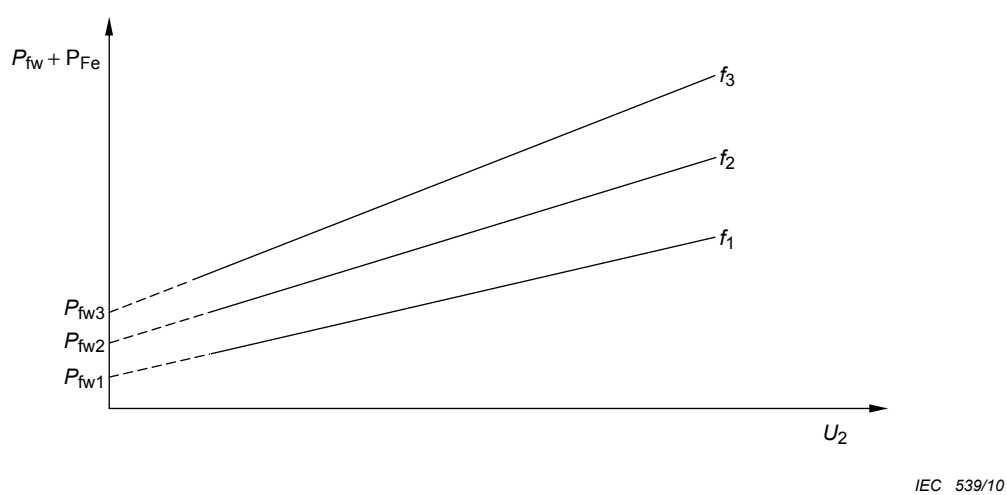


Figure A.3 – Graphical method for determining friction and windage loss

Annex B (informative)

Stray load loss

B.1 Determination of the stray load losses in asynchronous cage type motors by low power testing

A value for the stray load losses of a cage type motor can be obtained by a two-part low power test. The losses are not measured directly. Investigation tests as defined in 5.1.4 of IEC 60349-2 should be carried out to provide data for further consideration.

The losses at the fundamental and higher frequencies are determined by two separate tests, the total stray loss P_s being the sum of the two.

B.2 Fundamental frequency loss (test with the rotor removed)

The fundamental frequency loss P_{ff} is determined by passing a balanced polyphase current through the stator with the rotor removed but with all stator parts in which current might be induced in place. The test current corresponding to a motor input current I shall be I_t :

$$I_t = \sqrt{(I^2 - I_0^2)}$$

where I_0 is the motor no-load current at the same voltage and frequency.

The fundamental frequency loss P_{ff} at line current I is

$$P_{sr} - I_t^2 R_f$$

where

P_{sr} is the total power input to the stator at line current I_t ;

$I_t^2 R_f$ is the total $I^2 R$ loss in the stator at line current I_t and winding temperature t_f .

B.3 Loss at higher frequencies (reverse rotation test)

The loss at higher frequencies P_{hf} is determined by driving the motor at synchronous speed in the opposite direction to the stator field rotation with and without a voltage applied which produces the same stator current I_t as for the test with the rotor removed.

The total loss at higher frequencies, P_{hf} is

$$(P_{mr} - P_{fw}) - (P_{rr} - P_{ff} - I_t^2 R_h)$$

where

P_{mr} is the mechanical power input with voltage applied;

P_{fw} is the mechanical power input without voltage applied;

P_{rr} is the electrical power input to the stator during reverse rotation;

$I_t^2 R_h$ is the total $I^2 R$ loss in the stator at line current I_t and winding temperature t_h .

The total stray loss P_s is $P_{ff} + P_{hf}$.

NOTE 1 If the error arising from the winding temperature difference during the two tests is neglected, P_{hf} can be taken as equal to $(P_{mr} - P_{fw}) - (P_{rr} - P_{sr})$.

NOTE 2 It is recommended that curves of P_{ff} and P_{hf} be plotted against stator current for a number of frequencies to enable the total stray loss to be determined for any point within the working range of the motor.

NOTE 3 The instrumentation should be suitable for measuring the low power factor electrical input.

