



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2007 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 It also gives information on projects, withdrawn and replaced publications.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



INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

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

**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)**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX

XB

CONTENTS

FOREWORD.....	4
INTRODUCTION.....	6
1 Scope.....	7
2 Normative references.....	7
3 Terms and definitions	8
4 Symbols and abbreviated terms	13
4.1 Symbols	13
4.2 Additional subscripts.....	14
5 Basic requirements	15
5.1 Direct and indirect efficiency determination	15
5.2 Uncertainty	15
5.3 Preferred methods.....	16
5.4 Power supply	20
5.5 Instrumentation.....	20
5.6 Units	21
5.7 Resistance	21
6 Test methods for determination of efficiency	22
6.1 State of the machine under test and test categories	22
6.2 Excitation circuit measurements.....	23
6.3 Direct measurements.....	23
6.4 Indirect measurements	25
7 Determination of efficiency (direct current machines)	37
7.1 Determination from direct measurement.....	37
7.2 Determination from indirect measurement.....	37
8 Determination of efficiency (induction machines).....	42
8.1 Determination from direct measurement.....	42
8.2 Determination from indirect measurement.....	43
9 Determination of efficiency (synchronous machines)	54
9.1 Determination from direct measurement.....	54
9.2 Determination from indirect measurement.....	55
Annex A (normative) Correction of dynamometer torque readings	61
Annex B (normative) Calculation of values for the Eh-star method	63
Annex C (informative) Types of excitation systems	66
Annex D (normative) Other test methods	67

Figure 1 – Sketch for torque measurement test	24
Figure 2 – Sketch for dual supply back-to-back test (for synchronous machines: $I_M = I_G, f_M = f_G$).....	24
Figure 3 – Sketch for single supply back-to-back test, d.c. machines	26
Figure 4 – Sketch for single supply back-to-back test, synchronous machines	27
Figure 5 – Induction machine, T-model with equivalent iron loss resistor.....	31
Figure 6 – Sketch for single supply back-to-back, additional losses, d.c. machines	32
Figure 7 – Eh-star test circuit	35
Figure 8 – Vector diagram for obtaining current vector from reduced voltage test.....	46
Figure 9 – Induction machines, Reduced model for calculation	49
Figure 10 – Smoothing of the residual loss data.....	51
Figure 11 – Assigned allowance for additional load losses P_{LL} , induction machines.....	53
Table 1 – DC machines	17
Table 2 – Induction machines.....	18
Table 3 – Synchronous machines	19
Table 4 – Reference temperature	22
Table 5 – Multiplying factors for different speed ratios	42

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

ROTATING ELECTRICAL MACHINES –
**Part 2-1: Standard methods for determining losses
and efficiency from tests
(excluding machines for traction vehicles)**

FOREWORD

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

International Standard IEC 60034-2-1 has been prepared by IEC technical committee 2: Rotating machinery.

This standard cancels and replaces IEC 60034-2 (1972), its amendment 1 (1995) and its amendment 2 (1996). IEC 60034-2A (1974) is retained for the time being.

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

FDIS	Report on voting
2/1443/FDIS	2/1460/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.

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

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 maintenance result date indicated on the IEC web site under "<http://webstore.iec.ch>" in the data related to the specific publication. At this date, the publication will be

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

INTRODUCTION

During the revision phase for IEC 60034-2: 1972 and its amendments IEC 60034-2 A1: 1995 (defining IEC 60034-2A: 1974 as Clause 17) and IEC 60034-2 A2: 1996, WG 28 proposed and TC 2 agreed to separate the revised standard into three sections:

- the first part (IEC 60034-2-1) to cover machines within the scope of IEC 60034-1, which are normally tested under load;
- the second part (IEC 60034-2-2) to cover tests applicable mainly for large machines where the facility cost for other methods is not economical (especially the calibrated-machine test, the retardation test and the calorimetric method);
- the third part (IEC 60034-2-3) for tests on machines for converter supply..

To retain in IEC 60034-2-1 as normative the test methods that will eventually become IEC 60034-2-2, a temporary Annex D has been added. This annex contains elements from IEC 60034-2:1972 and its amendment 1:1995. It also makes reference to IEC 60034-2A:1974. Both will be incorporated in the future IEC 60034-2-2.

ROTATING ELECTRICAL MACHINES –

Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles)

1 Scope

This part of IEC 60034 is intended to establish methods of determining efficiencies from tests, and also to specify methods of obtaining specific losses.

This standard applies to d.c. machines and to a.c. synchronous and induction machines of all sizes within the scope of IEC 60034-1.

NOTE These methods may be applied to other types of machines such as rotary converters, a.c. commutator motors and single-phase induction motors.

2 Normative references

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

IEC 60027-1, *Letter symbols to be used in electrical technology – Part 1: General*

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

IEC 60034-2A, *Rotating electrical machines – Part 2: Methods for determining losses and efficiency of rotating electrical machinery from tests (excluding machines for traction vehicles) – First supplement: Measurement of losses by the calorimetric method*

IEC 60034-4, *Rotating electrical machines – Part 4: Methods for determining synchronous machine quantities from tests*

IEC 60034-19, *Rotating electrical machines – Part 19: Specific test methods for d.c. machines on conventional and rectifier-fed supplies*

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 61986, *Rotating electrical machines – Equivalent loading and super-position techniques – Indirect testing to determine temperature rise*

NOTE A revision of IEC 61986 is under consideration; it will be published under reference IEC 60034-29.

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC 60034-1, IEC 60051-1 and the following definitions apply.

3.1

efficiency

ratio of output power to input power expressed in the same units and usually given as a percentage

3.2 Tests for direct efficiency determination

3.2.1

general

method by which the direct determination of efficiency is made by measuring directly the input power and the output power

3.2.2

torque meter test

test in which the mechanical power output of a machine acting as a motor is determined by measurement of the shaft torque by means of a torque meter together with the rotational speed. Alternatively, a test performed on a machine acting as a generator, by means of a torque meter to determine the mechanical power input

3.2.3

dynamometer test

test in accordance with 3.2.2 but measuring the shaft torque by means of a dynamometer

3.2.4

dual-supply back-to-back test

test in which two identical machines are mechanically coupled together, and the total losses of both machines are calculated from the difference between the electrical input to one machine and the electrical output of the other machine

3.3 Tests for indirect efficiency determination

3.3.1

general

test in which the indirect determination of efficiency is made by measuring the input power or the output power and determining the total losses. Those losses are added to the output power, thus giving the input power, or subtracted from the input power, thus giving the output power

3.3.2

single-supply back-to-back test

test in which two identical machines are mechanically coupled together, and are both connected electrically to the same power system. The total losses of both machines are taken as the input power drawn from the system

3.3.3

no-load test

test in which a machine run as a motor provides no useful mechanical output from the shaft, or when run as a generator with its terminals open-circuited

3.3.4**zero power factor test (synchronous machines)**

no-load test on a synchronous machine, which is over-excited and operates at a power factor very close to zero

3.3.5**equivalent circuit method (induction machines)**

test in which the losses are determined by help of an equivalent circuit model

3.3.6**test with rotor removed and reverse rotation test (induction machines)**

combined test in which the additional load losses are determined from a test with rotor removed and a test with the rotor running in reverse direction to the rotating magnetic field

3.3.7**short-circuit test (synchronous machines)**

test in which a machine is run as a generator with its terminals short-circuited

3.3.8**locked rotor test**

test in which the rotor is locked to prevent rotation

3.3.9**eh-star test**

test in which the motor is run in star connection on unbalanced voltage.

3.4 Losses**3.4.1****total losses P_T**

difference between the input power and the output power, equivalent to the sum of the constant losses (see 3.4.2), the load losses (see 3.4.4), the additional load losses (see 3.4.5) and the excitation circuit losses (see 3.4.3)

3.4.2 Constant losses**3.4.2.1****constant losses P_k**

sum of the iron losses and the friction and windage losses

3.4.2.2**iron losses P_{fe}**

losses in active iron and additional no-load losses in other metal parts

3.4.2.3 Friction and windage losses P_{fw} **3.4.2.3.1****friction losses**

losses due to friction (bearings and brushes, if not lifted at rated conditions) not including any losses in a separate lubricating system. Losses in common bearings should be stated separately, whether or not such bearings are supplied with the machine. The bearing losses are based on the operating temperatures of the bearings, the type of oil and oil temperature.

NOTE 1 When the losses in a separate lubricating system are required these should be listed separately.

For vertical machines, the losses in thrust bearings shall be determined excluding any external thrust.

NOTE 2 Additional losses due to external thrust may be stated separately by agreement, which should then include thrust load, temperature of the bearings, type of oil and also oil temperature.

NOTE 3 Friction losses due to thrust load may be included by agreement.

If the tested machine uses direct flow cooling of the bearings, these losses are distributed between the tested machine and any other one coupled to it mechanically, such as a turbine, in proportion to the masses of their rotating parts. If there is no direct flow cooling, the distribution of bearing losses shall be determined from empirical formulae by agreement

3.4.2.3.2

windage losses

total losses due to aerodynamic friction in all parts of the machine, including power absorbed in shaft mounted fans, and in auxiliary machines forming an integral part of the machine

NOTE 1 Losses in a separate ventilating system should be listed separately.

NOTE 2 For machines indirectly or directly cooled by hydrogen, see IEC 60034-1.

3.4.3 Excitation circuit losses

3.4.3.1

excitation circuit losses P_e

sum of the excitation winding losses (see 3.4.3.2), the exciter losses (see 3.4.3.3) and, for synchronous machines, electrical brush loss (see 3.4.3.5), if any

3.4.3.2

excitation winding losses P_f

the excitation (field) winding losses are equal to the product of the exciting current I_e and the excitation voltage U_e

3.4.3.3

exciter losses P_{Ed}

the exciter losses for the different excitation systems (see Annex C) are defined as follows:

a) Shaft driven exciter

The exciter losses are the power absorbed by the exciter at its shaft (reduced by friction and windage losses) plus the power P_{1E} drawn from a separate source at its excitation winding terminals, minus the useful power which the exciter provides at its terminals. The useful power at the terminals of the exciter is equal to the excitation winding losses as per 3.4.3.2 plus (in the case of a synchronous machine) the electrical brush losses as per 3.4.3.5.

If the exciter can be decoupled and tested separately its losses can be determined according to 5.3.

Whenever the exciter makes use of separate auxiliary supplies, their consumptions are to be included in the exciter losses unless they are considered together with the main machine auxiliaries consumption.

b) Brushless exciter

The exciter losses are the power absorbed by the exciter at its shaft, reduced by friction and windage losses (when the relevant test is performed on the set of main machine and exciter), plus the electrical power P_{1E} from a separate source (if any) absorbed by its field winding or its stator winding (in the case of an induction exciter), minus the useful power which the exciter provides at the rotating power converter terminals.

Whenever the exciter makes use of separate auxiliary supplies their consumptions are to be included in the exciter losses unless they are considered together with the main machine auxiliaries consumption.

If the exciter can be decoupled and tested separately, its losses can be determined according to 5.3.

c) Separate rotating exciter

The exciter losses are the difference between the power absorbed by the driving motor, plus the power absorbed by separate auxiliary supplies, of both driving and driven machines, including the power supplied by separate source to their excitation winding terminals, and the excitation power supplied as per 3.4.3.2 and 3.4.3.4. The exciter losses may be determined according to 5.3.

d) Static excitation system (static exciter)

The excitation system losses are the difference between the electrical power drawn from its power source, plus the power absorbed by separate auxiliary supplies, and the excitation supplied as per 3.4.3.2 and 3.4.3.4.

In the case of systems fed by transformers, the transformer losses shall be included in the exciter losses.

e) Excitation from auxiliary winding (auxiliary winding exciter)

The exciter losses are the copper losses in the auxiliary (secondary) winding and the additional iron losses produced by increased flux harmonics. The additional iron losses are the difference between the losses which occur when the auxiliary winding is loaded and when it is unloaded.

Because separation of the excitation component of losses is difficult, it is recommended to consider these losses as an integral part of the stator losses when determining overall losses.

In the cases c) and d) no allowance is made for the losses in the excitation source (if any) or in the connections between the source and the brushes (synchronous machine) or between the source and the excitation winding terminals (d.c. machine).

If the excitation is supplied by a system having components as described in b) to e) the exciter losses shall include the relevant losses of the components pertaining to the categories listed in Annex C as applicable.

3.4.3.4**separately supplied excitation power P_{1E}**

the excitation power P_{1E} supplied from a separate power source is:

- for exciter types a) and b) the exciter excitation power (d.c. or synchronous exciter) or stator winding input power (induction exciter). It covers a part of the exciter losses P_{Ed} (and further losses in induction exciters) while a larger part of P_e is supplied via the shaft;

- for exciter types c) and d) equal to the excitation circuit losses, $P_{1E} = P_e$;
- for exciter type e) $P_{1E} = 0$, the excitation power being delivered entirely by the shaft. Also, $P_{1E} = 0$ for machines with permanent magnet excitation.

Exciter types shall be in accordance with 3.4.3.3

3.4.3.5

brush losses P_b (excitation circuit)

electrical brush loss (including contact loss) of separately excited synchronous machines

3.4.4 Load losses

3.4.4.1

load losses P_L

the sum of the winding (I^2R) losses (see 3.4.4.2) and the electrical brush losses (see 3.4.4.3), if any

3.4.4.2

winding losses

winding losses are I^2R losses:

- in the armature circuit of d.c. machines;
- in the stator and rotor windings of induction machines;
- in the armature windings of synchronous machines

3.4.4.3

brush losses P_b (load circuits)

electrical brush loss (including contact loss) in the armature circuit of d.c. machines and in wound-rotor induction machines

3.4.5

additional load losses P_{LL} (stray-load losses)

losses produced by the load current in active iron and other metal parts other than conductors; eddy current losses in winding conductors caused by load current-dependent flux pulsations and additional brush losses caused by commutation

NOTE These losses do not include the additional no-load losses of 3.4.2.2.

3.4.6

short-circuit losses P_{sc}

current-dependent losses in a synchronous machine and in a d.c. machine when the armature winding is short-circuited

3.5 Test quantities (polyphase a.c. machines)

3.5.1

terminal voltage

for polyphase a.c. machines the arithmetic average of line voltages

3.5.2

line current

for polyphase a.c. machines the arithmetic average of line currents

3.5.3**line-to-line resistance**

for polyphase a.c. machines, the arithmetic average of line-to-line resistance across each set of terminals

NOTE 1 For Y-connected three-phase machines, the phase-resistance is 0,5 line-to-line resistance. For Δ -connected machines, the phase-resistance is 1,5 line-to-line resistance.

NOTE 2 In Clauses 7, 8 and 9, explanations and equations given are for three-phase machines, unless otherwise indicated.

4 Symbols and abbreviated terms**4.1 Symbols**

$\cos \varphi$	is the power factor ¹
f	is the supply frequency, Hz
I	is the average line current, A
k_{θ}	is the temperature correction factor
n	is the operating speed, s ⁻¹
p	is the number of pole pairs
P	is the power, W
P_0	is the input power at no-load, W
P_1	is the input power, excluding excitation ² , W
P_2	is the output power, W
P_b	is the brush loss, W
P_e	is the excitation circuit losses, W
P_{1E}	is the excitation power supplied by a separate source, W
P_{Ed}	is the exciter losses, W
P_{el}	is the electrical power, excluding excitation, W
P_f	is the excitation (field) winding losses, W
P_{fe}	is the iron losses, W
P_{fw}	is the friction and windage losses, W
P_C	is the constant losses, W
P_L	is the load losses, W
P_{Lr}	is the residual losses, W
P_{LL}	is the additional-load losses, W
P_{mech}	is the mechanical power, W
P_k	is the short-circuit losses, W
P_T	is the total losses, W
P_w	is the winding losses, W, where subscript w is generally replaced by a, f, e, s or r

¹ This definition assumes sinusoidal voltage and current.

² Unless otherwise indicated, the tests in this document are described for motor operation, where P_1 and P_2 are electrical input and mechanical output power, respectively.

R	is a winding resistance, Ω
R_{eh}	is the actual value of the auxiliary resistor used for the Eh-star test (see 6.4.5.5), Ω
R'_{eh}	is the typical value of the auxiliary resistor, Ω
R_f	is the field winding resistance, Ω
R_{ll}	is the average line-to-line-resistance, Ω
R_{ph}	is the average phase-resistance, Ω
s	is the slip, in per unit value of synchronous speed
T	is the machine torque, N·m
T_d	is the reading of the torque measuring device, N·m
T_c	is the torque correction, N·m
U	is the average terminal voltage, V
U_0	is the terminal voltage at no-load, V
U_N	is the rated terminal voltage, V
X	is the reactance, Ω
$\underline{Z} = R + j \times X$	is the notation for a complex quantity (impedance as example)
$Z = \underline{Z} = \sqrt{R^2 + X^2}$	is the absolute value of a complex quantity (impedance as example)
Z	is the impedance, Ω
η	is the efficiency
θ_0	is the initial winding temperature, $^{\circ}\text{C}$
θ_a	is the ambient temperature, $^{\circ}\text{C}$
θ_c	primary coolant inlet temperature, $^{\circ}\text{C}$
θ_w	is the winding temperature, $^{\circ}\text{C}$
τ	is a time constant, s

4.2 Additional subscripts

The following subscripts may be added to symbols to clarify the machine function and to differentiate values.

Machine components:

a	armature
e	excitation
f	field winding
r	rotor
s	stator
w	winding
U, V, W	phase designations

Machine categories:

B	booster
D	dynamometer
E	exciter
G	generator
M	motor

Operating conditions:

0	no-load
1	input
2	output
av	average, mean
d	dissipated
el	electrical
i	internal
L	test load
lr	locked rotor
mech	mechanical
N	rated
red	at reduced voltage
t	test
zpf	zero power factor test
θ	corrected to a reference coolant temperature.

NOTE Further additional subscripts are introduced in relevant subclauses.

5 Basic requirements

5.1 Direct and indirect efficiency determination

Tests can be grouped into the three following categories:

- input-output measurement on a single machine. This involves the measurement of electrical or mechanical power into, and mechanical or electrical power out of a machine;
- input and output measurement on two identical machines mechanically connected back-to-back. This is done to eliminate the measurement of mechanical power into or out of the machine;
- measurement of the actual loss in a machine under a particular condition. This is not usually the total loss but comprises certain loss components. The method may, however, be used to calculate the total loss or to calculate a loss component.

The determination of total losses shall be carried out by one of the following methods:

- measurement of total losses;
- determination of separate losses for summation;

NOTE The methods for determining the efficiency of machines are based on a number of assumptions. Therefore, it is not possible to make a comparison between the values of efficiency obtained by different methods.

5.2 Uncertainty

Uncertainty as used in this standard is the uncertainty of determining a true efficiency. It reflects variations in the test procedure and the test equipment.

Although uncertainty should be expressed as a numerical value, such a requirement needs sufficient testing to determine representative and comparative values. This standard uses the following relative uncertainty terms:

- "low" applies to efficiency determinations based solely upon test results;
- "medium" applies to efficiency determinations based upon limited approximations;
- "high" applies to efficiency determinations based upon assumptions.

5.3 Preferred methods

It is difficult to establish specific rules for the determination of efficiency. The choice of test to be made depends on the information required, the accuracy required, the type and size of the machine involved and the available field test equipment (supply, load or driving machine).

Preferred methods are given for each machine configuration in Tables 1 to 3. The test method should be selected from the procedures with the lowest uncertainty.

Table 1 – DC machines

Method	Clause	Preferred method	Required facilities	Uncertainty
Direct				
Calibrated machine test	Annex D		Calibrated machine	See Note 3
Torque measurement	7.1.1	Machine size: $H \leq 180$	Torquemeter/dynamometer for full-load	Low
Total losses				
Single-supply, back-to-back test	7.2.1.1		Two identical units Booster generator	Low
Summation of losses, with load test				
P_{LL} d.c. component: single supply back-to-back test	7.2.2.6.1		Two identical units Booster generator	Low
P_{LL} d.c. component from assigned value	7.2.2.6.3			Medium
P_{LL} a.c. component from specified rectifier supply	7.2.2.6.2	Machine size: $H > 180$	Specified rectifier	Low
Summation of losses, without load test				
Excitation loss from an assigned ratio of load to no- load excitation current P_{LL} from assigned value	7.2.2.5		If test equipment for other tests is not available (no possibility of loading, no duplicate machine)	High
NOTE 1 Due to instrumentation inaccuracies the direct test method is limited to efficiencies up to 95 % to 96 %. For practical purposes, this standard recommends direct tests for machines up to shaft height 180 mm since these are not likely to exceed 95 % efficiency. Machines of larger size and efficiencies below 95 % to 96 % may also be tested successfully using the direct test method.				
NOTE 2 In the "Uncertainty" column, "Low" indicates a procedure determining all loss-components from tests; "Medium" indicates a procedure which is based on a simplified physical model of the machine; "High" indicates a procedure that does not determine all loss-components by tests.				
NOTE 3 Uncertainty to be determined.				