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	19
1 Domaine d'application et objet	21
2 Instrumentation de mesure	21
3 Sommation des pertes	22
3.1 Les pertes totales sont la somme des pertes élémentaires suivantes.	22
3.2 Détermination des pertes élémentaires.....	23
3.2.1 Moteurs asynchrones	23
3.2.2 Moteurs synchrones	24
Annexe A (informative) Circuit équivalent d'un moteur asynchrone	26
Annexe B (informative) Pertes supplémentaires en charge	32
Figure 1 – Obtention de la puissance d'entrée assignée équivalente à 50 Hz.....	24
Figure A.1 – Circuit équivalent d'un moteur asynchrone à vide	26
Figure A.2 – Circuit équivalent d'un moteur asynchrone en charge	29
Figure A.3 – Méthode graphique de détermination des pertes par frottement et ventilation	31
Tableau 1 – Précision d'un atténuateur externe	22
Tableau 2 – Précision globale de mesure de puissance	22
Tableau A.1 – Détermination des paramètres du circuit équivalent	27
Tableau A.2 – Définition des paramètres	30

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**TRACTION ÉLECTRIQUE –
MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES
DES VÉHICULES FERROVIAIRES ET ROUTIERS –****Partie 3: Détermination des pertes totales des moteurs
à courant alternatif alimentés par convertisseur
par sommation des pertes élémentaires**

AVANT-PROPOS

- 1) La 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 propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La tâche principale des comités d'études de la CEI est l'élaboration des Normes internationales. Exceptionnellement, un comité d'études peut proposer la publication d'une spécification technique

- lorsqu'en dépit de maints efforts, l'accord requis ne peut être réalisé en faveur de la publication d'une Norme internationale, ou
- lorsque le sujet en question est encore en cours de développement technique ou quand, pour une raison quelconque, la possibilité d'un accord pour la publication d'une Norme internationale peut être envisagée pour l'avenir mais pas dans l'immédiat.

Les spécifications techniques font l'objet d'un nouvel examen trois ans au plus tard après leur publication afin de décider éventuellement de leur transformation en Normes internationales.

La CEI 60349-3, qui est une spécification technique, a été établie par le comité d'études 9 de la CEI: Matériels et systèmes électriques ferroviaires.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition parue en 1995, dont elle constitue une révision technique.

Les principaux changements techniques par rapport à l'édition précédente sont les suivants :

- Des omissions dans certaines formules de 3.2.1.2 et du Tableau A.2 ont été corrigées.

Le texte de cette spécification technique est issu des documents suivants:

Projet d'enquête	Rapport de vote
9/1267/DTS	9/1342/RVC

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

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

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

- transformée en Norme internationale,
- reconduite,
- supprimée,
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

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

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

1 Domaine d'application et objet

Cette spécification technique s'applique aux machines satisfaisant à la CEI 60349-2.

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

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

2 Instrumentation de mesure

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

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

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

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

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

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

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

Tableau 1 – Précision d'un atténuateur externe

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

En prenant en compte tous les facteurs, le Tableau 2 donne la liste de la meilleure précision globale de mesure de puissance qui puisse être réalisée au moment de la publication de cette spécification technique.

Tableau 2 – Précision globale de mesure de puissance

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

NOTE La plage de fréquences pour laquelle il est nécessaire de faire des mesures dépend du contenu harmonique de la sortie du convertisseur particulier utilisé et il convient de la choisir pour chaque cas particulier. Avec l'instrumentation de mesure actuellement disponible, la précision globale de la mesure des pertes harmoniques totales est probablement de l'ordre de ±10 %, mais comme les pertes ne dépassent probablement pas 3 % de la puissance d'entrée totale, il en résultera seulement une erreur de 0,3 % du couple calculé, qui est entièrement dans la tolérance de –5 % spécifiée dans la CEI 60349-2.

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

3 Somation des pertes

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

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

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

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

- pertes $R I^2$ dans les enroulements du stator;
- pertes $R I^2$ dans l'enroulement du rotor des moteurs asynchrones;
- pertes supplémentaires en charge (pertes supplémentaires en charge) se décomposant en:

- pertes dans les parties actives du fer et dans les parties métalliques autres que les conducteurs;
- pertes par courants de Foucault dans les enroulements du stator et du rotor provenant des pulsations de flux fonction du courant.

3.1.3 Pertes fournies à des fréquences autres que la fréquence fondamentale.

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

3.2 Détermination des pertes élémentaires

3.2.1 Moteurs asynchrones

3.2.1.1 Pertes à vide fournies à la fréquence fondamentale

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

3.2.1.2 Pertes en charge fournies à la fréquence fondamentale

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

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

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

où

s est le glissement;

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

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

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

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

NOTE 1 Il convient que les pertes par frottement et ventilation soient déterminées soit en entraînant le moteur non alimenté par une machine tarée soit par la méthode graphique décrite dans l'annexe A. L'entraînement peut se faire par l'intermédiaire d'un système de transmission de rendement connu.