Table 2 – Induction machines

Method	Clause	Preferred method	Required facilities	Uncertainty
Direct				
Torque measurement	8.1.1	All single phase and polyphase ≤ 1 kW	Torquemeter/dynamometer for full-load	Low
Calibrated machine test	Annex D		Calibrated machine	See Note 4
Dual-supply, back-to-back test	8.1.2		Machine set for full-load Two identical units	Low
Total losses				
Calorimetric method	Annex D		Special thermal enclosure	See Note 4
Single supply back-to-back test	8.2.1		Two identical units (wound rotor)	Low
Summation of losses, with and without load test				
P_{LL} determined from residual loss	8.2.2.5.1	Three phase > 1 kW up to 150 kW	Torquemeter/dynamometer for $\geq 1,25 \times$ full-load	Low
P_{LL} from assigned value	8.2.2.5.3			Medium to high
P_{LL} from removed rotor and reverse rotation test	8.2.2.5.2		Auxiliary motor with rated power $\leq 5 \times$ total losses P_T	High
P_{LL} from Eh-star test	8.2.2.5.4	(see Note 3)	Resistor for 150 % rated phase current	Medium
Summation of losses, without load test				
Currents, powers and slip from the equivalent circuit method P_{LL} from assigned value	8.2.2.4.3		If test equipment for other tests is not available (no possibility of applying rated load, no duplicate machine)	Medium/high
<p>NOTE 1 Due to measurement inaccuracies, the determination of P_{LL} from residual losses is limited to correlation coefficients (see 8.2.2.5.1.2) greater than 0,95 and may have uncertainties of the determined efficiency exceeding $\pm 0,5 \%$.</p> <p>NOTE 2 In the "Uncertainty" column, "Low" indicates a procedure determining all loss-components from tests; "Medium" indicates a procedure which is based on a simplified physical model of the machine; "High" indicates a procedure that does not determine all loss-components by tests.</p> <p>NOTE 3 The method for P_{LL} from Eh-star test is suitable for motors between 1 kW and 150 kW; larger ratings are under consideration. The method requires that the winding can be connected in star.</p> <p>NOTE 4 Uncertainty to be determined.</p>				

Table 3 – Synchronous machines

Method	Clause	Preferred method	Required facilities	Uncertainty
Direct				
Torque measurement	9.1.1	Machine size: $H \leq 180$	Torquemeter/dynamometer for full-load	Low
Calibrated machine test	Annex D		Calibrated machine	See Note 3
Dual-supply, back-to-back test	9.1.2		Two identical units	Medium
Total losses				
Zero power factor with excitation current from Potier/ASA/Swedish diagram	9.2.1.2		Supply for full voltage and current	Medium
Calorimetric method	Annex D		Special thermal enclosure	See Note 3
Single supply back-to-back test	9.2.1.1		Two identical units	Low
Summation of losses, with load test				
Summation except P_{LL}	9.2.1		Machine set for full-load	High
P_{LL} from short-circuit test	9.2.2.6	Machine size $H > 180$		Low
Summation of losses, without load test				
Excitation current from Potier/ASA/Swedish diagram P_{LL} from short-circuit test	9.2.2.4 9.2.2.6		If test equipment for other tests is not available (no possibility of applying rated load, no duplicate machine)	Medium
NOTE 1 Due to instrumentation inaccuracies, the direct test method is limited to efficiencies up to 95 % to 96 %. For practical purposes, this standard recommends direct tests for machines up to shaft heights of 180 mm since these are not likely to exceed 95 % efficiency. Machines of larger size and efficiencies below 95 % to 96 % may also be tested successfully using the direct test method.				
NOTE 2 In the "Uncertainty" column, "Low" indicates a procedure determining all loss-components from tests; "Medium" indicates a procedure which is based on a simplified physical model of the machine; "High" indicates a procedure that does not determine all loss-components by tests.				
NOTE 3 Uncertainty to be determined.				

NOTE In the tables, H is the shaft height (distance from the centre line of the shaft to the bottom of the feet), in millimetres (see frame numbers in IEC 60072-1).

5.4 Power supply

5.4.1 Voltage

The voltage shall be in accordance with 7.2 (and 8.3.1 for thermal tests) of IEC 60034-1.

5.4.2 Frequency

The frequency shall be within $\pm 0,3$ % of the rated frequency during measurements.

NOTE This requirement does not apply for the equivalent-circuit method (6.4.4.4).

5.5 Instrumentation

5.5.1 General

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

NOTE For analog instruments the observed values should be in the upper third of the instrument range.

5.5.2 Measuring instruments for electrical quantities

The measuring instruments shall have an accuracy class of 0,2 in accordance with IEC 60051.

NOTE For a routine test as described in 9.1 of IEC 60034-1, an accuracy class of 0,5 is sufficient.

Unless otherwise stated in this standard, the arithmetic average of the three line currents and voltages shall be used.

5.5.3 Instrument transformers

Instrument transformers shall have an accuracy according to IEC 60044-1 so that the errors of the instrument transformers are not greater than $\pm 0,5$ % for general testing or not greater than $\pm 0,3$ % for induction machines, summation of losses method, with additional load loss determination in accordance with 8.2.2.5.1.

5.5.4 Torque measurement

The instrumentation used to measure the torque shall have an accuracy of $\pm 0,2$ % of full scale.

When the shaft torque is measured by means of a dynamometer, a torque correction test shall be carried out. This also applies if any bearing or coupling is interposed between the torque measuring device and the motor shaft. The machine torque T is calculated using the equation:

$$T = T_d + T_c$$

where

T_d is the torque reading of the load test;

T_c is the torque correction according to Annex A.

5.5.5 Speed and frequency measurement

The instrumentation used to measure frequency shall have an accuracy of $\pm 0,1$ % of full scale. The speed measurement should be accurate within 0,1 % or 1 revolution per minute whichever gives the least error.

NOTE 1 Speed in min^{-1} is n in $\text{s}^{-1} \times 60$.

NOTE 2 The measurement of slip by a suitable method should replace speed measurement.

5.5.6 Temperature measurement

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

5.6 Units

Unless otherwise specified, the units of values are SI-units as listed in IEC 60027-1.

5.7 Resistance

5.7.1 Test resistance

Winding resistance R is the ohmic value, determined by appropriate methods.

For d.c. machines, R is the total resistance of all windings carrying armature current (armature, commutating, compensating winding, compound winding). Where resistance measurement is impracticable due to very low resistances, calculated values are permissible.

For d.c. and synchronous machines, R_f is the field winding resistance.

For polyphase a.c. machines, $R = R_{ll}$ is the line-to-line resistance of the stator or armature winding according to 3.5.3. In the case of wound rotor induction machines, $R_{r, ll}$ is the rotor line-to-line resistance. The test resistance at the end of the thermal test shall be determined similar to the extrapolation procedure as described in 8.6.2.3.3 of IEC 60034-1, using the shortest possible time instead of the time interval specified in Table 5 therein, and extrapolating to zero.

The test temperature of windings shall be determined according to 5.7.2.

When winding resistance (under load) cannot be measured directly, the test resistance value shall be adjusted by the difference between the temperature of measured resistance and the temperature derived according to 5.7.2, methods a) to e).

5.7.2 Winding temperature

The winding test temperature shall be determined by one of the following methods (shown in order of preference):

- a) temperature determined from the rated load test resistance R_N by the extrapolation procedure as described in 5.7.1;
- b) temperature measured directly by either ETD or thermocouple;
- c) temperature determined according to a) on a duplicate machine of the same construction and electrical design;
- d) when load capability is not available, determine operating temperature according to IEC 61986;

- e) when the rated load test resistance R_N cannot be measured directly, the winding temperature shall be assumed equal to the reference temperature of the rated thermal class as given in Table 4.

Table 4 – Reference temperature

Thermal class of the insulation system	Reference temperature °C
130 (B)	95
155 (F)	115
180 (H)	135

If the rated temperature rise or the rated temperature is specified as that of a lower thermal class than that used in the construction, the reference temperature shall be that of the lower thermal class.

5.7.3 Correction to reference coolant temperature

The winding resistance values recorded during test shall be referred to a standard reference temperature of 25 °C. The correction factor to adjust the winding resistance (and the slip in the case of cage induction machines) to a standard reference coolant temperature of 25 °C shall be determined by

$$k_{\theta} = \frac{235 + \theta_w + 25 - \theta_c}{235 + \theta_w}$$

where

k_{θ} is the temperature correction factor for windings;

θ_c is the inlet coolant temperature during test;

θ_w is the winding temperature according to 5.7.2.

The temperature constant 235 is for copper; this should be replaced by 225 for an aluminium winding.

For machines with water as the primary or secondary coolant, the water reference temperature shall be 25 °C according to Table 4 of IEC 60034-1. Alternative values may be specified by agreement.

6 Test methods for determination of efficiency

6.1 State of the machine under test and test categories

Tests shall be conducted on an assembled machine with the essential components in place, to obtain test conditions equal or very similar to normal operating conditions.

NOTE It is preferable that the machine be selected randomly from series production without special considerations.

NOTE Sealing elements may be removed during the tests, if an additional test on machines of similar design has shown that friction is insignificant after adequately long operation.

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

On machines with adjustable brushes, the brushes shall be placed in the position corresponding to the specified rating. On induction motors with wound rotor having a brush lifting device, the brushes shall be lifted during tests, with the rotor winding short-circuited. For measurements on no-load, the brushes shall be placed in the neutral axis on d.c. machines.

6.2 Excitation circuit measurements

Determination of voltage U_e and current I_e (see 3.4.3.2) depends on the configurations of the excitation system (see 3.4.3.3). Where applicable, test data shall be recorded according to the following:

- a) for machines excited by shaft driven, separate rotating, static and auxiliary winding exciters (see 3.4.3.3 a), c), d) and e)), voltage U_e and current I_e are measured:
 - at the excitation winding terminals of d.c. machines;
 - at the field winding slip-rings of synchronous machines;
- b) for machines excited by brushless exciters (see 3.4.3.3 b)), test data shall be recorded by either of the following methods:
 - voltage U_e measured using auxiliary (provisional) slip-rings connected to the field winding ends. From the voltage and resistance R_e determine the field winding current $I_e = \frac{U_e}{R_e} = \frac{U_f}{R_f}$. The field winding resistance is to be measured after switching off the machine using the extrapolation procedure according to 5.7.1;
 - voltage U_e and current I_e measured using power slip-rings suitable for direct measurement of field winding current.

NOTE The difference between U_e and U_f (voltage drop) is in practice almost negligible.

Voltages and currents shall be measured at stabilized temperatures.

The excitation circuit losses P_e are determined according to 7.2.2.5 (d.c. machines) or 9.2.2.4 (synchronous machines).

6.3 Direct measurements

6.3.1 Torque measurement tests

6.3.1.1 General

These are test methods in which the mechanical power P_{mech} of a machine is determined by measurement of the shaft torque and speed. The electrical power P_{el} (of the stator in a.c. machines, of the armature in d.c. machines) is measured in the same test.

Input and output power are:

- in motor operation: $P_1 = P_{\text{el}}; P_2 = P_{\text{mech}}$ (see Figure 1);
- in generator operation: $P_1 = P_{\text{mech}}; P_2 = P_{\text{el}}$

NOTE It is generally advisable to take several readings of all instruments at each load-point in short periods of time and average the results to obtain a more accurate test value.

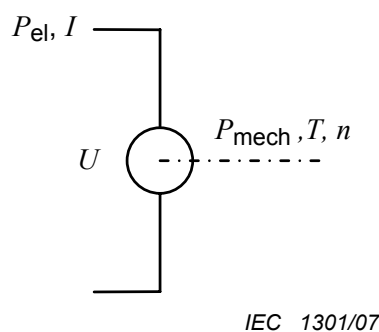


Figure 1 – Sketch for torque measurement test

6.3.1.2 Torquemeter test

Couple either the motor under test to a load machine or the generator under test to a motor with a torque meter. Operate the machine under test at the required load.

Record $U, I, P_{el}, n, T, \theta_c$.

When excitation is required, proceed according to 6.2.

6.3.1.3 Dynamometer test

Couple the test machine to a dynamometer. Calibrate the dynamometer so that the dynamometer reading is 0,0 when the shaft torque is 0,0 (see 5.5.3). Operate the machine at the required load.

Record $U, I, P_{el}, n, T, \theta_c$.

When excitation is required, proceed according to 6.2.

6.3.2 Dual-supply back-to-back test

6.3.2.1 General

Mechanically, couple two identical machines together (see Figure 2).

Tests are made with the power supplies exchanged but with the instruments and instrument transformers remaining with the same machine.

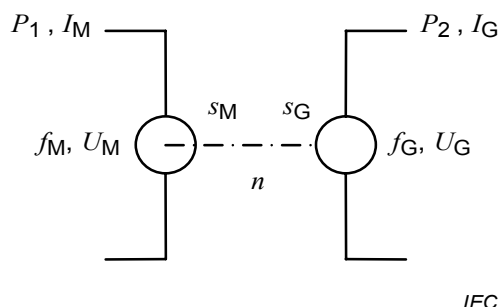


Figure 2 – Sketch for dual supply back-to-back test
(for synchronous machines: $I_M = I_G, f_M = f_G$)

6.3.2.2 Induction machines

Connect the driven machine (induction generator) terminals to either a machine set or a converter with low harmonic distortion, supplying reactive power and absorbing active power. Supply one machine (the motor for motor rating, the generator for generator rating) with rated voltage and frequency; the second one shall be supplied with a frequency lower than that of the first machine for generator operation or higher for motor operation. The voltage of the second machine shall be that required to result in the rated voltage-to-frequency ratio.

Reverse the motor and generator connections and repeat the test.

For each test, record:

- U_M, I_M, P_1, f_M, s_M for the motor;
- U_G, I_G, P_2, f_G, s_G for the generator;
- θ_c .

6.3.2.3 Synchronous machines

The voltage and current of the two machines shall be identical, and one machine (the motor for motor rating, the generator for generator rating) shall have a rated power factor. This can be achieved by a set of synchronous and d.c. machines feeding the generator output back to the line.

NOTE Power factor and excitation current of the other machine will deviate from rated values because of the losses absorbed by the two machines.

Reverse the motor and generator connections and repeat the test.

For each test, record: $U, I, f, P_1, P_2, \cos \varphi_M, \cos \varphi_G, \theta_c$.

For excitation systems proceed according to 6.2.

6.4 Indirect measurements

6.4.1 Total losses

6.4.1.1 Single-supply, back-to-back test

6.4.1.1.1 General

This test is applicable to d.c. wound-rotor induction and synchronous machines. Mechanically couple two identical machines together and connect them both electrically to the same power supply so as to operate at rated speed and rated voltage, one as a motor and the other as a generator.

NOTE Alternatively, the losses can be supplied either by a calibrated driving motor, a booster, or otherwise by a combination of these various means.

6.4.1.1.2 DC machines

Connect the driven machine to the supply with a booster generator in series (see Figure 3). Operate both machines at approximately the current and the internal voltage corresponding to the load point for which the efficiency is required. For motors, the supply shall deliver rated voltage and the required load to the motor. For generators, the voltage has to be adjusted by the booster for rated voltage and the required load at the generator. The voltage supply mainly covers the no-load losses, the booster covers the load losses.

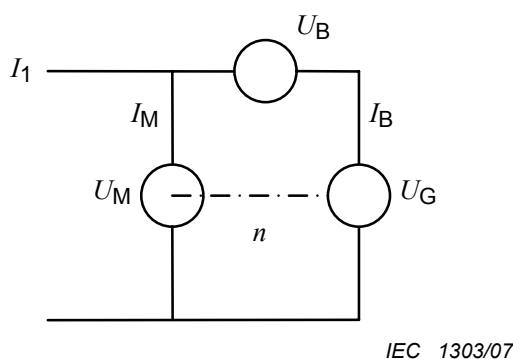


Figure 3 – Sketch for single supply back-to-back test, d.c. machines

If no booster is available, the common terminal voltage should be adjusted so that the mean value of the currents of both machines is the rated current.

For each test, record:

- U_M , I_1 of the power supply;
- P_M absorbed at the motor terminals;
- U_B , I_B of the booster;
- n , θ_C .

For excitation systems, proceed according to 6.2.

6.4.1.1.3 Induction machines with wound rotor

The rotor winding of the motor shall be short-circuited and the rotor winding of the generator shall be connected to a polyphase supply suitable to deliver rated rotor current at slip-frequency. The desired motor-power will be achieved by adjusting frequency and current of the lower frequency power supply.

For each test, record:

- U_1 , P_1 , I_1 of the power-frequency supply;
- U_r , I_r , P_r of the low-frequency supply,
- P_M absorbed at the motor terminals;
- P_G delivered by the generator;
- θ_C .

6.4.1.1.4 Synchronous machines

Mechanically couple the machines with an angular displacement of their rotors enabling one machine to operate at the load conditions for which the efficiency is required, and the other machine to operate at the same absolute value of stator current (see Figure 4).

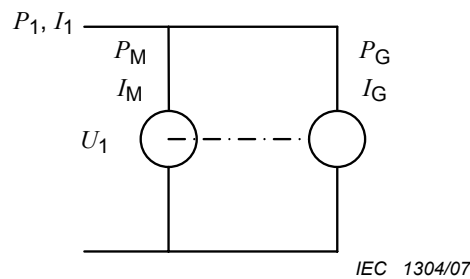


Figure 4 – Sketch for single supply back-to-back test, synchronous machines

NOTE The displacement expressed as electrical angle α for this condition is approximately the double internal electrical angle at the required load condition. In general, for a given voltage the circulating power depends on the angle α and on the excitation currents of the motor and generator. Adjust the current and power factor to rated values at one machine; the deviation in excitation current from the rated value at the other machine can be used for accuracy considerations.

For each test, record:

- U_1, I_1, P_1 of the power-frequency supply;
- I_M, P_M of the motor;
- I_G, P_G of the generator;
- excitation system values according to 6.2;
- θ_c .

6.4.1.2 Zero power factor test (synchronous machines)

Prior to this test, the results of a no-load saturation test, a sustained polyphase short-circuit test and an over-excitation test at zero power factor, in accordance with Clauses 25, 26 and 28 of IEC 60034-4, shall be available.

Operate the machine uncoupled as a motor, at rated speed and over-excited. Adjust the supply voltage to the same electromotive force E and armature current I (at a power factor near zero) as at the desired load.

NOTE 1 E is the vectorial sum of terminal voltage and Potier reactance voltage drop according to Clauses 30 and 31 of IEC 60034-4.

The test shall be made as near as possible to the stabilized operating temperature attained in operation at rated load and at the end of the time specified in the rating. No winding temperature correction shall be made.

NOTE 2 For the above test, it is necessary that the supply voltage is adjustable so that the iron losses have the same value during this test as at a rated power factor under load at rated voltage. If the supply voltage is not adjustable but is equal to the rated voltage, this could give an active iron loss appreciably different from that at full-load. In principle, reactive power should be delivered (i.e. machine over-excited), but when this is impossible due to limited exciter voltage, the test may be made with reactive power absorbed (i.e. machine under-excited) as far as stable running is possible.

The excitation winding losses at the desired load will be obtained from the excitation current estimated according to Clause 31 of IEC 60034-4 (Potier diagram), or Clause 32 (ASA diagram), or Clause 33 (Swedish diagram). For the determination of exciter losses see 6.4.3.3. When E of the zero power-factor test deviates from that at the desired load, the iron loss difference shall be obtained from the iron loss curve (see 6.4.2.3) and the two voltage values of E .

NOTE 3 The accuracy of this method depends on the accuracy of the wattmeters and the instrument transformers at low power factor.

Record at zero power factor:

- U, f, I, P_1 ;
- excitation system values according to 6.2;
- θ_c and θ_w .

6.4.2 Constant losses

6.4.2.1 General

In the case of d.c. or synchronous machines, the machine can be tested running as an uncoupled motor or coupled with a driving machine and operating as a generator (supplied power from torque, measured according to 6.3.1.2 or 6.3.1.3).

6.4.2.2 Conditions for no-load test

The no-load losses shall be stabilized according to the following conditions:

- rated speed and voltage for a d.c. machine (by adjusting the field current);
- rated frequency and voltage for an induction machine;
- rated frequency and voltage for a synchronous machine (by adjusting the excitation current), and unity power factor (minimum current) when running as an uncoupled motor.

NOTE 1 In the case of a d.c. or synchronous machine with shaft driven exciter (see 3.4.3.3 a)), the machine should be separately excited and the exciter disconnected from its supply and from the excitation winding.

The no-load losses are considered stabilized when the no-load power input varies by 3 % or less, when measured at two successive 30 min intervals.

NOTE 2 The no-load losses are also considered stabilized if the no-load test is carried out immediately after the load-test.

6.4.2.3 Friction and windage losses, iron loss

Test at a minimum number of seven values of voltage, including rated voltage, so that:

- four or more values are read approximately equally spaced between 125 % and 60 % of rated voltage;
- three or more values are read approximately equally spaced between 50 % and approximately 20 % of rated voltage, or (for an uncoupled running machine) to a point where the current no longer decreases.

For uncoupled d.c. machines, the speed shall be maintained constant by adjusting the field current.

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

Record at each of the voltage values: U_0 , I_0 , P_0 , R_0 .

where

R_0 is determined by measuring the resistance after the lowest voltage readings.

NOTE 1 For a.c. machines, R_0 is $R_{11,0}$, and for d.c. machines, R_0 is the total resistance of all windings carrying armature current (armature, commutating, compensating winding). Where resistance measurement is impracticable due to very low resistances, calculated values are permissible.

For a coupled machine, P_0 is determined from T and n .

Record excitation system values according to 6.2.

NOTE 2 For large synchronous machines it is recommended to record other values influencing efficiency, for example coolant temperature, gas purity, gas pressure, sliding bearings oil temperature, bearing oil viscosity.

6.4.3 Excitation circuit losses

6.4.3.1 Determination from a load test

Operate the machine at rated load as described in 6.4.4.1 until temperatures have stabilized.

Record excitation system values according to 6.2.

6.4.3.2 Determination without load test

In the case of a synchronous machine, the excitation current I_e shall be determined according to Clause 31 of IEC 60034-4 (Potier diagram), or Clause 32 (ASA diagram), or Clause 33 (Swedish diagram) from a no-load test, a short-circuit test and a zero power factor test, or an armature reactance test without rotor.

Record I_e for each load point.

NOTE In the case of machines for which the above tests cannot be performed, the excitation current value provided by the manufacturer should be used to calculate the winding loss.

6.4.3.3 Exciter losses

Uncouple the exciter from the main machine (if possible), then couple the exciter to:

- a) a torque measuring device to determine the mechanical power input according to 6.3.1;
or
- b) a calibrated driving motor to measure the motor electrical power input.

Connect the exciter (in the case of a synchronous machine excited via slip-rings) to a suitable resistive load. Operate the exciter unexcited and with voltage U_e and current I_e for each of the load points.

Record:

- U_e , I_e , P_{Ed} , n , T_E for each load point (P_{Ed} according to 3.4.3.3);
- $T_{E,0}$ (the torque with the exciter unexcited).

NOTE Alternatively, the exciter may be coupled to a calibrated motor, the electrical input power of which is recorded.

When the exciter cannot be uncoupled from the machine, the exciter losses shall be provided by the manufacturer.

6.4.4 Load losses

6.4.4.1 Rated load temperature test

The machine shall be loaded by suitable means, with supply power according to the machine rating and operated until thermal equilibrium is achieved (gradient of 2 K per hour).

At the end of the rated-load test, record:

- $P_N, I_N, U_N, s, f, \theta_C, \theta_N$;
- $R_N = R$ (the test resistance for rated load according to 5.7.1);
- θ_N (the winding temperature at rated load according to 5.7.2).

In the case of d.c. machines on rectified power, the mean value I_{av} and the r.m.s. value I shall be measured.

NOTE 1 For d.c. machines, R is the total resistance of all windings carrying armature current (armature, commutating, compensating winding, compound winding). Where resistance measurement is impracticable due to very low resistances, calculated values are permissible.

NOTE 2 For d.c. machines, $f = 0$.

For values to be measured to get excitation winding losses and additional losses from a load test see 6.4.3.1 and 6.4.5.3.

6.4.4.2 Load curve test

NOTE 1 This test is primarily applicable for the determination of additional losses in induction motors.

Prior to the start of recording data for this test, the temperature of the windings shall be within 5 K of the temperature θ_N , obtained from a rated load temperature test (see 6.4.4.1).

The machine shall be loaded by suitable means.

Apply the load to the machine at six load points. Four load points should be chosen to be approximately equally spaced between not less than 25 % and up to and including 100 % load. The remaining two approximately equally-spaced load points should be suitably chosen above 100 % load, but not exceeding 150 % load. When loading the machine, start at the highest load value and proceed in descending order to the lowest. These tests shall be performed as quickly as possible to minimize temperature changes in the machine during testing.

In a.c. machines, frequency variation between all points shall be less than 0,1 %. Measure R before the highest and after the lowest load 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 25 % load.

NOTE 2 In a.c. machines, resistances may also be determined by measuring the stator winding temperature 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.

Record for each load point: U, I, P_1, R, n, f, T

where R is according to 5.7.1.

6.4.4.3 Load test at reduced voltage (induction machines)

This is an appropriate method for large machines which cannot be tested at full load. The following are required: a load test with the machine acting as a motor at rated speed, a no-load test at reduced voltage U_{red} , and a no-load test at rated voltage and rated frequency.

Using this method, it is assumed that at reduced voltage, while keeping the speed constant, currents diminish as the voltage and power diminishes as the square of the voltage.

At reduced voltage, record: $U_{red}, I_{red}, P_{1red}, I_{0red}, \cos(\varphi_{0red})$.

At rated voltage, record: $U_N, I_0, \cos(\varphi_0)$.

6.4.4.4 Equivalent circuit method (induction machines)

6.4.4.4.1 General

This method may be applied when a load test is not possible. It is based on the conventional T-model per-phase circuit of an induction machine, including an equivalent iron-loss resistor parallel to the main field reactance (see Figure 5). The rotor side parameters and quantities are referred to the stator side; this is indicated by the presence of an apostrophe ' at the symbols for example $X'_{\sigma r}$.

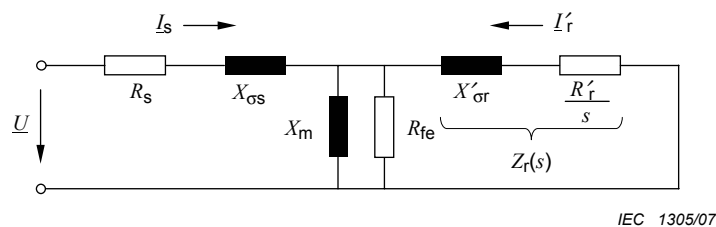


Figure 5 – Induction machine, T-model with equivalent iron loss resistor

Application of the method to cage induction machines requires the following designed values to be available.

- $\frac{X_{\sigma s}}{X'_{\sigma r}}$ ratio of stator leakage to stator referred rotor leakage reactance.
- α_r temperature coefficient of the rotor windings (conductivity referred to 0 °C).
- $X_{\sigma s}, X_m$ stator leakage and magnetizing reactance.

NOTE 1 When using the equivalent circuit method in 6.4.4.4 and 8.2.2.4.3, all voltages, currents and impedances are per phase values for a three-phase machine in Y-connection; powers and reactive powers are per complete machine.

NOTE 2 For copper $\alpha_r = 1/235$ and for aluminium $\alpha_r = 1/225$.

NOTE 3 A method to obtain the model parameters is provided in 8.2.2.4.3.

6.4.4.4.2 Tests at reduced frequency

With the rotor of the machine locked, supply power from a three-phase, adjustable-frequency converter capable of furnishing up to 25 % of the rated frequency at rated current. An average value of impedance shall be obtained from the position of the rotor relative to the stator.

NOTE 1 During the tests the frequency converter, either a machine set or a static converter, should supply practically sinusoidal current at the output.

NOTE 2 The rotor windings of wound-rotor machines should be short-circuited for the test.

Supply rated current and take readings for at least three frequencies, including one at less than 25 % and the others between 25 % and 50 % rated frequency. During this quick test the stator winding temperature increase should not exceed 5 K.

For at least three frequencies, record: U , I , f , P_1 , R_s , θ_c , θ_w .

6.4.4.4.3 Tests at rated frequency

Impedance values can also be determined from the following tests.

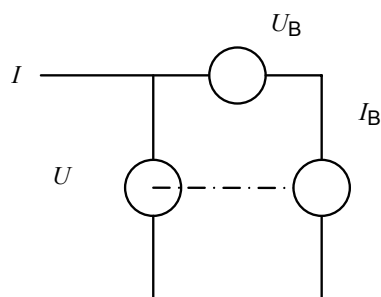
- a) Reactance from a rated frequency, reduced voltage, rated current locked rotor test: record voltage, current, power, frequency and temperatures.
- b) Rotor running resistance:
 - 1) from a stabilized rated frequency, rated voltage reduced load test. Record voltage, power, current, slip and temperatures for the load point; or
 - 2) from an open-circuit test, following a stabilized rated frequency, rated voltage no-load operation. Record the open-circuit voltage and winding temperature as a function of time after the motor is tripped from a no-load test.

NOTE This test assumes relatively low current displacement in the rotor.

6.4.5 Additional load losses

6.4.5.1 Single supply back-to-back-test (d.c. machines)

This method allows the determination of the d.c. component of the additional losses when two identical d.c. machines are available. They shall be coupled and electrically connected together and supplied by a d.c. source, the machine acting as a generator with a booster generator in series (see Figure 6).



IEC 1306/07

Figure 6 – Sketch for single supply back-to-back, additional losses, d.c. machines

If the machines are designed for motoring operation, the supply shall deliver rated voltage and rated current to the machine acting as motor. In the case of machines designed for generating operation, the supply voltage shall be adjusted to rated voltage and rated current at the machine acting as generator. The motor and the generator shall be operated with the flux required to produce the e.m.f. corresponding to the test load.

NOTE The voltage supply mainly covers the no-load losses, the booster mainly covers the load losses.

In the case of machines with shaft driven exciters, the excitation windings shall be separately excited for this test, with the exciters disconnected from their supply and the excitation winding.

When temperatures have stabilized, record: $U, I, U_B, I_B, U_{e,M}, I_{e,M}, U_{e,G}, I_{e,G}, n, \theta_c$.

6.4.5.2 AC losses (converter-fed d.c. machines)

The losses are obtained from a load test with the machine supplied by an appropriate rectifier. See also IEC 60034-19.

Record:

- P_1 the a.c. power supplied to the machine;
- I the a.c. r.m.s. current component; and
- θ_w the temperatures of the windings in galvanic contact with the armature circuit.

NOTE For series-wound motors, a small amount of the a.c. power input contributes to the developed motor torque. This amount is usually so small that it can be neglected.

6.4.5.3 Load test with torque measurement (induction machines)

For the determination of the additional losses, the load test according to 6.4.4.2 shall be performed by additionally providing a torque measurement device fulfilling the requirements of 5.5.4.

For each load point, additionally record the torque: T .

6.4.5.4 Test with rotor removed and reverse rotation test (induction machines)

6.4.5.4.1 General

This is a combined test requiring two individual tests:

- a) with the rotor removed (for the fundamental frequency additional losses);
- b) with the machine rotating at synchronous speed opposite to the magnetic field, driven by external means (for the higher frequencies losses).

During both tests, the stator shall be supplied by a balanced polyphase current of rated frequency for four currents between 25 % and 100 % rated current, and two currents above and of not more than 150 % rated current. Calculate the (rotor) load current I_L :

$$I_L = \sqrt{I^2 - I_0^2}$$

where

I is the value of stator current during the test giving a desired load current;

I_0 is the no-load current at rated voltage.

6.4.5.4.2 Test with the rotor removed

For this test, all parts in which eddy currents might be induced, for example end shields and bearing parts, shall be in place. Apply load current.

For each load current, record (symbols indexed "rm"): $P_{1,rm}$, $I_{L,rm}$, R_{rm} , $\theta_{w,rm}$.

6.4.5.4.3 Reverse-rotation test

For this test, couple a completely assembled machine to a driving motor with an output capability of not less than rated total loss and not more than five times the rated losses of the machine to be tested. When a torquemeter is used for the determination of the shaft power, its maximum torque shall not exceed ten times the torque corresponding to the rated total loss of the machine to be tested. For wound-rotor machines, the rotor terminals shall be short-circuited.

Drive the machine under test at synchronous speed in the direction reverse to the rotation when fed in normal phase sequence:

- without voltage applied to the stator until friction losses are stabilized. Record: $P_{0,rr}$ supplied by the driving machine at $I = 0$;
- with voltage applied to the stator to obtain stator current values equal to those for the test with rotor removed. For all test currents, record (symbols indexed "rr"): $I_{L,rr}$, R_{rr} , $P_{1,rr}$, $\theta_{w,rr}$ for the test motor; $P_{D,rr}$ of the drive motor.

NOTE The low power factor of the tests may require a phase error correction to all wattmeter readings.

6.4.5.5 Eh-star test (induction machines)

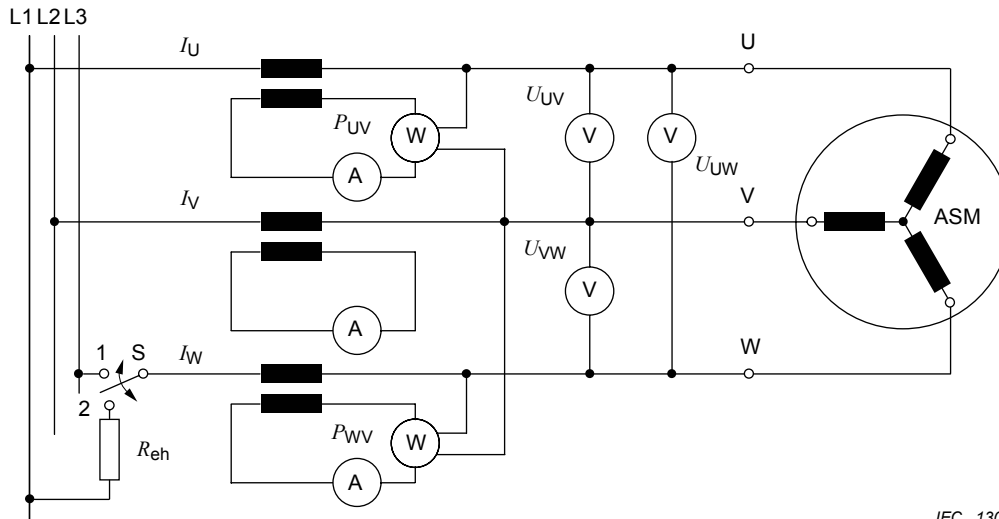
This test requires operating the uncoupled motor with unbalanced voltage supply. The test circuit is according to Figure 7.

Motors rated for and connected in delta-connection shall be reconnected to star-connection during this test. The star-point must not be connected to system neutral or earth, to avoid zero-sequence currents.

The third motor-phase shall be connected to the power-line by means of a resistor R_{eh} (see Figure 7) having approximately the following typical value:

- for motors rated for star-connection:
$$R'_{eh} = \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot I_N} \cdot 0.2$$
- for motors rated for delta-connection:
$$R'_{eh} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_N}{I_N} \cdot 0.2$$

The resistor R_{eh} used during the test shall be adjusted so that the positive sequence current $I_{(1)}$ stays below 30 % of negative sequence current $I_{(2)}$ and the speed stays in the range of typical motor speeds near rated speed (see below). It is recommended to begin the test with an actual resistor R_{eh} that differs no more than 20 % from the typical value R'_{eh} .



IEC 1307/07

Figure 7 – Eh-star test circuit

Test current I_t is given by

- for motors rated for star-connection:
$$I_t = \sqrt{I_N^2 - I_0^2}$$
- for motors rated for delta-connection:
$$I_t = \frac{\sqrt{I_N^2 - I_0^2}}{\sqrt{3}}$$

Test voltage U_t is given by

- for motors rated for star-connection:
$$U_t = U_N$$
- for motors rated for delta-connection:
$$U_t = U_N \cdot \sqrt{3}$$

Prior to the test the no-load losses have to be stabilised according to 6.4.2.2.

Measure and record the resistance between the terminals V and W (R_{VW}) before and after the complete test.

In order to avoid excessive unequal heating of the three phases, the test shall be conducted on a cold machine and carried out as quickly as possible.

Larger motors can only be started without the R_{eh} resistor (switch S to position 1, see Figure 7) at reduced voltage (25 % – 40 % U_N). After run-up connect R_{eh} by switching to position 2.

Smaller motors should start-up with resistor R_{eh} already connected. In this case, the switch is not needed.

Vary the supply voltage for six test points. The test points shall be chosen to be approximately equally spaced between 150 % and 75 % of rated phase current measured in phase V (I_V). When starting the test, begin with the highest current and proceed in descending order to the lowest current.

The line-to-line resistance R_{VV} for 100 % test current and lower currents shall be the value determined after the lowest reading (at the end of the test). The resistance used for currents higher than 100 % shall be determined as being a linear function of current, using the readings before and after the complete test. The test resistance is determined using the extrapolation according to 5.7.1.

Record for each test point: $I_U, I_V, I_W, U_{UV}, U_{VW}, U_{WU}, P_{UV}, P_{WV}, n$

NOTE 1 It is understood that in this test no averaging of phase resistances is permissible.

NOTE 2 Resistances may also be determined by measuring the stator winding temperature 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.

NOTE 3 Some commonly used integrated wattmeters symmetrize the three phases by an internal virtual star connection. However, in this test the power supply is intentionally unsymmetrical. Therefore, it is essential to ensure that neither earthing of the star point nor a virtual star point is established. The provided test circuit (see Figure 7) should be strictly applied.

In order to achieve accurate results the slip shall be not greater than twice the rated slip for all currents, in other words: $n > n_{\text{syn}} - 2 \cdot (n_{\text{syn}} - n_N)$. If this condition cannot be met the test shall be repeated with an increased value of R_{eh} . If the motor still runs unstable at currents below 100 % of rated phase current these test points should be omitted.

6.4.5.6 Short-circuit test and uncoupled motor test (synchronous machines)

6.4.5.6.1 Short-circuit test with coupled machine

Couple the machine under test with its armature winding short-circuited to a drive machine, with provisions to record the torque using a torquemeter (see 6.3.1.2) or dynamometer (see 6.3.1.3). Operate at rated speed and excited so that the current in the short-circuited primary winding is equal to the rated current.

NOTE In the case of a machine with a shaft driven exciter (see 3.4.3.3 a)), the machine should be separately excited and the exciter disconnected from its supply and from the excitation winding.

The sum of the load losses and the additional losses is assumed to be temperature independent, and no correction to a reference temperature is made. It is assumed that the additional losses vary as the square of the stator current.

Record: T, n, I .

Excitation system values are according to 6.2.

6.4.5.6.2 Test with uncoupled machine

The machine is operated as a synchronous motor at a fixed voltage, preferably about 1/3 normal or at the lowest value for which stable operation can be obtained. The armature current is varied by control of the field current. The armature current should be varied in about six steps between 125 % and 25 % of rated current and should include one or two points at very low current. The maximum test current value, traditionally set at 125 %, should be obtained from the manufacturer since sometimes stator cooling will not permit operation in excess of 100 % rated current without damage. The highest readings should be taken first to secure more uniform stator winding temperatures during the test.

Record: P_1, I, U .

Excitation system values are according to 6.2.