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

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

où

P_s sont les pertes supplémentaires en charge;

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

I_r est le courant total au régime garanti.

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

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

où

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

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

NOTE 2 Au moment de la publication de cette spécification technique, la validité de la formule n'avait pas été complètement établie dans tous les cas par l'expérience. On peut obtenir des informations complémentaires en réalisant un essai à basse puissance décrit dans l'Annexe B.

NOTE 3 Ce calcul peut s'appliquer non seulement à 50 Hz, mais de manière similaire à 60 Hz.

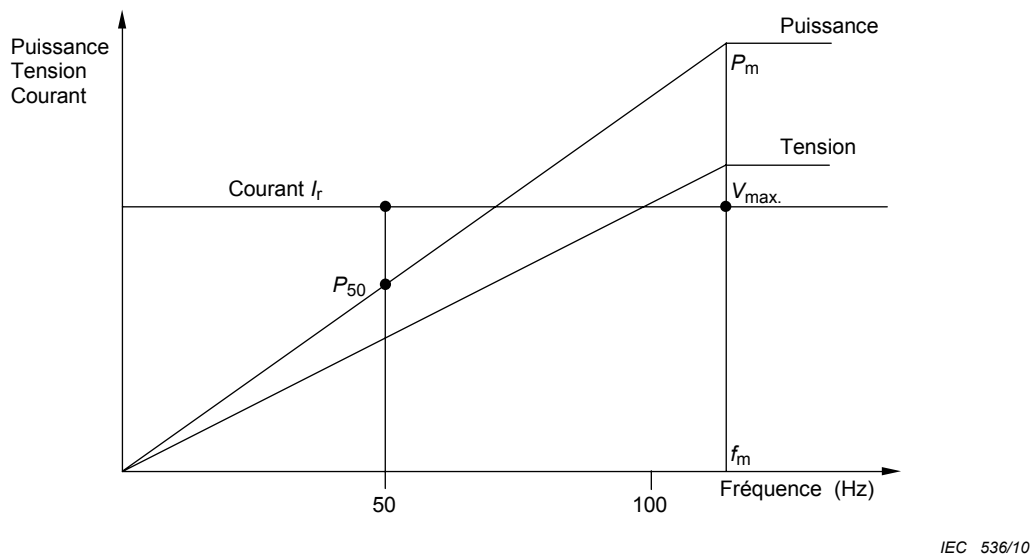


Figure 1 – Obtention de la puissance d'entrée assignée équivalente à 50 Hz

3.2.1.3 Pertes fournies à des fréquences autres que la fréquence fondamentale

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

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

3.2.2 Moteurs synchrones

3.2.2.1 Pertes à vide fournies à la fréquence fondamentale

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

3.2.2.2 Pertes en charge fournies à la fréquence fondamentale

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

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

3.2.2.3 Pertes fournies à des fréquences autres que la fréquence fondamentale

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

3.2.2.4 Pertes dans le circuit d'excitation

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

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

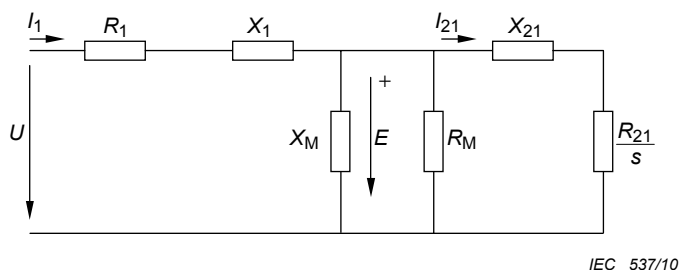
Annexe A (informative)

Circuit équivalent d'un moteur asynchrone

A.1 Description du circuit

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

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



Légende

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

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

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

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

La définition des paramètres est donnée au Tableau A.2.

Le suffixe additionnel « 0 » indique une mesure à vide.

Le suffixe additionnel « L » indique une mesure rotor bloqué.