NOTE For large machines, the maximum step may be limited to 60 % to 70 % of rated armature current.

7 Determination of efficiency (direct current machines)

7.1 Determination from direct measurement

7.1.1 Torque measurement test

When tested according to 6.3.1, the efficiency is:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1 + P_{1E}}$$

According to 6.3.1.1, input power P_1 and output power P_2 are as follows:

- in motor operation: $P_1 = P_{el}$; $P_2 = P_{mech}$;
- in generator operation: $P_1 = P_{mech}$; $P_2 = P_{el}$

where

P_{el} ; T ; and n are according to 6.3.1.2, 6.3.1.3;

$$P_{mech} = 2\pi \times T \times n$$

P_{1E} is according to 6.2, using 3.4.3.3 and 3.4.3.4.

NOTE Excitation circuit losses not supplied by P_{1E} are mechanically covered from the shaft.

7.1.2 Dual supply back-to-back test

When identical machines are run at essentially the same rated conditions, the efficiency shall be calculated from half the total losses and the average input power of the motor and generator as follows:

$$\eta = 1 - \frac{P_T}{\frac{P_1 + P_2}{2} + P_{1E}}$$

where

$$P_T = \frac{1}{2}(P_1 - P_2) + P_{1E} \quad ; \quad P_{1E} = \frac{1}{2}(P_{1E,M} + P_{1E,G})$$

and

P_1 and P_2 are according to 6.3.2;

P_{1E} is according to 6.2, using 3.4.3.3 and 3.4.3.4.

7.2 Determination from indirect measurement

7.2.1 Total losses

7.2.1.1 Single supply back-to-back test procedure

When identical machines are run at essentially rated conditions, the efficiency is calculated by assigning half the total losses to each machine.

Calculate the efficiency from

$$\eta = 1 - \frac{P_T}{P_M + P_{1E}}$$

where

P_M is the power absorbed at the terminals of the machine acting as the motor (excluding excitation power), according to 6.4.1.1;

P_T is the total losses, defined as half the total absorbed;

P_{1E} is the excitation power supplied by a separate source (for machines with a booster generator see 6.4.1.1.2):

$$P_T = \frac{1}{2}(U_M \times I_1 + U_B \times I_B) + P_{1E} ; \quad P_{1E} = \frac{1}{2}(P_{1E,M} + P_{1E,G})$$

7.2.2 Summation of separate losses

7.2.2.1 Efficiency

The efficiency is determined from

$$\eta = \frac{P_1 + P_{1E} - P_T}{P_1 + P_{1E}} = \frac{P_2}{P_2 + P_T}$$

where

P_1 is the input power excluding excitation power from a separate source;

P_2 is the output power;

P_{1E} is the excitation power supplied by a separate source;

P_T is according to 7.2.2.2.

NOTE 1 Usually, the first expression is preferred for a motor, the second for a generator.

NOTE 2 P_T includes the excitation power P_e (see 6.2) of the machine where applicable.

7.2.2.2 Total losses

The total losses shall be taken as the sum of the separate losses 7.2.2.3 to 7.2.2.6 consisting of

$$P_T = P_k + P_a + P_b + P_{LL} + P_e$$

$$P_e = P_f + P_{Ed}$$

where

P_a is the armature-winding loss;

P_b is the brush loss;

P_k is the constant losses;

P_{LL} is the additional losses;

P_f is the excitation (field winding) loss;

P_{Ed} is the exciter loss.

7.2.2.3 Constant losses

7.2.2.3.1 Determination of constant losses

Determine the constant losses from the following equation:

$$P_k = P_0 - P_a$$

where

$$P_a = I_0^2 \times R_0;$$

I_0 and R_0 are for each value of voltage recorded according to 6.4.2.3.

When resistance measurement is impracticable due to very low resistances, calculated values are permissible, corrected to the expected winding temperature.

NOTE In the armature losses P_a , the following are included: compensating windings, commutating pole windings and shunt resistors (diverters). In the case of diverters in parallel with a series winding, the electrical winding losses may be determined using the total current and the resulting resistance.

7.2.2.3.2 Friction and windage losses (optional)

For each of the values of voltage 50 % or less from 6.4.2.3, develop a curve of constant losses (P_k) from 7.2.2.3.1 against voltage U_0^2 . Extrapolate a straight line to zero voltage. The intercept with the zero voltage axis is the windage and friction losses P_{fw} .

7.2.2.3.3 Iron losses (optional)

For each of the values of voltage between 60 % and 125 % from 6.4.2.3, develop a curve of constant losses (P_k) from 7.2.2.3.1 against voltage U_0 . The iron loss shall be taken for the inner voltage, at:

$$U_0 = U_N - (IR)_a - 2U_b \text{ in the case of a motor}$$

$$U_0 = U_N + (IR)_a + 2U_b \text{ in the case of a generator}$$

where

U_N is the rated voltage;

$2U_b$ is the brush voltage-drop as given in 7.2.2.4.2;

I is the current of the desired load point;

R is the resistance of all windings of the armature circuit at full-load temperature.

Determine the iron loss from

$$P_{fe} = P_k - P_{fw}$$

where

P_{fw} is from 7.2.2.3.2.

7.2.2.4 Load losses

7.2.2.4.1 Armature circuit winding losses

For each load recorded determine the armature-circuit-windings losses:

$$P_a = I^2 \times R$$

where

I and R are according to 5.7.2 and 6.4.4.2, with R taking all windings in the armature circuit into account.

7.2.2.4.2 Electrical brush losses

Determine brush losses using an assigned voltage drop per brush:

$$P_b = 2 \times U_b \times I$$

where

I is the armature current at the rating considered;

U_b is the assumed voltage drop per brush depending on brush type:

1,0 V for carbon, electrographitic or graphite;

0,3 V for metal-carbon.

7.2.2.5 Excitation circuit losses

In the case of a load test according to 6.4.3.1, the excitation winding losses result from the measured voltage and current as follows:

$$P_f = U_e \times I_e$$

Without a load test, the excitation winding losses P_e shall be calculated from $I_e^2 \times R_f$, where R_f is the resistance of the shunt excitation winding (or separately excited winding), corrected to the reference temperature specified in 5.7.3 and I_e is the excitation current according to the following list.

- For shunt connected or separately excited generators with or without commutating poles, I_e is 110 % of the excitation current corresponding to no-load at a voltage equal to the rated voltage plus ohmic drop in the armature circuit (armature, brushes and commutating windings if any, see also 7.2.2.4.1) at the current of the specific load point.
- For compensated shunt or separately excited generators, I_e is the excitation current corresponding to no-load at a voltage equal to the rated voltage plus ohmic drop in the armature circuit at the current of the specific load point.
- For level-compounded generators, I_e is the excitation current for the rated no-load voltage.
- For over-compounded and under-compounded generators, and special types of generator not covered by items a) to c), I_e is subject to agreement.
- For shunt wound motors, I_e is equal to no-load excitation current corresponding to the rated voltage.

The exciter losses P_{Ed} according to 6.4.3.3, if determined from tests, are

$$P_{Ed} = (T_E - T_{E,0}) \times 2 \pi n + P_{1E} - U_e \times I_e$$

where

$T_{E,0}$ is the torque with the exciter unexcited.

In all other cases, calculated losses shall be used.

7.2.2.6 Additional load losses

7.2.2.6.1 DC losses (single supply back-to-back-test)

Determine the additional losses per machine at rated current from the measured values of 6.4.5.1.

$$P_{LL} = \frac{1}{2} (P_1 - \Sigma P_k - \Sigma P_a - P_{con} - 2U_b(I + I_B) - 2I_B U_b)$$

where

$P_1 = U_M \times I_1 + U_B \times I_B$ is the power from supply and booster; see Figure 3,

ΣP_k is the sum of constant losses of both machines from 7.2.2.3;

ΣP_a is the sum of the resistance losses of both armature circuits from 7.2.2.4.1;

P_{con} is the loss in cable connections.

For determination of losses for other load points, apply the factors as described in Table 5.

7.2.2.6.2 AC losses

The additional losses due to the a.c. part of the supply voltage result from:

$$P_{LL} = P_1 - I^2 \times R_a$$

where

R_a is the d.c. resistance of the armature circuit at rated load temperatures;

P_1 and I are according to 6.4.5.2.

7.2.2.6.3 Losses from assigned allowance (d.c. losses) and calculations (a.c. losses)

It is assumed that the d.c. losses vary as the square of the current, and that their total value at maximum rated current is:

- a) for uncompensated machines:
 - 1 % of the rated input power for motors;
 - 1 % of the rated output power for generators;
- b) for compensated machines:
 - 0,5 % of the rated input power for motors;
 - 0,5 % of the rated output power for generators.

For constant speed machines, the rated power is the power with maximum rated current and maximum rated voltage.

For variable speed motors where the speed change is obtained by applied voltage, the rated input power is defined at each speed as being the input power when the maximum rated current is associated with the applied voltage of the particular speed considered.

For variable speed motors where the increase in speed is obtained by weakening the field, the rated input power is defined as being the input power when the rated voltage is associated with the maximum rated current. For variable speed generators where the voltage is maintained constant by varying the field, the rated output power is defined as being the output power, which is available at the terminals at rated voltage and maximum rated current. The allowances for additional losses at the speed corresponding to the full field shall be as specified above under a) and b). The allowances for additional losses at other speeds shall be calculated using the appropriate multiplying factors given in Table 5.

Table 5 – Multiplying factors for different speed ratios

Speed ratio	Factor
1,5:1	1,4
2:1	1,7
3:1	2,5
4:1	3,2

The speed ratio in the first column of Table 5 shall be taken as the ratio of actual speed under consideration to the minimum rated speed for continuous running.

For speed ratios other than those given in Table 5, the appropriate multiplying factors may be obtained by interpolation.

For motors supplied by static power converters, whenever the current ripple factor (see IEC 60034-1) of the armature current exceeds 0,1, the additional losses caused by the a.c. component of the armature current (see 7.2.2.6.2) shall be considered in addition to the losses specified above.

8 Determination of efficiency (induction machines)

8.1 Determination from direct measurement

8.1.1 Torque measurement test

When tested according to 6.3.1, the efficiency is:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

Input power P_1 and output power P_2 are according to 6.3.1.1:

- in motor operation: $P_1 = P_{el}$; $P_2 = P_{mech}$;
- in generator operation: $P_1 = P_{mech}$; $P_2 = P_{el}$

where

P_{el} , T and n are according to 6.3.1.2 and, 6.3.1.3.

$$P_{mech} = 2\pi \times T \times n.$$

8.1.2 Dual supply back-to-back test

When identical machines are run at essentially the same rated conditions, the efficiency shall be calculated from half the total losses and the average input power of the motor and generator as follows:

$$\eta = 1 - \frac{P_T}{\frac{P_1 + P_2}{2}}$$

where

$$P_T = \frac{1}{2}(P_1 - P_2)$$

P_1 and P_2 are according to 6.3.2.

8.2 Determination from indirect measurement

8.2.1 Total losses from single supply back-to-back test

When identical machines are run at essentially rated conditions, the efficiency is calculated by assigning half the total losses to each machine.

Calculate the efficiency from

$$\eta = 1 - \frac{P_T}{P_M}$$

where

P_M is the power absorbed at the terminals of the machine acting as motor according to 6.4.1.1;

P_T is the total losses, defined as half the total absorbed, for wound-rotor induction machines measured according to 6.4.1.1.3 as follows: $P_T = \frac{1}{2}(P_1 + P_2)$

8.2.2 Summation of separate losses

8.2.2.1 Efficiency

The efficiency is determined from

$$\eta = \frac{P_1 - P_T}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_T}$$

NOTE Usually, the first expression is preferred for a motor, the second one for a generator.

where

P_1 is the input power from a rated load test according to 6.4.4.1;

P_2 is the output power;

P_T is according to 8.2.2.2.

8.2.2.2 Total losses

The total losses shall be taken as the sum of 8.2.2.3 (constant losses), 8.2.2.4 (load losses) and 8.2.2.5 (additional load losses):

$$P_T = P_k + P_s + P_r + P_{LL}$$

8.2.2.3 Constant losses

8.2.2.3.1 General

Subtracting the no-load winding losses (at the temperature during the no-load test) from the no-load input power gives the constant losses that are the sum of the friction, windage, and iron losses. Determine the constant losses for each value of voltage recorded in 6.4.2.

$$P_k = P_0 - P_s = P_{fw} + P_{fe}$$

where

$$P_s = 1,5 \times I_0^2 \times R_{l0} \quad (\text{see } 6.4.2.3)$$

8.2.2.3.2 Friction and windage losses

From the no-load loss points determined above, use all those that show no significant saturation effect and develop a curve of constant losses (P_k) against the voltage squared (U_0^2). Extrapolate a straight line to zero voltage. The intercept with the zero voltage axis is the friction and windage losses P_{fw} .

NOTE Windage and friction losses are considered to be independent of load and the same windage and friction value may be used for each of the load points.

8.2.2.3.3 Iron losses

From the values of voltage between 60 % and 125 % of rated voltage, plot a curve of $P_{fe} = P_k - P_{fw}$ against voltage U_0 . The iron losses of the desired load point are taken from the curve at voltage U_r which takes the resistive voltage drop in the primary winding into account:

$$U_r = \sqrt{\left(U - \frac{\sqrt{3}}{2} \times I \times R \cos \varphi \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \times I \times R \sin \varphi \right)^2}$$

where

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3} \times U \times I}; \quad \sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}$$

U , P_1 , I and R are according to 6.4.4.2.

8.2.2.4 Load losses

8.2.2.4.1 From a load test

8.2.2.4.1.1 General

Load losses for determination of rated efficiency shall use the inputs from 6.4.4.1.

Load losses for determination of additional load losses shall use the inputs from 6.4.4.2.

8.2.2.4.1.2 Stator-winding losses and temperature correction

The uncorrected stator-winding losses at each of the load points are:

$$P_s = 1,5 \times I^2 \times R$$

where

I and R are determined in 6.4.4.1.

Corrected stator-winding losses at any load point are determined using the stator winding resistance R_N from the rated load test, corrected to a reference coolant temperature of 25 °C:

$$P_{s,0} = P_s \times k_\theta$$

where

k_θ is according to 5.7.3.

8.2.2.4.1.3 Rotor winding losses and temperature correction

For the uncorrected rotor winding losses for each of the load points use the equation:

$$P_r = (P_1 - P_s - P_{fe}) \times s$$

where

$$s = 1 - \frac{p \times n}{f}$$

P_1 , n and f are according to 6.4.4.1;

P_s is according to 8.2.2.4.1.2;

P_{fe} is according to 8.2.2.3.3.

The corrected rotor winding losses at any load point are determined using the value of slip for each of the points corrected to a reference coolant temperature of 25 °C and using the corrected value of the stator winding losses (see 8.2.2.4.1.2) for each of the points.

$$P_{r,0} = (P_1 - P_{s,0} - P_{fe}) \times s_\theta$$

where

$P_{s,0}$ is according to 8.2.2.4.1.2;

P_{fe} is according to 8.2.2.3.3;

$s_\theta = s \times k_\theta$ is the slip corrected to a reference coolant temperature of 25 °C (see 5.7.3);

k_θ is according to 5.7.3.

8.2.2.4.1.4 Electrical losses in brushes (wound-rotor only)

These losses are included in 8.2.2.4.1.3.

Determine brush loss per phase using an assumed voltage drop per brush as follows:

$$P_b = N \times U_b \times I_2$$

The procedure described in this subclause is based on the method in 6.4.4.4.2. When using the method in 6.4.4.4.3 notice the following deviations:

- a) the reactances are calculated in the same manner as in 8.2.2.4.3.2;
- b) the rotor running resistance is determined:
 - using the test described in 6.4.4.4.3 a)
 - by reverse calculation using the equivalent circuit in Figure 5, assuming a value for R_r' . Adjust the value of R_r' until the calculated power is within 0,1 % of the measured power, or the calculated current is within 0,1 % of the measured current;
 - using the test described in 6.4.4.4.3 b)
 - by determining the time constant from the slope of the plot of the decaying voltage and the time on the open-circuit test. Determine R_r' from the equation:

$$R_r' = \frac{(X_m + X_{\sigma r}')}{2\pi f \tau_0}$$

where

- X_m is the magnetizing reactance;
- $X_{\sigma r}$ is the rotor leakage reactance;
- f is the line frequency;
- τ_0 is the open-circuit time constant.

Correct the value of R_r' to the operating temperature from the test temperature.

Determine the reactive powers

- from the no-load test at rated voltage $U_0 = U_N$ and rated frequency (6.4.2.2)

$$P_{Q,0} = \sqrt{(3U_0 I_0)^2 - P_0^2}$$

- from the locked rotor test at reduced frequency (6.4.4.4.2)

$$P_{Q,lr} = \sqrt{(3U I)^2 - P_1^2}$$

where

- U_0, I_0 and P_0 , are phase voltage, phase current and supplied power from the no-load test at rated terminal voltage;
- U, I and P_1 are phase voltage, phase current and supplied power from the locked rotor impedance test (see 6.4.4.4.3) at the frequencies f of this test.

8.2.2.4.3.2 Equivalent circuit parameters

The equivalent circuit parameters are determined in the following steps.

- Reactances

Calculate the reactances X_m from the no-load test and $X_{\sigma s,lr}$ from the locked-rotor test at 25 % rated frequency:

$$X_m = \frac{3U_0^2}{P_{Q,0} - 3I_0^2 X_{gs}} \times \frac{1}{\left(1 + \frac{X_{gs}}{X_m}\right)^2} \quad X_{s,lr} = \frac{P_{Q,lr}}{3I^2 \left(1 + \frac{X_{gs}}{X'_{\sigma r}} + \frac{X_{gs}}{X_m}\right)} \times \left(\frac{X_{gs}}{X'_{\sigma r}} + \frac{X_{gs}}{X_m}\right)$$

$$X_{gs} = \frac{f_N}{f_{lr}} X_{gs,lr} \quad X'_{\sigma r} = \frac{X_{gs}}{X_{gs} / X'_{\sigma r}}$$

Calculate using designed values as start values (see 6.4.4.4.1):

$$X_{gs}, X_m \text{ and } \frac{X_{gs}}{X'_{\sigma r}}.$$

Recalculate until X_m and X_{gs} deviate less than 0,1 % from the values of the preceding step.

- Iron loss resistance

Determine the resistance per phase equivalent to the iron losses at rated voltage from

$$R_{fe} = \frac{3U_{N,ph}^2}{P_{fe}} \times \frac{1}{\left(1 + \frac{X_{gs}}{X_m}\right)^2}$$

where

P_{fe} is the iron losses according to 8.2.2.3.3 from P_0 at rated voltage.

- Rotor resistance

Determine the uncorrected rotor resistance for each locked rotor impedance test point:

$$R'_{r,lr} = \left(\frac{P_1}{3I^2} - R_s\right) \times \left(1 + \frac{X'_{\sigma r}}{X_m}\right)^2 - \left(\frac{X'_{\sigma r}}{X_{gs}}\right)^2 \times \frac{X_{gs,lr}^2}{R_{fe}}$$

where

R_s is the stator winding resistance per phase at the corresponding temperature θ_w .

NOTE If the rotor winding temperature deviates much from the stator winding temperature the method will become inaccurate.

The rotor resistance corrected to reference temperature (see 5.7.2, and Table 4) is, for each locked rotor impedance test frequency, given by

$$R''_{r,lr} = R'_{r,lr} \times \frac{1 + \alpha_r \theta_{ref}}{1 + \alpha_r \theta_w}$$

Plot a curve of $R''_{r,lr}$ values against frequency f_{lr} . The intercept with $f_{lr} = 0$ results in the stator referred rotor resistance R'_r .

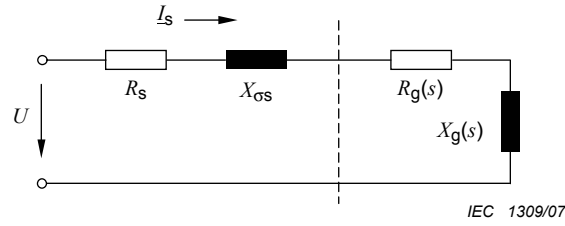


Figure 9 – Induction machines, reduced model for calculation

- Load dependent impedances

For each desired load point intermediate, calculate slip dependent impedance and admittance values (see Figure 9):

$$Z_r = \sqrt{\left(\frac{R_r'}{s}\right)^2 + X_{\sigma r}'^2} \quad Y_g = \sqrt{\left(\frac{R_r'/s}{Z_r^2} + \frac{1}{R_{fe}}\right)^2 + \left(\frac{X_{\sigma r}'}{Z_r^2} + \frac{1}{X_m}\right)^2}$$

$$R_g = \frac{R_r'/s + 1}{Y_g^2} \quad X_g = \frac{X_{\sigma r}' + 1}{Y_g^2}$$

Calculate the resulting impedance seen from the terminals:

$$R = R_s + R_g \quad X = X_{\sigma s} + X_g \quad Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

where

s is the estimated slip;

R_s is the stator winding resistance per phase at reference temperature θ_{ref} .

8.2.2.4.3.3 Currents and losses

The performance values are determined in the following steps.

Determine: $I_s = \frac{U_N}{Z}$ stator phase current; $I_r' = I_s \frac{1}{Y_g Z_r}$ rotor phase current;

$$P_{\delta} = 3I_r'^2 \frac{R_r'}{s} \text{ air gap power transferred to the rotor; } P_{fe} = 3I_s^2 \frac{1}{Y_g^2 R_{fe}} \text{ iron loss}$$

$$P_s = 3I_s^2 R_s; \quad P_r = 3I_r'^2 R_r' \text{ stator and rotor winding loss}$$

$$P_{LL} = P_{LL,N} \left(\frac{I_r'}{I_{r,N}}\right)^2 \text{ additional load losses}$$

from a value $P_{LL,N}$ at rated load, either assigned (8.2.2.5.3) or measured (8.2.2.5.2) or determined according to 8.2.2.5.4.

The total losses are:

$$P_T = P_s + P_{fe} + P_r + P_{LL} + P_{fw}$$

Since input and shaft power are $P_1 = 3I_s^2 R$ and $P_2 = P_1 - P_T$, the slip shall be corrected, and the current and loss calculations shall be repeated until P_2 for motor operation, or P_1 for generator operation, is near enough to the desired value.

The efficiency (motoring operation) results from:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

8.2.2.5 Additional load losses

8.2.2.5.1 From a load test with torque measurement

8.2.2.5.1.1 Residual losses P_{Lr}

The residual losses shall be determined for each load point by subtracting from the input power: the output power, the stator winding losses at the resistance of the test, the iron losses, the windage and friction losses, and the rotor winding losses corresponding to the determined value of slip.

$$P_{Lr} = P_1 - P_2 - P_s - P_r - P_{fe} - P_{fw}; P_2 = 2\pi \times T \times n$$

where

- P_1 , T and n are according to 6.4.4.2;
- P_s is according to 8.2.2.4.1.2;
- P_{fe} is according to 8.2.2.3.3;
- P_{fw} is according to 8.2.2.3.2;
- P_r is according to 8.2.2.4.1.3.

8.2.2.5.1.2 Smoothing of the residual loss data

The residual loss data shall be smoothed by using the linear regression analysis (see Figure 10) based on expressing the losses as a function of the square of the load torque according to the relationship:

$$P_{Lr} = A \times T^2 + B$$

where

T is according to 8.2.2.5.1.1;

A and B are constants determined according to 6.4.4.2 and 8.2.2.5.1.1 from at least six load points using the following equations:

$$A \text{ is the slope according to } A = \frac{i \times \sum((P_{Lr}) \times (T^2)) - \sum P_{Lr} \times \sum T^2}{i \times \sum (T^2)^2 - (\sum T^2)^2}$$

$$B \text{ is the intercept according to } B = \frac{\sum P_{Lr}}{i} - A \times \frac{\sum T^2}{i}$$

i is the number of load points summed.

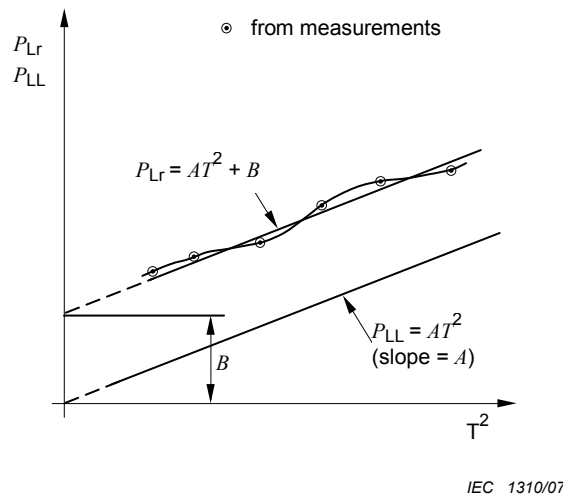


Figure 10 – Smoothing of the residual loss data

The correlation coefficient is according to
$$\gamma = \frac{i \times \sum (P_L \times T^2) - (\sum P_L) \times (\sum T^2)}{\sqrt{(i \times \sum (T^2)^2 - (\sum T^2)^2) \times (i \times \sum P_L^2 - (\sum P_L)^2)}}$$

When the correlation coefficient γ is less than 0,95, delete the worst point and repeat the regression. If γ increases to $\geq 0,95$, use the second regression.; if γ remains less than 0,95, the test is unsatisfactory and errors in the instrumentation or test readings, or both, are indicated. The source of the error should be investigated and corrected, and the test (see 6.4.4.2) should be repeated.

8.2.2.5.1.3 Additional load losses P_{LL}

When the slope constant A is established, a value of additional load losses for each load point shall be determined by using the equation:

$$P_{LL} = A \times T^2$$

where

A and T are according to 8.2.2.5.1.2.

8.2.2.5.2 From a test with rotor removed and a reverse rotation test

Smooth the test values (see 6.4.5.4) of the stator powers $P_{1,rm}$ and $P_{1,rr}$, and the shaft power ($P_{D,rr} - P_{0,rr}$) by applying a regression analysis to the log of powers and currents, resulting in the relationships below:

$$P_{1,rm} = A_{rm} \times I^{N1} + B_{L,rm}; \quad P_{1,rr} = A_{rr} \times I^{N2} + B_{L,rr}; \quad (P_{D,rr} - P_{0,rr}) = A_{D,rr} \times I^{N3} + B_{D,rr}$$

The smoothed powers will then be as follows:

$$P_{1,rm} = A_{rm} \times I^{N1}; \quad P_{1,rr} = A_{rr} \times I^{N2}; \quad (P_{D,rr} - P_{0,rr}) = A_{D,rr} \times I^{N3}$$

If the data are accurate, each curve will show a close square-law relationship between power and current.

The additional load losses are: $P_{LL} = P_{LL,rm} + P_{LL,tr}$ where for each test current:

$P_{LL,rm} = P_{1,rm} - (3 \times I^2 \times R_{s,rm})$ is the fundamental frequency loss

where

$R_{s,rm}$ is the stator phase resistance referred to the average of the temperatures $\theta_{W,rm}$;

$P_{LL,tr} = (P_{D,tr} - P_{0,tr}) - (P_{1,tr} - P_{LL,rm} - (3 \times I^2 \times R_{s,tr}))$ is the higher frequencies loss

where

$R_{s,tr}$ is the stator phase resistance referred to the average of the temperatures $\theta_{W,tr}$.

The additional load loss at a specified operating point can be determined in the following steps.

- a) Calculate an approximate value for the load current I_{NL} corresponding to the rated value of stator line current:

$$I_{NL} = \sqrt{I_N^2 - I_0^2}$$

where

I_N is the rated value of stator line current;

I_0 is the value of no-load stator current.

- b) For the value of load current I_{NL} , calculate a rated value of stray load loss P_{NLL} as follows:

$$P_{NLL} = A_{Dtr} \times I_{NL}^{N3} + 2A_{rm} \times I_{NL}^{N1} - A_{tr} \times I_{NL}^{N2} - 6I_{NL}^2 \times (R_{srm} - 0.5R_{srr})$$

- c) Calculate the value of load current I_L at any operating point:

$$I_L = \sqrt{I^2 - I_0^2}$$

where

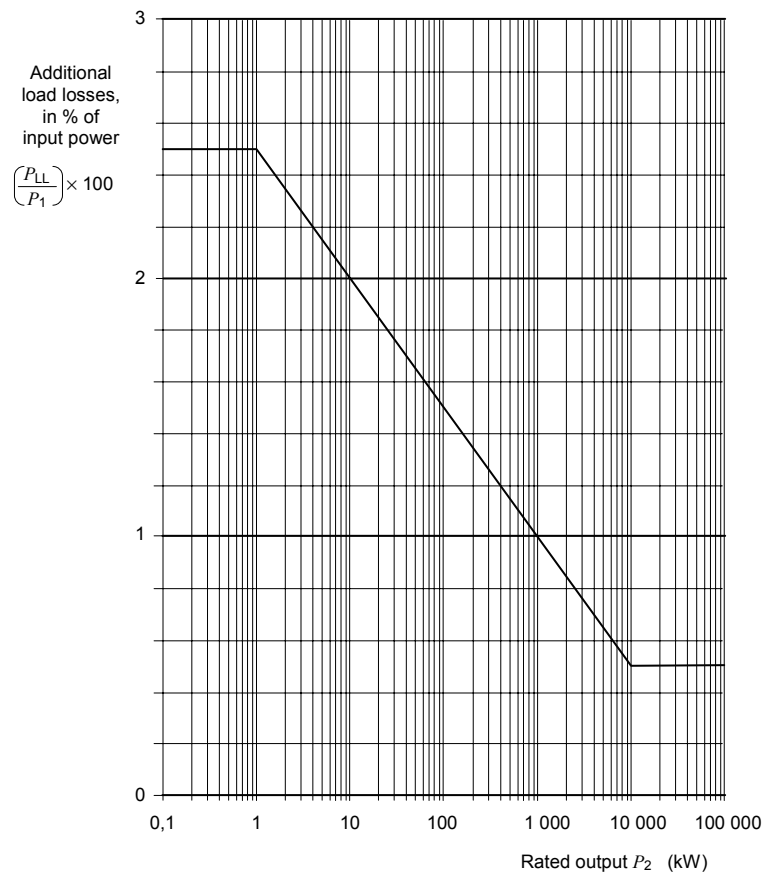
I is the stator line current at the operating point.

- d) Calculate the stray load loss P_{LL} at the operating point:

$$P_{LL} = P_{NLL} \times \left(\frac{I_L}{I_{NL}} \right)^2$$

8.2.2.5.3 From assigned allowance

The value of additional load losses P_{LL} at rated load may be determined as a percentage of input power P_1 using the curve in Figure 11.



IEC 1311/07

Figure 11 – Assigned allowance for additional load losses P_{LL} , induction machines

The values of the curve may be described by the following equations:

$$\text{for } P_2 \leq 1 \text{ kW} \quad P_{LL} = P_1 \times 0,025$$

$$\text{for } 1 \text{ kW} < P_2 < 10\,000 \text{ kW} \quad P_{LL} = P_1 \times \left[0,025 - 0,005 \log_{10} \left(\frac{P_2}{1 \text{ kW}} \right) \right]$$

$$\text{for } P_2 \geq 10\,000 \text{ kW} \quad P_{LL} = P_1 \times 0,005$$

For other than rated loads, it shall be assumed that the additional load losses vary as the square of the primary current minus the square of the no-load current.

NOTE The curve does not represent an average but an upper envelope of a large number of measured values, and may in most cases yield greater additional load losses than 8.2.2.5.1 or 8.2.2.5.2.

8.2.2.5.4 From an Eh-star test

8.2.2.5.4.1 Determination of intermediate values

For each test point according to 6.4.5.5 calculate the values using the equations in Annex B.

8.2.2.5.4.2 Smoothing of the additional-load loss data

The additional-load loss data shall be smoothed by using the linear regression analysis (see Figure 10).

The losses shall be expressed as a function of the square of the negative sequence current $I_{i(2)}$ related to test current I_t according to 6.4.5.5:

$$P_{Lr} = A \cdot \left(\frac{I_{i(2)}}{I_t} \right)^2 + B$$

A and B shall be computed similar to the procedure described in 8.2.2.5.1.2.

When the slope constant A is established, the value of additional load losses for rated load shall be determined by using the equation $P_{LL} = A \times T^2$.

9 Determination of efficiency (synchronous machines)

9.1 Determination from direct measurement

9.1.1 Torque procedure

When tested according to 6.3.1 the efficiency is:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1 + P_{1E}}$$

Input power P_1 and output power P_2 are according to 6.3.1.1:

- in motor operation: $P_1 = P_{el}$; $P_2 = P_{mech}$;
- in generator operation: $P_1 = P_{mech}$; $P_2 = P_{el}$

where

P_{el} , T and n are according to 6.3.1.2 and 6.3.1.3;

$$P_{mech} = 2\pi \times T \times n$$

P_{1E} is according to 6.2, using 3.4.3.3 and 3.4.3.4.

NOTE Excitation circuit losses not supplied by P_{1E} are mechanically covered from the shaft.

9.1.2 Dual supply back-to-back test

When identical machines are run at essentially the same rated conditions, the efficiency shall be calculated from half the total losses and the average input power of the motor and generator as follows:

$$\eta = 1 - \frac{P_T}{\frac{P_1 + P_2}{2} + P_{1E}}$$

where

$$P_T = \frac{1}{2}(P_1 - P_2) + P_{1E}; \quad P_{1E} = \frac{1}{2}(P_{1E,M} + P_{1E,G})$$

P_1 and P_2 are according to 6.3.2;

P_{1E} is according to 6.2 using 3.4.3.4.

9.2 Determination from indirect measurement

9.2.1 Total losses

9.2.1.1 Single supply back-to-back test procedure

When identical machines are run at essentially rated conditions, the efficiency is calculated by assigning half the total losses to each machine.

Calculate the efficiency from

$$\eta = 1 - \frac{P_T}{P_M + P_{1E}}$$

where

P_M is the power absorbed at the terminals of the machine acting as a motor (excluding excitation power) according to 6.4.1.1;

P_T is the total losses, defined as half the total absorbed;

P_{1E} is the excitation power supplied by a separate source, for synchronous machines measured according to 6.4.1.1.4.

$$P_T = \frac{1}{2}P_1 + P_{1E}; \quad P_{1E} = \frac{1}{2}(P_{1E,M} + P_{1E,G})$$

9.2.1.2 Zero power factor procedure

For each desired load point, determine the efficiency with the measured values from 6.4.1.2 as follows:

$$\eta = 1 - \frac{P_T}{P_1 + P_{1E}}$$

where

$P_1 = \sqrt{3} \times U_N \times I \cos \varphi_N$ is the power absorbed at the armature winding terminals in rated operation;

P_T is the total losses, including excitation losses.

The total losses are:

- a) for machines with exciter type c) and d) (see 3.4.3.3):

$$P_T = P_{1,zpf} + \Delta P_{fe} + P_e;$$

P_e shall be determined according to 6.2, applying the following temperature correction for the excitation winding resistance:

$$R_e = R_{e,0} \times \frac{235 + \theta_e}{235 + \theta_0}; \quad \theta_e = 25 + (\theta_w - \theta_c) \left(\frac{I_e}{I_{e,zpf}} \right)^2$$

where

I_e is the excitation winding current determined as described in IEC 60034-4 (see also 6.4.1.2);

$P_{1,zpf}$ is equal to P_1 according to 6.4.1.2;

R_e is the excitation winding resistance, temperature-corrected for the desired load;

$R_{e,0}$ is the cold winding resistance at temperature θ_0 ;

$I_{e,zpf}$ is the excitation winding current from the zero power factor test;

θ_w is the excitation winding temperature of the zpf-test;

θ_c is the reference coolant temperature of the zpf-test;

θ_e is the excitation winding temperature-corrected to I_e ;

ΔP_{fe} is given below.

- b) for machines with exciters type a) and b) (see 3.4.3.3):

P_e, P_{Ed} and P_{1E} are as defined in 6.2 from a test in 6.4.3.3 for the excitation winding current of the desired load, determined according to IEC 60034-4 (see also 6.4.1.2):

$$P_T = P_{1,zpf} + P_{1E,zpf} + \Delta P_{fe} + P_e$$

$$P_e = P_f + P_{Ed} - P_{f,zpf} - P_{Ed,zpf}$$

where

$P_{1,zpf}, P_{f,zpf}$ and $P_{1E,zpf}$ are measured values from the test in 6.4.1.2;

P_f is determined as for separately-excited machines;

$P_{Ed}, P_{Ed,zpf}$ are determined from a test in 6.4.3.3 for I_e, R_e and $I_{e,zpf}, R_{e,zpf}$;

ΔP_{fe} is determined from the iron loss-voltage curve (see 6.4.2.3), and is the difference of the values at voltages equal to the e.m.f. for the desired load and the e.m.f. of the zero power-factor test.

NOTE The equations are expressed for motor operation.

9.2.2 Summation of separate losses

9.2.2.1 Efficiency

The efficiency is determined from:

$$\eta = \frac{P_1 + P_{1E} - P_T}{P_1 + P_{1E}} = \frac{P_2}{P_2 + P_T}$$

where

P_1 is the input power excluding excitation power from a separate source;

P_2 is the output power;

P_{1E} is the excitation power supplied by a separate source;

P_T is according to 9.2.2.2.

NOTE 1 Usually, the first expression is preferred for a motor, the second for a generator.

NOTE 2 P_T includes the excitation power P_e (see 6.2) of the machine where applicable.

9.2.2.2 Total losses

The total losses including excitation circuit losses are:

$$P_T = P_k + P_s + P_{LL} + P_e$$

where

P_k is according to 9.2.2.3;

P_s is according to 9.2.2.5;

P_{LL} is according to 9.2.2.6;

P_e is according to 9.2.2.4.

9.2.2.3 Constant losses

9.2.2.3.1 General

For each value of voltage recorded in 6.4.2.3, determine the constant losses:

$$P_k = P_0 - P_s$$

where

$$P_s = 1,5 \times I_0^2 \times R_{11,0}$$

P_0 , I_0 and $R_{11,0}$ are according to 6.4.2.3.

For machines with brushless exciters, excitation losses shall also be subtracted as follows:

$$P_k = P_0 - P_s - P_{f,0} - P_{Ed} + P_{1E}$$

where

$P_{f,0}$ is the excitation winding losses at no-load;

P_{Ed} is the exciter losses according to 6.4.3.3 corresponding to U_e and I_e of the test point;

P_{1E} is the power according to 6.2 corresponding to U_e and I_e of the test point.

9.2.2.3.2 Friction and windage losses

From the no-load test points (see 6.4.2.3), use all that show no significant saturation effect and develop a curve of constant losses (P_k), against the voltage squared (U_0^2). Extrapolate a straight line to zero voltage. The intercept with the zero voltage axis is the friction and windage losses P_{fw} .

NOTE Windage and friction losses are considered to be independent of load and the same windage and friction values may be used for each of the load points.

9.2.2.3.3 Iron losses

For each of the values of voltage (see 6.4.2.3) develop a curve of constant losses against voltage. Subtract from this value the windage and friction losses to determine the iron losses.

$$P_{fe} = P_k - P_{fw}$$

9.2.2.4 Excitation circuit losses

9.2.2.4.1 General

For each load point, determine the excitation losses:

$$P_e = P_f + P_{Ed} + P_b$$

P_{Ed} and P_f are according to 9.2.2.4.2 and 9.2.2.4.3, respectively.

P_b is according to 9.2.2.4.4 when brushes are used.

9.2.2.4.2 From load test

P_f is the excitation winding loss according to 6.4.3.1.

P_{Ed} is the exciter loss according to 6.4.3.3:

$$P_{Ed} = 2\pi n(T_E - T_{E,0}) + P_{1E} - P_f$$

9.2.2.4.3 Without load test

P_f is the excitation winding loss according to 6.4.3.2.

P_{Ed} is the exciter loss according to 6.4.3.3.

In the case of separately excited synchronous machines, the excitation winding losses P_f is the product of U_e , I_e , diminished by the brush losses P_b according to 9.2.2.4.4.

9.2.2.4.4 Electrical losses in brushes

Determine brush losses from an assigned voltage drop per brush of each of the two polarities:

$$P_b = 2 \times U_b \times I_e$$

where

I_e is according to load test 6.4.3.1 or determined by calculation as in 6.4.3.2;

U_b is the voltage drop per brush of each of the two polarities depending on brush type:

1,0 V for carbon, electrographitic or graphite:

0,3 V for metal-carbon.