Tableau A.1 – Détermination des paramètres du circuit équivalent

Paramètre	Description	Equation
X_M	U_{10} , I_{10} , P_{10} sont mesurés à vide. Les valeurs de X_1 et X_M à la première itération sont les valeurs théoriques calculées. $Q_{10} = \sqrt{[(3 \times U_{10} \times I_{10})^2 - P_{10}^2]}$	$X_M = 3 \frac{U_{10}^2}{Q_{10} - 3 I_{10}^2 X_1} \times \frac{1}{(1 + X_1 / X_M)^2} \quad (1)$
X_{1L}	X_{1L} est la réactance du stator à la fréquence f_L utilisée pour l'essai d'impédance. Les valeurs de X_1 et X_{21} à la première itération sont les valeurs théoriques calculées. X_M s'obtient à partir de l'équation (1) $Q_{1L} = \sqrt{[(3 \times U_{1L} \times I_{1L})^2 - P_{1L}^2]}$	$X_{1L} = \frac{Q_{1L}}{3 I_{1L}^2} \times \frac{X_1 / X_{21} + X_1 / X_M}{1 + X_1 / X_{21} + X_1 / X_M} \quad (2)$
X_1	X_1 est la fréquence du stator à la fréquence f . X_{1L} s'obtient à partir de l'équation (2).	$X_1 = \frac{f}{f_L} \times X_{1L} \quad (3)$
b_M	b_M est la susceptance magnétique. X_M s'obtient à partir de l'équation (1).	$b_M = \frac{1}{X_M} \quad (4)$
X_{21}	X_{21} est la réactance du rotor ramenée côté stator. X_1 s'obtient à partir de l'équation (3).	$X_{21} = \frac{X_1}{(X_1 / X_{21})} \quad (5)$
P_{Fe}	P_{Fe} sont les pertes fer. P_{10} et I_{10} sont les valeurs mesurées de la puissance active et du courant à vide. P_{fw} sont les pertes par frottement et ventilation qui sont déterminées graphiquement ou mesurées par entraînement du moteur déconnecté de son alimentation. R_1 est la résistance du stator à la température de l'enroulement pendant les essais à vide.	$P_{Fe} = P_{10} - P_{fw} - 3 I_{10}^2 R_1 \quad (6)$
G_M	G_M est la conductance magnétisante. P_{Fe} s'obtient à partir de l'équation (6). U_{10} est la valeur mesurée de la tension à vide. X_1 s'obtient à partir de l'équation (3) et X_M de l'équation (1).	$G_M = \frac{P_{Fe}}{3 U_{10}^2} \left(1 + \frac{X_1}{X_M} \right)^2 \quad (7)$
R_M	R_M est la résistance magnétisante. G_M s'obtient à partir de l'équation (7).	$R_M = \frac{1}{G_M} \quad (8)$
R_{21}	R_{21} est la résistance du rotor, à une température spécifiée, ramenée côté stator.	(voir note 4)

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

inférieure à 0,1 %. Après l'itération des équations (1), (2), et (3), il convient que toutes les équations suivantes soient calculées par ordre croissant.

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

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

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

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

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

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

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

Détermination à partir d'un essai d'impédance

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

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

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

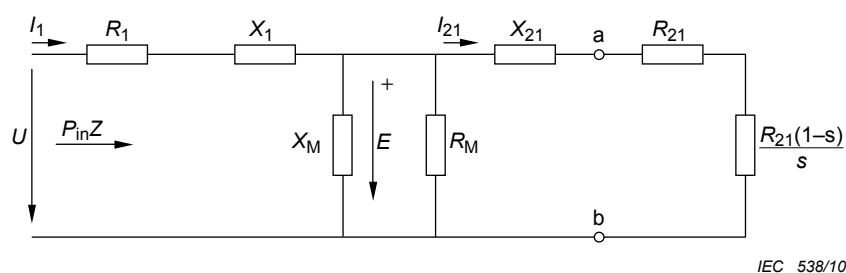
Détermination à partir d'un essai en charge

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

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

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

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

**NOTE** Données d'entrée

Tension de phase

Fréquence fondamentale d'alimentation

Glissement

Pertes par frottement et ventilation

Pertes supplémentaires

Pertes dues aux harmoniques provenant de l'alimentation par convertisseur

Paramètres du circuit équivalent à la fréquence fondamentale:

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

Données de sortie

Courant du stator

Puissance d'entrée

Puissance de sortie

Rendement

Facteur de puissance

Couple de l'arbre

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

Tableau A.2 – Définition des paramètres

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

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

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

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

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

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

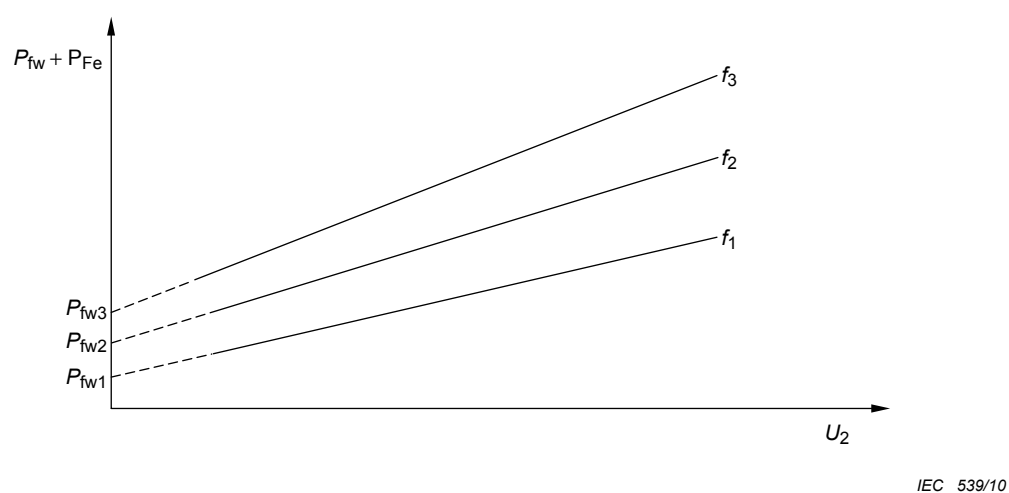


Figure A.3 – Méthode graphique de détermination des pertes par frottement et ventilation

Annexe B (informative)

Pertes supplémentaires en charge

B.1 Détermination des pertes supplémentaires en charge des moteurs asynchrones à cage par un essai à basse puissance

On peut obtenir une valeur des pertes supplémentaires en charge des moteurs à cage par un essai à basse puissance en deux temps. Les pertes ne sont pas mesurées directement. On recommande que des essais d'investigation définis en 5.1.4 de la CEI 60349-2 soient effectués pour fournir des valeurs à prendre ultérieurement en considération.

Les pertes à la fréquence fondamentale et à hautes fréquences sont déterminées par deux essais séparés, les pertes supplémentaires totales P_s étant leur somme.

B.2 Pertes à la fréquence fondamentale (essai rotor enlevé)

Les pertes à la fréquence fondamentale P_{ff} sont déterminées en faisant passer un courant polyphasé équilibré au travers du stator, le rotor étant enlevé, mais toutes les autres parties du stator dans lesquelles des courants pourraient être induits étant en place. Le courant d'essai correspondant à un courant d'entrée du moteur I doit être I_t :

$$I_t = \sqrt{(I^2 - I_0^2)}$$

où I_0 est le courant à vide du moteur à la même tension et à la même fréquence.

Les pertes à la fréquence fondamentale P_{ff} pour le courant de ligne I valent

$$P_{sr} - I_t^2 R_f$$

où

P_{sr} est la puissance totale à l'entrée du stator pour le courant de ligne I_t ;

$I_t^2 R_f$ sont les pertes totales $R I^2$ dans le stator pour le courant de ligne I_t , l'enroulement étant à la température t_f .

B.3 Pertes à hautes fréquences (essai de rotation inverse)

Les pertes à hautes fréquences P_{hf} sont déterminées en entraînant le moteur à la vitesse synchrone dans le sens de rotation opposé à celui du champ tournant du stator avec et sans application de la tension qui engendre le même courant du stator I_t que pour l'essai rotor enlevé.

Les pertes totales à hautes fréquences, P_{hf} valent

$$(P_{mr} - P_{fw}) - (P_{rr} - P_{ff} - I_t^2 R_h)$$

où

P_{mr} est la puissance mécanique d'entrée avec application de la tension;

P_{fw} est la puissance mécanique d'entrée sans application de la tension;

P_{rr} est la puissance électrique d'entrée du stator pendant la rotation inverse;

$I_t^2 R_h$ sont les pertes totales $R I^2$ dans le stator au courant de ligne I_t , l'enroulement étant à la température t_h .

Les pertes supplémentaires totales en charge P_s valent $P_{ff} + P_{hf}$.

NOTE 1 Si l'erreur se produisant du fait que la différence de température de l'enroulement pendant les deux essais est négligée, P_{hf} peut être pris égal à $(P_{mr} - P_{fw}) - (P_{rr} - P_{sr})$.

NOTE 2 Il est recommandé que les courbes de P_{ff} et P_{hf} soient tracées en fonction du courant du stator pour un nombre de fréquences permettant de déterminer les pertes supplémentaires totales en charge pour tout point de la plage de fonctionnement du moteur.

NOTE 3 Il convient que les instruments de mesure permettent de mesurer les puissances électriques à faible facteur de puissance.

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