9.2.2.5 Load losses

9.2.2.5.1 Determination from a load test

At each of the load points determine the stator-winding losses:

$$P_s = 1,5 \times I^2 \times R_{ll}$$

where

I is according to 6.4.4.1;

R_{ll} is according to 6.4.4.1, corrected to 25 °C primary reference coolant temperature.

9.2.2.5.2 Determination without load test

Determine the stator winding losses:

$$P_s = 1,5 \times I^2 \times R_{ll}$$

where

I is the estimated stator current for the desired load point;

R_{ll} is the measured winding resistance referred to the reference temperature of 5.7.2.

9.2.2.6 Additional load losses P_{LL}

9.2.2.6.1 From test with coupled machine

The additional load losses at rated current result from the absorbed power of the short-circuit test in 6.4.5.6.1 diminished by the friction and windage losses P_{fw} according to 9.2.2.3.2 and the load loss at rated current according to 9.2.2.5.1 or 9.2.2.5.2.

$$P_{LL,N} = 2\pi nT - P_{fw} - P_s$$

In the case of a machine with brushless excitation, the excitation winding and the exciter loss part supplied by the driving machine shall additionally be subtracted:

$$P_{LL,N} = 2\pi nT + P_{IE} - P_{fw} - P_s - P_f - P_{Ed}$$

where

P_f is according to 6.2;

P_{Ed} is the exciter losses according to 6.4.3.3.

For other load points the additional losses result from

$$P_{LL} = P_{LL,N} \times \left(\frac{I}{I_N} \right)^2$$

9.2.2.6.2 From test with uncoupled machine

The additional-load losses shall be determined from the uncoupled test 6.4.5.6.2.

In order to determine additional losses at any armature current, the constant losses P_k according to 9.2.2.3 and load losses P_s according to 9.2.2.5.1 at any armature current shall be subtracted from the power input at each armature current taken in test 6.4.5.6.2.

Annex A (normative)

Correction of dynamometer torque readings

NOTE This correction method also applies if any bearing is interposed between the torque measuring device and the motor shaft.

A.1 Correction from test with motor running at no-load

A.1.1 Dynamometer coupled

Run the motor at rated voltage and frequency, coupled to the dynamometer with the dynamometer de-energized.

Measure and record $P_{d,0}$, $I_{d,0}$, n , $T_{d,0}$ and $R_{d,0}$ or temperature θ (with R derived from the test measurements).

Determine slip (s) and

$$P_d = (I^2 R)_{d,0} = 1,5 \times I_{d,0}^2 \times R_{d,0}$$

A.1.2 Motor uncoupled

Run the motor at rated voltage and frequency, uncoupled from the dynamometer.

Measure and record P_0 , I_0 and R_0 or temperature θ (with R derived from the test measurements).

Determine:

$$P_s = (I^2 R)_0 = 1,5 \times I_0^2 \times R_0$$

A.1.3 Dynamometer correction

Determine dynamometer torque correction T_c in N·m as follows:

$$T_c = \frac{(P_{d,0} - P_d - P_{fe})(1-s) - (P_0 - P_s - P_{fe})}{2\pi n} - T_{d,0}$$

where

n , $P_{d,0}$, P_d , s and $T_{d,0}$ are according to A.1.1;

P_0 and P_s are according to A.1.2;

P_{fe} is according to 8.2.2.3.3.

NOTE In practice, T_d is mostly compensated by calibration of the dynamometer, so that the dynamometer reading is 0,0 when the shaft torque is 0,0.

A.2 Correction from test with uncoupled motor

Uncouple the tested motor; the coupling device shall be coupled with the shaft of the dynamometer. Run the dynamometer as a motor, with external cooling, if any. The dynamometer correction T_c is equal to the measured torque, with speeds n the same as under load at each of the load points.

NOTE This test is not possible with loading devices acting as a mechanical load only, for example eddy current dynamometers.

Annex B (normative)

Calculation of values for the Eh-star method

Determine the following complex voltages and currents from the test results:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{UV} &= U_{UV} \\ U'_{WU} &= \frac{U_{VW}^2 - U_{WU}^2 - U_{UV}^2}{2 \cdot U_{UV}} \\ U''_{WU} &= \sqrt{U_{WU}^2 - U_{WU}^2} \\ U'_{VW} &= -U_{UV} - U'_{WU} \\ U''_{VW} &= -U''_{WU} \\ I'_V &= -\frac{(P_{UV} - P_{VW}) + U_{WU} \cdot I_W}{U_{UV}}\end{aligned}$$

NOTE In the above equation, it is assumed that current I_W is in phase with voltage U_{WU} . In the case where the impedance of the resistor contains a noticeable reactive component, use the following formula

$$I'_V = -\frac{(P_{UV} - P_{VW}) + R_{eh} \cdot I_W^2}{U_{UV}}$$

where R_{eh} is the measured value of the resistive component.

$$\begin{aligned}I''_V &= \sqrt{I_V^2 - I_V^2} \\ k_1 &= \frac{1}{2 \cdot I_V^2} \cdot (I_W^2 - I_U^2 - I_V^2) \\ I'_U &= k_1 \cdot I'_V + \sqrt{\left(k_1^2 - \frac{I_U^2}{I_V^2}\right)(I_V^2 - I_V^2)} \\ I''_U &= \frac{k_1 I_V^2 - I'_U \cdot I'_V}{I_V} \\ I'_W &= -I'_U - I'_V \\ I''_W &= -I''_U - I''_V\end{aligned}$$

Determine the inner line-to-line voltages from the complex line-to-line voltages and currents:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{iUV} &= \underline{U}_{UV} + \frac{R_{VW}}{2} \cdot (\underline{I}_V - \underline{I}_U) \\ \underline{U}_{iVW} &= \underline{U}_{VW} + \frac{R_{VW}}{2} \cdot (\underline{I}_W - \underline{I}_V) \\ \underline{U}_{iWU} &= \underline{U}_{WU} + \frac{R_{VW}}{2} \cdot (\underline{I}_U - \underline{I}_W)\end{aligned}$$

Separate into positive and negative sequence line-to-line components ($\underline{a} = e^{j2\pi/3}$):

$$\underline{U}_{iLL(1)} = \frac{1}{3} \cdot (\underline{U}_{iUV} + \underline{a} \cdot \underline{U}_{iVW} + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{iWU})$$

$$\underline{U}_{iLL(2)} = \frac{1}{3} \cdot (\underline{U}_{iUV} + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{iVW} + \underline{a} \cdot \underline{U}_{iWU})$$

Determine the positive and negative sequence components of the inner phase voltage \underline{U}_i :

$$\underline{U}_{i(1)} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot e^{-j\frac{\pi}{6}} \cdot \underline{U}_{iLL(1)}$$

$$\underline{U}_{i(2)} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot e^{j\frac{\pi}{6}} \cdot \underline{U}_{iLL(2)}$$

Determine the asymmetrical inner phase voltages:

$$\underline{U}_{iU} = \underline{U}_{i(1)} + \underline{U}_{i(2)}$$

$$\underline{U}_{iV} = \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{i(1)} + \underline{a} \cdot \underline{U}_{i(2)}$$

$$\underline{U}_{iW} = \underline{a} \cdot \underline{U}_{i(1)} + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{i(2)}$$

Determine the iron loss resistance:

$$R_{fe} = \frac{U_t^2}{P_{fe}}$$

where

U_t is according to 6.4.5.5

P_{fe} is according to 8.2.2.3.3

$$I_{feU} = \frac{U_{iU}}{R_{fe}}$$

$$I_{feV} = \frac{U_{iV}}{R_{fe}}$$

$$I_{feW} = \frac{U_{iW}}{R_{fe}}$$

Determine the inner phase currents:

$$\underline{I}_{iU} = \underline{I}_U - \underline{I}_{feU}$$

$$\underline{I}_{iV} = \underline{I}_V - \underline{I}_{feV}$$

$$\underline{I}_{iW} = \underline{I}_W - \underline{I}_{feW}$$

Determine the positive and negative sequence components of the inner phase currents:

$$\underline{I}_{i(1)} = \frac{1}{3} \cdot (\underline{I}_{iU} + \underline{a} \cdot \underline{I}_{iV} + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{iW})$$

$$\underline{I}_{i(2)} = \frac{1}{3} \cdot (\underline{I}_{iU} + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{iV} + \underline{a} \cdot \underline{I}_{iW})$$

The absolute values of the positive sequence current $I_{i(1)}$ shall be less than 30 % of the absolute value of the negative sequence current $I_{i(2)}$ in order to achieve accurate results. If this condition is not met, the test shall be repeated by a different value of R_{eh} .

Determine the airgap power:

$$P_{\delta(1)} = 3 \cdot (U'_{i(1)} \cdot I'_{i(1)} + U''_{i(1)} \cdot I''_{i(1)})$$

$$P_{\delta(2)} = 3 \cdot (U'_{i(2)} \cdot I'_{i(2)} + U''_{i(2)} \cdot I''_{i(2)})$$

Determine the additional load losses:

$$P_{Lr} = k \cdot [(1-s) \cdot (P_{\delta(1)} - P_{\delta(2)}) - P_{fw}]$$

$$\text{where } k = \frac{1}{1 + (I_{i(1)} / I_{i(2)})^2}$$

Annex C (informative)

Types of excitation systems

The types of excitation systems considered for determination of the exciter losses are:

a) shaft driven exciter

A d.c. or a.c. exciter machine is driven by the shaft of the main unit, directly or through a gear. When the main unit is a synchronous machine the excitation power is supplied to the excitation winding via slip-ring and brushes.

b) brushless exciter

An a.c. exciter coupled to a synchronous main unit supplies the field winding directly via rotating rectifiers, avoiding slip-rings and brushes. The exciter can be a synchronous generator or an induction machine.

Excitation power of a synchronous exciter is derived either from a directly coupled a.c. pilot exciter with permanent magnet excitation, or from an auxiliary (secondary) winding in the main unit stator slots (same as in e)), or from a static supply.

An induction exciter is connected to a variable a.c. voltage supply.

c) separate rotating exciter

A d.c. or a.c. generator as part of a separate motor generator set supplies the excitation current to the field winding of the main unit.

d) static excitation system (static exciter)

The excitation power is supplied to the field winding of the main unit by a static source such as batteries or a static power converter-fed from a separate source.

e) excitation from auxiliary winding (auxiliary winding exciter)

The excitation power for an a.c. generator is provided by an auxiliary (secondary) winding in the main unit stator slots, utilizing fundamental or harmonic flux, and supplied to the field winding via rectifiers, slip-rings and brushes.

Annex D (normative)

Other test methods

D.1 Purpose

The following test procedures from IEC 60034-2:1972 with its amendment 1:1995 (defining IEC 60034-2A:1974 as Clause 17) and its amendment 2:1996 are not included in the present IEC 60034-2-1:

- Calibrated-machine test
- Retardation test
- Calorimetric method

These methods are considered to be applicable mainly for large machines where the facility cost for other methods is not considered economical. They will be included in IEC 60034-2-2 which is under consideration. This annex makes provisions to retain these methods as normative in the meantime. Following the publication of IEC 60034-2-2 covering the revision of these methods, this annex will be withdrawn.

D.2 Calibrated-machine test

D.2.1 Definition

A test in which the mechanical input or output of an electrical machine is calculated from the electrical output or input of a calibrated machine mechanically coupled to the machine on test.

D.2.2 Method

The machine of which the losses are to be measured is separated from the network. uncoupled from its driving motor if necessary, and driven at its rated speed by a calibrated motor, that is by an electric motor of which the losses have been previously determined with great accuracy, so that it is possible to determine the mechanical power which it furnishes at its shaft, knowing the electric power which it absorbs and its speed of rotation. The mechanical power transmitted by the calibrated motor to the shaft of the machine under test is a measure of the losses of this latter machine for the working conditions under which the test is made. In this method. the machine tested may be on no-load, excited or not excited, with or without brushes or short-circuited, which enables categories of losses to be separated.

As an alternative, the calibrated motor may be replaced by a dynamometer or by any other motor driving the machine under test through an appropriate torsionmeter, which enables the torque transmitted to the machine under test to be known, and hence the mechanical power absorbed by this latter machine.

D.2.3 Determination of efficiency

When the machine is running in accordance with D.2.2 at rated conditions of speed, voltage and current, the efficiency is taken as the ratio of output to input.

The test shall be made as nearly as possible at the temperature attained in operation at the end of the time specified in the rating. No winding temperature correction shall be made.

NOTE Clause D.2 repeats, technically unchanged, 4.4 and 13 of IEC 60034-2:1972; as well as 7.3.2, 9.3.2 and 11.3.2 of IEC 60034-2, amendment 1:1995.

D.3 Retardation method

D.3.1 Definition

A test method in which the losses in a machine are deduced from the rate of deceleration of the machine when only these losses are present.

A retardation method can be used for determining the separate losses of rotating electrical machines.

The methods of determination of losses covered by this clause are basically intended for large synchronous machines, but the principles used can also be applied to other machines (a.c. induction and d.c. machines, exhibiting mainly an appreciable rotational inertia) using the appropriate losses for such machines.

The retardation method is used to determine:

- the sum of the friction loss and windage loss ("mechanical losses") in machines of all types;
- the sum of losses in active iron and additional open-circuit losses in d.c. and synchronous machines;
- the sum of I^2R losses in an operating winding and additional load losses ("short-circuit losses") in synchronous machines.

D.3.2 General

D.3.2.1 Fundamentals

The total of the losses P_t which retard the machine is proportional to the product of the speed to which these losses correspond and the deceleration at this speed:

$$P_t = -Cn \frac{dn}{dt}$$

where

P_t is the total of the losses during the retardation test.

When n is expressed in rev/min and P_t is given in kW, then the retardation constant C is:

$$C = \frac{4\pi^2 J}{60^2 \cdot 10^3} = 10,97 \times 10^{-6} J$$

where

J is the moment of inertia, in kg·m².

The deceleration dn/dt can be obtained either directly, using an accelerometer, or indirectly, by one of the methods given in D.3.2.2, D.3.2.3 and D.3.2.4 below.

D.3.2.2 Method of the chord

This requires the measurement of the time interval ($t_2 - t_1$) during which the speed of the tested machine changes from $n_N \cdot (1 + \delta)$ to $n_N \cdot (1 - \delta)$, see Figure D.1. The ratio of speed interval $2 \delta n_N$ to time interval $t_2 - t_1$ is approximately the deceleration at rated speed:

$$\frac{2\delta n_N}{n_2 - n_1} \approx - \frac{dn}{dt} \Big|_{n = n_N}$$

where

δ is the per unit deviation of rotational speed from rated speed.

The value of δ shall not be greater than 0,1 and may have to be less than this depending on the characteristics of the machine.

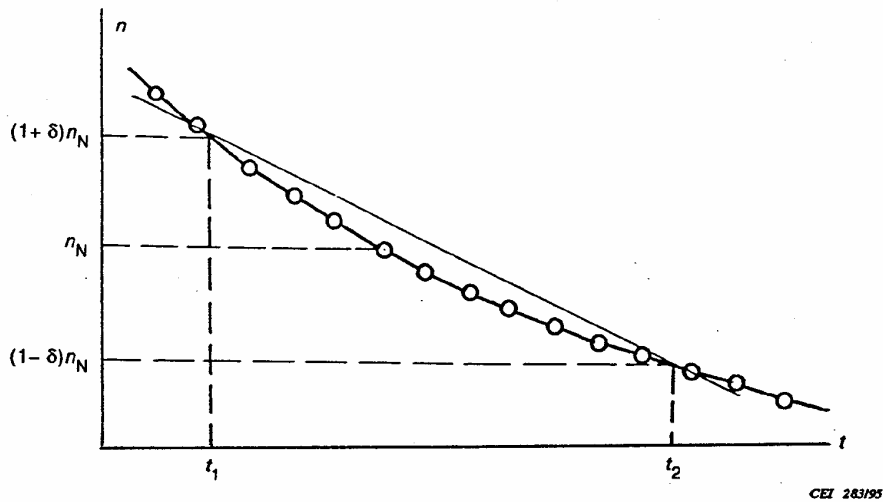


Figure D.1 – Method of the chord

D.3.2.3 Method of the limiting secant

This is a variant of the method of the chord and is intended to be applied in cases when the speed of rotation cannot be increased above the rated value. The instant of time when the speed of rotation is of the rated value n_N is marked as t_1 , and the time instants at which the speed of rotation acquires the values of $n_N \cdot (1 - \delta)$ are marked as t_2 . The deviation δ is successively decreased, and the time derivative of the speed of rotation is the limit of the tangent of the angle made by the line passing through the points t_1 and t_2 with the time axis, as δ approaches zero, see Figure D.2.

$$\lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\delta n_N}{t_2 - t_1} \approx - \left. \frac{dn}{dt} \right|_{n = n_N}$$

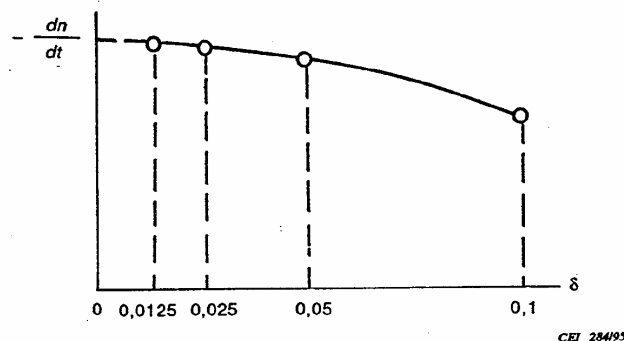


Figure D.2 – Method of the limiting secant

D.3.2.4 Method of the average speed of rotation

If t_1 , t_2 and t_3 represent the successively recorded time readings, the shaft making N complete revolutions within the time interval between any two subsequent readings, then the average values of speed during the time intervals shall be:

$$\bar{n}_{12} = \frac{60 N}{t_2 - t_1} \quad \text{and} \quad \bar{n}_{23} = \frac{60 N}{t_3 - t_2}$$

and the deceleration of the shaft at an intermediate moment of time t_2 is

$$\frac{dn}{dt} = 2 \frac{\bar{n}_{23} - \bar{n}_{12}}{t_3 - t_1}$$

Calculated values of deceleration are plotted against the average values of speed of rotation. The value of deceleration at the rated speed of rotation is determined from the curve.

D.3.3 Composition of retardation tests

D.3.3.1 Composition of tests with known moment of inertia

When the moment of inertia of a machine rotating part is known by measurement or by design, then for a d.c. machine two basic retardation tests are sufficient: the machine running unexcited and the machine running open-circuited, excited at rated voltage at rated speed. For a synchronous machine a third retardation test should be made with the armature winding being short-circuited and the excitation set to give the rated armature current.

The first test gives the mechanical (friction and windage) losses P_{fw} of the tested machine from the formula:

$$P_{fw} = -C n_N \left. \frac{dn}{dt} \right|_1$$

The second test gives the total of mechanical losses P_{fw} and iron losses P_{fe} from the formula:

$$P_{fw} + P_{fe} = -C n_N \left. \frac{dn}{dt} \right|_2$$

The third test gives the sum of mechanical losses P_{fw} and short-circuit losses P_k from the formula:

$$P_{fw} + P_k = -C n_N \left. \frac{dn}{dt} \right|_3$$

In the above equations

$$\left. \frac{dn}{dt} \right|_1, \left. \frac{dn}{dt} \right|_2, \left. \frac{dn}{dt} \right|_3$$

are the values of speed derivative in time in the first, second and third test, respectively.

The iron losses are determined as the difference of the losses measured in the second and first tests.

The sum of the I^2R losses and the additional losses in the armature circuit are determined as the difference of losses measured in the third and first test. Separation of this sum into components, if required, is done by subtracting from it the I^2R losses in the armature circuit calculated from the armature circuit resistance corresponding to the test temperature. For this purpose, the winding temperature shall be deduced by the appropriate method of temperature measurement directly after each retardation test with the armature circuit being short-circuited.

D.3.3.2 Composition of tests with unknown moment of inertia

When the moment of inertia of a machine rotating part is not known, or the machine is coupled mechanically to other rotating parts, for example a turbine, whose inertia is not known, then some additional tests shall be carried out to determine the retardation constant C .

In the instance where there is a possibility to run the tested machine as an unloaded motor from a power supply of the proper voltage, number of phases and frequency (in the case of a.c. machines), and the power supplied to the tested machine can be measured, (equal to the sum of the mechanical losses P_{fw} and iron losses P_{fe} , as the armature circuit I^2R losses are usually ignored), then the retardation constant C is determined from the formula:

$$C = \frac{P_{fw} + P_{fe}}{n_N \left. \frac{dn}{dt} \right|_2}$$

If the measurement of power is difficult because of frequency oscillations of the power supply, then as an alternative the energy supplied to the tested machine may be measured with an integrating meter. For this purpose, it is necessary to run the machine as a motor for some time at constant supply conditions.

In the instance where there is no possibility of running the tested machine as an unloaded motor, then, in addition to the three retardation tests considered in D.3.3.1, one more retardation test shall be conducted. The tested machine in this case is slowed down by any losses P which can be measured and are of the same order as the expected iron losses P_{fe} and short-circuit losses P_k . For this purpose, the open-circuit or short-circuit losses of a connected transformer can be used, which are separately measured. Alternatively, if an exciter or auxiliary generator mounted on the tested machine shaft is available, its load with a ballast resistance may be used.

If the tested machine is slowed down by the transformer open-circuit losses, and the short-circuit losses according to the transformer open-circuit current are ignored, then

$$P_{fw} + P_{fe} + P = -C n_N \left. \frac{dn}{dt} \right|_4 ;$$

hence

$$C = \frac{P}{n_N \left\{ \left. \frac{dn}{dt} \right|_4 - \left. \frac{dn}{dt} \right|_2 \right\}}$$

When the tested machine is slowed down by the transformer short-circuit losses, usually the iron losses corresponding to magnetic flux in the short-circuited transformer are ignored. Hence

$$P_{fw} + P_k + P = -C n_N \left. \frac{dn}{dt} \right|_5 ;$$

and

$$C = \frac{P}{n_N \left\{ \left. \frac{dn}{dt} \right|_5 - \left. \frac{dn}{dt} \right|_3 \right\}}$$

When the tested machine is slowed down by an exciter or auxiliary generator loaded with a ballast resistance, the retardation losses consist only of the tested machine mechanical losses P_{fw} and the measured load P (with allowance for efficiency of the load machine that can be determined by calculations). Hence:

$$P_{fw} + P = -C n_N \left. \frac{dn}{dt} \right|_6 ;$$

so that

$$C = \frac{P}{n_N \left\{ \frac{dn}{dt} \middle| 6 - \frac{dn}{dt} \middle| 1 \right\}}$$

D.3.4 Retardation test procedure

D.3.4.1 State of a tested machine during retardation tests

A tested machine shall be completely assembled as for normal operation. The bearings shall be "run in" prior to the test. The air temperature shall be adjusted wherever possible to the normal temperature at which the windage loss measurement is required by throttling the air coolant flow. The bearing temperatures shall be adjusted to the normal temperature at which the bearings operate with rated load, by adjusting the coolant flow.

D.3.4.2 Tested machine coupled with other mechanisms

When possible, the tested machine shall be uncoupled from other rotating parts. If the machine cannot be uncoupled, all possible steps shall be taken to reduce the mechanical losses in other rotating parts, for example by partial dismantling or in the case of a water turbine, by removing water from the runner chamber. Means shall also be taken to eliminate the possibility of water flowing from the upstream side and from drawing water by the rotating runner from the downstream side. Rotation of the runner in the air produces windage losses which can be stated experimentally or from calculations by agreement between manufacturer and purchaser.

D.3.4.3 Rotation of a tested machine

In some cases, the tested machine can be driven by its normal prime mover, for example by Pelton turbine where the water supply to the runner can be cut off instantly. However, the tested machine is usually running as a motor on no-load, fed from a separate source with a wide range of variable speeds. In all cases, the excitation shall be obtained from a separate source with a rapid and precise voltage control. The excitation from the inherent mechanically-coupled exciter is not recommended in principle, but may be permitted in those cases when the value of the deviation of speed δ is relatively small, for example if it does not exceed 0,05. In all these cases, the losses in exciters coupled to the shaft of the tested machine shall be taken into account.

D.3.4.4 Procedure performed prior to starting the tests

Each test begins with the tested machine being rapidly accelerated to a speed above $n_N \cdot (1 + \delta)$ so that during deceleration to this speed the machine can be placed in the required condition, namely:

- the machine is disconnected from a supply source;
- in the case of retardation by only mechanical loss, the machine field is suppressed;
- in the case of retardation by the sum of the mechanical loss and short-circuit losses, the machine field is suppressed, the armature terminals are short-circuited and the machine is re-excited to the preset short-circuit current;
- in the case of retardation by the transformer losses after field suppression, the tested machine is connected to the transformer previously set to a certain state (at no-load or short-circuited) and excited to the preset values of current or open-circuit voltage;
- in the case of retardation by the exciter load losses or auxiliary generator mounted on the machine shaft, the tested machine field is suppressed and the specified load is set simultaneously.

In all cases described above, a sufficient time delay shall separate the switching off of the supply and starting the measurements to allow electromagnetic transients to decay.

In the case of retardation by the sum of mechanical and iron losses or by the open-circuit losses of a supply transformer, no procedures are required after the machine is disconnected from the supply if the tested machine excitation corresponds to the preset open-circuit voltage, and, in the case of a synchronous machine, at rated speed and unity power factor.

D.3.4.5 Procedures during retardation

The readings of all instruments used for each test (field current ammeter, open-circuit voltage voltmeter, short-circuit current ammeter) and of all instruments required to measure the power in additional retardation tests when the moment of inertia J is not known, shall be taken at the instant when the tested machine passes through rated speed; no readings at this instant are required in the case of an unexcited retardation test.

The measured values of open-circuit voltage or short-circuit current shall not differ from the preset values by more than $\pm 2\%$. The calculated final value of the speed derivative in time for each of the tests shall be adjusted proportionally by the ratio of the square of the preset value to the measured value.

D.3.4.6 Program of retardation tests

The retardation tests shall be conducted as a series without interruption, whenever possible. It is recommended that the series start and finish with some retardation tests of an unexcited machine. If for any reason, the test series is not conducted in a continuous manner, then it is recommended that each subsequent series of tests start and finish with some unexcited retardation tests.

Tests may be either repeated several times at the same preset values of open-circuit voltage or short-circuit current, for example at rated values, or at various values within limits of the order of 95 % to 105 % of the rated values. In the first case, the arithmetic mean values obtained from all measurements are assumed to be the real measured value of each type of loss. In the second case, the values are plotted on a curve as a function of voltage or current. Real measured values are assumed to be those occurring at the points of intersection of the preset values of voltage or current as read from the curves.

Additional retardation tests, when the moment of inertia of the tested machine is not known, shall be conducted at the same values of voltage or current as those obtained with the winding open- or short-circuited. If this is not possible, the respective values shall be determined from curves as indicated above.

D.3.5 Taking of measurements

D.3.5.1 Methods of measurements

The measurements taken during retardation tests are aimed at obtaining the required value of the speed derivative in time and may be performed by one of the three methods:

a) accelerometric - direct measurement of deceleration with time:

$$\frac{dn}{dt} = f(t);$$

b) tachometric - by determining the dependence of speed with time:

$$n = f(t);$$

c) chronographic - by determining the dependence of angular displacement of the tested machine shaft with time:

$$\gamma = f(t).$$

For all cases, recording measuring instruments may be used both with continuous and with discrete recording of measured values and time.

D.3.5.2 Accelerometric method

The dependence of speed on time for large machines having a complex ventilation route may not be regular. As a consequence of this, the instantaneous values of deceleration during retardation at the moment of passing through rated speed may be random. Therefore, true values of the speed derivative may be determined by plotting measured decelerations versus time or speed and using a suitable curve fitting or correlation technique.

D.3.5.3 Tachometric method

A plot of speed versus time is obtained from the results of measurements. On this plot, the time instants are defined at which the speed acquired the values indicated for the chord or limiting secant method. The differences between the times at the lower and upper limits of speed are used to calculate the decelerations.

If there is an exciter or any other electrical machine on the tested machine shaft, it can be used as a tachogenerator, provided that the voltage signal does not pulsate with the speed of rotation of the tested machine. The excitation shall be supplied from a stable d.c. source, such as a separate storage battery.

If the voltage signal does pulsate with the speed of rotation or when there is no such tachogenerator on the tested machine, a coupled d.c. machine may be used. It can be driven from the shaft of the tested machine by a seamless belt or by other means to provide smooth rotation.

Readings of the speed may be made either in the exact time intervals, specified by the respective method, in which case there is no need for special recording of time or of signals from the tested machine shaft; in this case, the readings of time shall be taken concurrently with readings of speed. There is no need to take readings with each turn of the shaft; usually 30 to 40 readings during the whole test are quite sufficient.

With the availability of high-accuracy measuring instruments, the measurement of speed of rotation may be substituted by measurement of the instantaneous values of speed or of the period of the voltage of the tested machine or of any other a.c. machine situated on its shaft; it is not necessary that the number of pole pairs of both machines is equal.

D.3.5.4 Chronographic method

The time-counters used may be either visual indicators with continuous (non-stepwise) motion of the pointer, or digital indicators with printers (electrical or mechanical).

Time readings shall be taken according to the signals obtained from the tested machine shaft either with each complete revolution of the shaft or for a known number of revolutions.

NOTE If when using the tachometric method the speed of rotation is determined by signals from the tested machine shaft, then the time readings may be used both for tachometric and chronographic methods, thus providing a mutual check.

In some cases, when the unit has smooth deceleration characteristics, sufficient accuracy can be obtained by measuring the time for retardation between two speeds with the same difference to the rated speed

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\Delta n}{\Delta t}$$

The stator voltage frequency provides the best means of determining the speed of a synchronous machine.

D.3.5.5 Measurement of losses in bearings

The losses in bearings and thrust bearings can be subtracted from the total sum of the mechanical losses, if required. These may be determined by the calorimetric method in accordance with IEC 60034-2A. If the tested machine uses direct-flow cooling of the bearings,

these losses are distributed between the tested machine and any other coupled to it mechanically, such as turbine, in proportion to the masses of their rotating parts. If there is no direct-flow cooling, the distribution of bearing losses shall be determined from empirical formulae by agreement between manufacturer and purchaser.

NOTE Clause D.3 repeats, technically unchanged, 4.7 of IEC 60034-2:1972, and Clause 15 of IEC 60034-2, amendment 1:1995.

D.4 Calorimetric method

D.4.1 Definition

A test method in which the losses in a machine are deduced from the heat produced by them. The losses are calculated from the product of the amount of coolant and its temperature rise, and the heat dissipated in the surrounding media.

NOTE Subclause D.4.1 repeats 4.8 of IEC 60034-2:1972.

D.4.2 Method

In accordance with IEC 60034-2A 1974 (named Clause 17 in IEC 60034-2, amendment 1 1995).

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	78
INTRODUCTION.....	80
1 Domaine d'application.....	81
2 Références normative.....	81
3 Termes et définitions	82
4 Symboles et termes abrégés.....	87
4.1 Symboles	87
4.2 Indices supplémentaires	88
5 Exigences fondamentales	89
5.1 Détermination directe et indirecte du rendement	89
5.2 Incertitude	89
5.3 Méthodes préférentielles.....	90
5.4 Alimentation électrique	94
5.5 Instrumentation.....	94
5.6 Unités.....	95
5.7 Résistance	95
6 Méthodes d'essais pour la détermination du rendement.....	96
6.1 Etat de la machine en essai et catégories d'essais.....	96
6.2 Mesures du circuit d'excitation	97
6.3 Mesures directes	97
6.4 Mesures indirectes	99
7 Détermination du rendement (machines à courant continu)	111
7.1 Détermination à partir de mesures directes	111
7.2 Détermination à partir de mesures indirectes	111
8 Détermination du rendement (machines à induction)	116
8.1 Détermination à partir de mesures directes	116
8.2 Détermination à partir de mesures indirectes	117
9 Détermination du rendement (machines synchrones)	128
9.1 Détermination à partir de mesures directes	128
9.2 Détermination à partir de mesures indirectes	129
Annexe A (normative) Correction des valeurs lues du couple du dynamomètre	135
Annexe B (normative) Calcul des valeurs pour la méthode Eh-star.....	137
Annexe C (informative) Types de systèmes d'excitation.....	140
Annexe D (normative) Autres méthodes d'essai.....	141

Figure 1 – Schéma pour l'essai de mesure du couple	98
Figure 2 – Schéma pour l'essai en opposition à double alimentation (pour les machines synchrones: $I_M = I_G, f_M = f_G$).....	98
Figure 3 – Schéma pour l'essai en opposition à simple alimentation, machines à courant continu.....	100
Figure 4 – Schéma pour l'essai en opposition à simple alimentation, machines synchrones	101
Figure 5 – Machine à induction, modèle T avec résistance équivalente des pertes dans le fer	105
Figure 6 – Schéma pour l'essai en opposition à simple alimentation, pertes supplémentaires, machines à courant continu.....	106
Figure 7 – Circuit d'essai Eh-star.....	109
Figure 8 – Schéma vectoriel pour obtenir le vecteur courant à partir de l'essai à la tension réduite	120
Figure 9 – Machines à induction, modèle réduit pour le calcul.....	123
Figure 10 – Lissage des valeurs des pertes résiduelles	125
Figure 11 – Valeur allouée assignée pour les pertes supplémentaires en charge P_{LL} , machines à induction	127
Tableau 1 – Machines à courant continu.....	91
Tableau 2 – Machines à induction	92
Tableau 3 – Machines synchrones.....	93
Tableau 4 – Température de référence.....	96
Tableau 5 – Facteurs multiplicateurs pour divers rapports de vitesses	116

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

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)**

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 intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de la CEI se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de la CEI. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que la CEI s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; la CEI ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de la CEI dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de la CEI et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) La CEI n'a prévu aucune procédure de marquage valant indication d'approbation et n'engage pas sa responsabilité pour les équipements déclarés conformes à une de ses Publications.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à la CEI, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de la CEI, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de la CEI ou de toute autre Publication de la CEI, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de la CEI peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 60034-2-1 a été établie par le comité d'études 2 de la CEI: Machines tournantes.

La présente norme annule et remplace la CEI 60034-2 (1972), son amendement 1 (1995) et son amendement 2 (1996). La CEI 60034-2A (1974) est maintenue telle quelle pour le moment.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
2/1443/FDIS	2/1460/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.

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

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 maintenance indiquée sur le site web de la CEI sous "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives à la publication recherchée. A cette date, la publication sera

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

INTRODUCTION

Au cours de l'étape de révision de la CEI 60034-2:1972 et de ses amendements CEI 60034-2 A1:1995 (définissant la CEI 60034-2A:1974 comme l'Article 17) et CEI 60034-2 A2:1996, le GT 28 a décidé avec l'approbation du CE 2 de séparer la norme révisée en trois sections:

- la première partie (CEI 60034-2-1) est destinée à couvrir, dans le domaine d'application de la CEI 60034-1, les machines qui sont en principe soumises aux essais en charge;
- la deuxième partie (CEI 60034-2-2) pour couvrir les essais qui sont principalement applicables aux machines de grande taille pour lesquelles la mise en œuvre d'autres méthodes est onéreuse (en particulier l'essai à la machine étalonnée, l'essai de ralentissement et la méthode calorimétrique);
- la troisième partie (CEI 60034-2-3) pour les essais sur les machines pour l'alimentation par convertisseur.

Pour conserver comme normatives dans la CEI 60034-2-1, les méthodes d'essai qui feront partie, à terme, de la CEI 60034-2-2, une Annexe D temporaire a été ajoutée. La présente annexe contient des éléments de la CEI 60034-2:1972 et son amendement 1:1995. Elle fait aussi référence à la CEI 60034-2A:1974. Elles seront toutes deux intégrées dans la future CEI 60034-2-2.

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)

1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 60034 a pour objet de définir les méthodes de détermination du rendement à partir d'essais et également de spécifier les méthodes permettant de déterminer des pertes spécifiques.

La présente norme s'applique aux machines à courant continu ainsi qu'aux machines à courant alternatif, synchrones et à induction, de toutes dimensions, qui entrent dans le domaine d'application de la CEI 60034-1.

NOTE Ces méthodes peuvent s'appliquer à d'autres types de machines, telles que les commutatrices, les moteurs à collecteurs à courant alternatif et les moteurs à induction monophasés.

2 Références normative

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

CEI 60027-1, *Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique – Partie 1: Généralités*

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

CEI 60034-2A, *Machines électriques tournantes – Deuxième partie: Méthodes pour la détermination des pertes et du rendement des machines électriques tournantes à partir d'essais (à l'exclusion des machines pour véhicules de traction) – Premier complément: Mesure des pertes par la méthode calorimétrique*

CEI 60034-4, *Machines électriques tournantes – Quatrième partie: Méthodes pour la détermination à partir d'essais des grandeurs des machines synchrones*

CEI 60034-19, *Machines électriques tournantes – Partie 19: Méthodes spécifiques d'essai pour machines à courant continu à alimentation conventionnelle ou redressée*

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*

CEI 61986, *Machines électriques tournantes – Charge équivalente et techniques par superposition – Essais indirects pour déterminer l'échauffement*

NOTE Une révision de la CEI 61986 est en cours; elle sera publiée comme CEI 60034-29.

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions donnés dans la CEI 60034-1, la CEI 60051-1 ainsi que les définitions suivantes s'appliquent.

3.1

rendement

rapport de la puissance de sortie à la puissance d'entrée, exprimé dans les mêmes unités, et généralement exprimé en pourcentage

3.2 Essais de détermination directe du rendement

3.2.1

généralités

méthode dans laquelle la détermination directe du rendement est effectuée en mesurant directement la puissance d'entrée et la puissance de sortie

3.2.2

essai au couplemètre

essai dans lequel la puissance de sortie mécanique fournie par une machine fonctionnant en moteur est déterminée par la mesure du couple de l'arbre au moyen d'un couplemètre et par la mesure simultanée de la vitesse de rotation. L'essai peut être également effectué sur une machine fonctionnant en génératrice au moyen d'un couplemètre pour déterminer la puissance d'entrée mécanique

3.2.3

essai au dynamomètre

essai conforme à 3.2.2 mais en mesurant le couple de l'arbre au moyen d'un dynamomètre

3.2.4

essai en opposition à double alimentation

essai dans lequel deux machines identiques sont couplées mécaniquement, les pertes totales des deux machines étant calculées par la différence entre les puissances électriques que l'une absorbe et que l'autre fournit

3.3 Essais de détermination indirecte du rendement

3.3.1

généralités

essai dans lequel la détermination indirecte du rendement est effectuée en mesurant la puissance d'entrée ou la puissance de sortie et en déterminant les pertes totales. Ces pertes sont ajoutées à la puissance de sortie, donnant ainsi la puissance d'entrée, ou soustraites de la puissance d'entrée, donnant ainsi la puissance de sortie

3.3.2

essai en opposition à simple alimentation

essai dans lequel deux machines identiques sont couplées mécaniquement, et connectées toutes deux au même réseau. Les pertes totales des deux machines sont considérées comme la puissance d'entrée fournie par ce réseau

3.3.3

essai à vide

essai dans lequel une machine fonctionne en moteur sans fournir de puissance mécanique utile sur l'arbre, ou dans lequel une machine fonctionne en génératrice avec ses bornes en circuit ouvert

3.3.4**essai à facteur de puissance nul (machines synchrones)**

essai à vide effectué sur une machine synchrone surexcitée et fonctionnant à un facteur de puissance très voisin de zéro

3.3.5**méthode du circuit équivalent (machines à induction)**

essai dans lequel les pertes sont déterminées à l'aide d'un modèle de circuit équivalent

3.3.6**essai avec rotor retiré et essai de rotation inverse (machines à induction)**

essai combiné dans lequel les pertes supplémentaires en charge sont déterminées à partir d'un essai avec rotor retiré et d'un essai avec le rotor opérant dans le sens inverse du champ magnétique tournant

3.3.7**essai de court-circuit (machines synchrones)**

essai dans lequel une machine fonctionne en génératrice avec ses bornes en court-circuit

3.3.8**essai à rotor bloqué**

essai dans lequel le rotor est bloqué pour empêcher toute rotation

3.3.9**essai Eh-star**

essai dans lequel le moteur fonctionne en connexion en étoile sur une tension de déséquilibre

3.4 Pertes**3.4.1****pertes totales P_T**

différence entre la puissance d'entrée et la puissance de sortie, équivalente à la somme des pertes constantes (voir 3.4.2), des pertes en charge (voir 3.4.4), des pertes supplémentaires en charge (voir 3.4.5) et des pertes dans le circuit d'excitation (voir 3.4.3)

3.4.2 Pertes constantes**3.4.2.1****pertes constantes P_k**

somme des pertes dans le fer et des pertes par frottement et par ventilation

3.4.2.2**pertes dans le fer P_{fe}**

pertes dans le fer dans les parties actives et pertes supplémentaires à vide dans les autres parties métalliques

3.4.2.3 Pertes par frottement et par ventilation P_{fw} **3.4.2.3.1****pertes par frottement**

pertes dues au frottement (paliers et balais, sinon relevées à des conditions assignées), à l'exclusion des pertes dans un système de graissage séparé. Il convient que les pertes dans les paliers communs soient indiquées séparément, que ces paliers soient fournis ou non avec la machine. Les pertes dans les paliers sont fondées sur les températures de fonctionnement des paliers, sur le type d'huile et la température de l'huile.

NOTE 1 Si l'on doit indiquer les pertes dans un système de graissage séparé, il convient de les mentionner séparément.

Pour les machines verticales, les pertes dans les paliers de butée doivent être déterminées à l'exclusion de toute poussée externe.

NOTE 2 Les pertes supplémentaires dues à la poussée externe peuvent être indiquées séparément, par accord; il convient alors que cet accord inclut la charge sur la butée, la température des paliers, le type d'huile et aussi la température de l'huile.

NOTE 3 Les pertes par frottement dues à la charge sur la butée peuvent être incluses par accord.

Si la machine en essai utilise un refroidissement à flux direct des paliers, ces pertes sont distribuées entre la machine essayée et toute autre machine couplée à elle mécaniquement, telle qu'une turbine, proportionnellement aux masses de leurs parties tournantes. S'il n'y a pas de refroidissement à flux direct, la distribution des pertes de paliers doit être déterminée par accord, à partir de formules empiriques.

3.4.2.3.2

pertes par ventilation

pertes totales dues au frottement aérodynamique dans toutes les parties de la machine, y compris la puissance absorbée par les ventilateurs montés sur l'arbre et dans les machines auxiliaires faisant partie intégrante de la machine

NOTE 1 Il convient que les pertes dans un système de ventilation séparé soient mentionnées séparément.

NOTE 2 Pour les machines refroidies indirectement ou directement à l'hydrogène, voir la CEI 60034-1.

3.4.3 Pertes dans le circuit d'excitation

3.4.3.1

pertes dans le circuit d'excitation P_e

somme des pertes dans l'enroulement d'excitation (voir 3.4.3.2), des pertes dans l'excitatrice (voir 3.4.3.3) et, pour les machines synchrones, des pertes électriques éventuelles dans les balais (voir 3.4.3.5)

3.4.3.2

pertes dans l'enroulement d'excitation P_f

les pertes dans l'enroulement d'excitation (de champ) sont égales au produit du courant d'excitation I_e par la tension d'excitation U_e

3.4.3.3

pertes dans l'excitatrice P_{Ed}

les pertes dans l'excitatrice pour les différents systèmes d'excitation (voir Annexe C) sont définies comme suit:

a) Excitatrice entraînée par l'arbre

Les pertes dans l'excitatrice sont la puissance absorbée par l'excitatrice sur son arbre (déduction faite des pertes par frottement et par ventilation), à laquelle s'ajoute la puissance P_{1E} fournie par une source séparée au niveau de ses bornes d'enroulement d'excitation, moins la puissance utile fournie par l'excitatrice à ses bornes. La puissance utile aux bornes de l'excitatrice est égale aux pertes dans l'enroulement d'excitation, selon 3.4.3.2, auxquelles s'ajoutent (dans le cas d'une machine synchrone) les pertes électriques dans les balais, selon 3.4.3.5

Si l'excitatrice peut être désaccouplée et essayée séparément, ses pertes peuvent être déterminées conformément à 5.3.

Lorsque l'excitatrice utilise des alimentations auxiliaires séparées, leurs consommations doivent être incluses dans les pertes de l'excitatrice, à moins qu'elles ne soient prises en compte avec la consommation des auxiliaires de la machine principale.

b) Excitatrice sans balai

Les pertes dans l'excitatrice sont la puissance absorbée par l'excitatrice sur son arbre, réduction faite des pertes par frottement et par ventilation (lorsque l'essai correspondant est réalisé sur l'ensemble machine principale-excitatrice), à laquelle s'ajoute la puissance électrique P_{1E} provenant d'une source éventuelle séparée absorbée par son enroulement de champ ou son enroulement du stator (dans le cas d'une excitatrice à induction), moins la puissance utile fournie par l'excitatrice aux bornes du convertisseur tournant de puissance.

Lorsque l'excitatrice utilise des alimentations auxiliaires séparées, leurs consommations doivent être incluses dans les pertes de l'excitatrice, à moins qu'elles ne soient considérées avec la consommation des auxiliaires de la machine principale.

Si l'excitatrice peut être désaccouplée et essayée séparément, ses pertes peuvent être déterminées conformément à 5.3.

c) Excitatrice tournante séparée

Les pertes dans l'excitatrice sont la différence entre la puissance absorbée par le moteur d'entraînement, à laquelle s'ajoute la puissance absorbée par les alimentations auxiliaires séparées, des machines d'entraînement et entraînées, y compris la puissance fournie par une source séparée à leurs bornes d'enroulement d'excitation, et la puissance d'excitation fournie selon 3.4.3.2 et 3.4.3.4. Les pertes dans l'excitatrice peuvent être déterminées conformément à 5.3.

d) Système d'excitation statique (excitatrice statique)

Les pertes dans le système d'excitation sont la différence entre la puissance électrique fournie par sa source de puissance, à laquelle s'ajoute la puissance absorbée par les alimentations auxiliaires séparées, et l'excitation fournie selon 3.4.3.2 et 3.4.3.4.

Dans le cas de systèmes alimentés par des transformateurs, les pertes dans le transformateur doivent être incluses dans les pertes de l'excitatrice.

e) Excitation provenant d'un enroulement auxiliaire (excitatrice à partir d'un enroulement auxiliaire)

Les pertes dans l'excitatrice sont les pertes dans le cuivre dans l'enroulement auxiliaire (secondaire) et les pertes supplémentaires dans le fer produites par l'augmentation des harmoniques de flux. Les pertes supplémentaires dans le fer sont la différence entre les pertes qui se produisent lorsque l'enroulement auxiliaire est chargé et lorsqu'il est déchargé.

Dans la mesure où la séparation de la composante des pertes d'excitation est difficile, il est recommandé de considérer ces pertes comme partie intégrante des pertes dans le stator, lors de la détermination de l'ensemble des pertes.

Dans les cas c) et d), on ne tient pas compte des pertes (éventuelles) de la source d'excitation ou dans les connexions entre la source et les balais (machine synchrone) ou entre la source et les bornes de l'enroulement d'excitation (machine à courant continu).

Si l'excitation est fournie par un système ayant des composants tels que décrits de b) à e), les pertes dans l'excitatrice doivent inclure les pertes correspondantes des composants appartenant aux catégories énumérées en Annexe C si applicables.

3.4.3.4**puissance d'excitation fournie séparément P_{1E}**

la puissance d'excitation P_{1E} fournie par une source de puissance séparée est:

- pour les types d'excitatrices a) et b), la puissance d'excitation dans l'excitatrice (excitatrice à courant continu ou synchrone), ou la puissance d'entrée de l'enroulement du stator (excitatrice à induction). elle couvre une partie des pertes dans l'excitatrice P_{Ed} (et d'autres pertes dans les excitatrices à induction), tandis qu'une plus grande partie de P_e est fournie par l'arbre;

- pour les types d'excitatrices c) et d), elle est égale aux pertes dans le circuit d'excitation, $P_{1E} = P_e$;
- pour le type d'excitatrice e), $P_{1E} = 0$, la puissance d'excitation étant fournie entièrement par l'arbre. $P_{1E} = 0$ également pour les machines avec une excitation magnétique permanente.

Les types d'excitatrices doivent être conformes à 3.4.3.3

3.4.3.5

pertes dans les balais P_b (circuit d'excitation)

pertes électriques dans les balais (y compris les pertes de contact) de machines synchrones à excitation séparée

3.4.4 Pertes en charge

3.4.4.1

pertes en charge P_L

somme des pertes dans l'enroulement (I^2R) (voir 3.4.4.2) et des pertes électriques éventuelles dans les balais (voir 3.4.4.3)

3.4.4.2

pertes dans l'enroulement

les pertes dans l'enroulement sont les pertes I^2R :

- dans le circuit d'induit des machines à courant continu;
- dans les enroulements du stator et du rotor des machines à induction;
- dans les enroulements d'induit des machines synchrones

3.4.4.3

pertes dans les balais P_b (circuits de charge)

pertes électriques dans les balais (y compris les pertes de contact) dans le circuit d'induit des machines à courant continu et dans les machines à induction à rotor bobiné

3.4.5

pertes supplémentaires en charge P_{LL} (pertes parasites en charge)

pertes produites par le courant de charge dans le fer actif et les autres parties métalliques autres que les conducteurs, pertes par courants de Foucault dans les conducteurs d'enroulements, dues aux pulsations de flux dépendant des courants de charge, et pertes supplémentaires dans les balais, dues à la commutation

NOTE Ces pertes ne comprennent pas les pertes supplémentaires à vide de 3.4.2.2.

3.4.6

pertes en court-circuit P_{sc}

pertes dépendant du courant dans une machine synchrone et dans une machine à courant continu, lorsque l'enroulement d'induit est court-circuité

3.5 Grandeurs d'essai (machines à courant alternatif polyphasé)

3.5.1

tension aux bornes

pour les machines à courant alternatif polyphasé, moyenne arithmétique des tensions de ligne

3.5.2

courant de ligne

pour les machines à courant alternatif polyphasé, moyenne arithmétique des courants de ligne

3.5.3**résistance entre lignes**

pour les machines à courant alternatif polyphasé, la moyenne arithmétique de la résistance entre lignes dans chaque ensemble de bornes

NOTE 1 Pour les machines triphasées connectées en Y, la résistance de phase représente 0,5 fois la résistance entre lignes. Pour les machines connectées en Δ , la résistance de phase représente 1,5 fois la résistance entre lignes.

NOTE 2 Les Articles 7, 8 et 9 donnent des explications et des équations pour les machines triphasées, sauf spécification contraire.

4 Symboles et termes abrégés**4.1 Symboles**

$\cos \varphi$	est le facteur de puissance ¹
f	est la fréquence d'alimentation, Hz
I	est le courant moyen de ligne, A
k_{θ}	est le facteur de correction de température
n	est la vitesse de fonctionnement, s ⁻¹
p	est le nombre de paires de pôles
P	est la puissance, W
P_0	est la puissance d'entrée à vide, W
P_1	est la puissance d'entrée, à l'exclusion de l'excitation ² , W
P_2	est la puissance de sortie, W
P_b	est la perte dans les balais, W
P_e	sont les pertes dans le circuit d'excitation, W
P_{1E}	est la puissance d'excitation fournie par une source séparée, W
P_{Ed}	sont les pertes dans l'excitatrice, W
P_{el}	est la puissance électrique, à l'exclusion de l'excitation, W
P_f	sont les pertes dans l'enroulement d'excitation (de champ), W
P_{fe}	sont les pertes dans le fer, W
P_{fw}	sont les pertes par frottement et par ventilation, W
P_C	sont les pertes constantes, W
P_L	sont les pertes en charge, W
P_{Lr}	sont les pertes résiduelles, W
P_{LL}	sont les pertes supplémentaires en charge, W
P_{mech}	est la puissance mécanique, W
P_k	sont les pertes en court-circuit, W
P_T	sont les pertes totales, W
P_w	sont les pertes dans l'enroulement, W, où l'indice w est généralement remplacé par a , f , e , s ou r
R	est une résistance d'enroulement, Ω

¹ Cette définition suppose une tension et un courant sinusoïdaux.

² Sauf spécification contraire, les essais de ce document sont décrits pour le fonctionnement en mode moteur, où P_1 et P_2 sont la puissance d'entrée électrique et la puissance de sortie mécanique, respectivement.

R_{eh}	est la valeur réelle de la résistance auxiliaire utilisée pour l'essai Eh-star (voir 6.4.5.5) Ω
R'_{eh}	est la valeur type de la résistance auxiliaire, Ω
R_f	est la résistance d'enroulement de champ, Ω
R_{ll}	est la résistance moyenne entre lignes, Ω
R_{ph}	est la résistance moyenne de phase, Ω
s	est le glissement, en valeur par unité de vitesse synchrone
T	est le couple de la machine, N·m
T_d	est la valeur lue du dispositif de mesure de couple, N·m
T_c	est la correction du couple, N·m
U	est la tension moyenne aux bornes, V
U_0	est la tension aux bornes à vide, V
U_N	est la tension assignée aux bornes, V
X	est la réactance, Ω
$\underline{Z} = R + j \times X$	est l'indication pour une grandeur complexe (exemple: impédance)
$Z = \underline{Z} = \sqrt{R^2 + X^2}$	est la valeur absolue d'une grandeur complexe (exemple: impédance)
Z	est l'impédance, Ω
η	est le rendement
θ_0	est la température initiale des enroulements, °C
θ_a	est la température ambiante, °C
θ_c	est la température d'entrée du fluide de refroidissement primaire, °C
θ_w	est la température des enroulements, °C
τ	est une constante de temps, s

4.2 Indices supplémentaires

Les indices suivants peuvent être ajoutés aux symboles afin de clarifier la fonction de la machine et de différencier les valeurs.

Composants de la machine:

a	induit (en anglais <i>armature</i>)
e	excitation
f	enroulement de champ (en anglais <i>field winding</i>)
r	rotor
s	stator
w	enroulement (en anglais <i>winding</i>)
U, V, W	désignations de phases

Catégories de machines:

B	survolteur (en anglais <i>booster</i>)
D	dynamomètre
E	excitatrice
G	génératrice
M	moteur

Conditions de fonctionnement

0	à vide
1	entrée
2	sortie
av	moyen, moyenne (en anglais <i>average</i>)
d	dissipé
el	électrique
i	interne
L	charge d'essai (en anglais <i>test load</i>)
lr	rotor bloqué (en anglais <i>locked rotor</i>)
mech	Mécanique (en anglais <i>mechanical</i>)
N	assigné
red	sous tension réduite
t	essai (en anglais <i>test</i>)
zpf	essai au facteur de puissance nul (en anglais <i>zero power factor test</i>)
θ	corrigé pour une température du fluide de refroidissement de référence.

NOTE D'autres indices supplémentaires sont introduits dans les paragraphes correspondants.

5 Exigences fondamentales

5.1 Détermination directe et indirecte du rendement

Les essais peuvent être regroupés dans les trois catégories suivantes:

- mesure de la puissance absorbée et de la puissance utile d'une seule machine. Ceci implique la mesure de la puissance électrique ou mécanique entrant dans une machine, et de la puissance mécanique ou électrique provenant d'une machine;
- mesure d'entrée et de sortie sur deux machines identiques connectées mécaniquement en opposition. Ceci a pour but d'éliminer la mesure de la puissance mécanique absorbée ou fournie par la machine;
- mesure des pertes réelles dans une machine dans des conditions déterminées. Il ne s'agit généralement pas des pertes totales, mais cela comprend certaines composantes de pertes. La méthode peut, cependant, être utilisée pour calculer les pertes totales ou pour calculer une composante de perte.

La détermination des pertes totales doit être effectuée par l'une des méthodes suivantes:

- mesure des pertes totales;
- détermination des pertes séparées pour la sommation;

NOTE Les méthodes de détermination du rendement des machines sont fondées sur un certain nombre d'hypothèses. Il est par conséquent impossible d'effectuer une comparaison entre les valeurs de rendement obtenues par différentes méthodes.

5.2 Incertitude

L'incertitude utilisée dans la présente norme est l'incertitude de détermination d'un rendement réel. Elle reflète les variations dans la procédure d'essai et l'équipement d'essai.

Bien qu'il soit recommandé d'exprimer l'incertitude comme une valeur numérique, une telle exigence nécessite des essais suffisants pour déterminer des valeurs représentatives et comparatives. La présente norme utilise les termes d'incertitude relative suivants:

- “faible” s'applique aux déterminations du rendement fondées totalement sur les résultats d'essais;
- “moyenne” s'applique aux déterminations du rendement fondées sur des approximations limitées;
- “élevée” s'applique aux déterminations du rendement fondées sur des hypothèses.

5.3 Méthodes préférentielles

Il est difficile d'établir des règles spécifiques pour la détermination du rendement. Le choix de l'essai à réaliser dépend des informations requises, de la précision requise, du type et de la taille de la machine impliquée et de l'équipement d'essai disponible en opération (alimentation, charge ou machine d'entraînement).

Les méthodes préférentielles sont données pour chaque configuration de machine aux Tableaux 1 à 3. Il convient de sélectionner la méthode d'essai à partir des procédures qui ont l'incertitude la plus faible.

Tableau 1 – Machines à courant continu

Méthode	Article	Méthode préférentielle	Dispositifs requis	Incertitude
Directe				
Essai à la machine étalonnée	Annexe D		Machine étalonnée	Voir Note 3
Mesure du couple	7.1.1	Taille de la machine: $H \leq 180$	Couplemètre / dynamomètre pour la pleine charge	Faible
Pertes totales				
Essai en opposition à simple alimentation	7.2.1.1		Deux éléments identiques Génératrice de survolteur	Faible
Sommation des pertes, avec essai en charge				
Composante continue des P_{LL} : essai en opposition à simple alimentation	7.2.2.6.1		Deux éléments identiques Génératrice de survolteur	Faible
Composante continue des P_{LL} à partir de la valeur assignée	7.2.2.6.3			Moyenne
Composante alternative des P_{LL} à partir de l'alimentation du redresseur spécifié	7.2.2.6.2	Taille de la machine: $H > 180$	Redresseur spécifié	Faible
Sommation des pertes, sans essai en charge				
Pertes par excitation à partir d'un rapport assigné de courant d'excitation en charge sur le courant d'excitation à vide P_{LL} à partir d'une valeur assignée	7.2.2.5		Si l'équipement d'essai pour les autres essais n'est pas disponible (aucune possibilité de charge, pas de seconde machine)	Elevée
<p>NOTE 1 En raison des imprécisions d'instrumentation, la méthode des essais directs est limitée aux rendements jusqu'à 95 % à 96 %. Pour des raisons pratiques, la présente norme recommande des essais directs pour les machines ayant une hauteur d'arbre jusqu'à 180 mm, étant donné que celles-ci ne sont pas susceptibles de dépasser un rendement de 95 %. Les machines de taille plus importante et avec des rendements inférieurs à 95 % à 96 % peuvent également être essayées avec succès en utilisant la méthode des essais directs.</p> <p>NOTE 2 Dans la colonne " Incertitude ", " Faible " indique une procédure déterminant toutes les composantes de pertes à partir des essais; " Moyenne " indique une procédure qui est basée sur un modèle physique simplifié de machine; " Elevée " indique une procédure qui ne détermine pas toutes les composantes de pertes par des essais.</p> <p>NOTE 3 Incertitude à déterminer.</p>				

Tableau 2 – Machines à induction

Méthode	Article	Méthode préférentielle	Dispositifs requis	Incertitude
Directe				
Mesure du couple	8.1.1	Pour tout ce qui est monophasé et polyphasé ≤ 1 kW	Couplemètre / dynamomètre pour la pleine charge	Faible
Essai à la machine étalonnée	Annexe D		Machine étalonnée	Voir Note 4
Essai en opposition à double alimentation	8.1.2		Ensemble de deux machines identiques pour la pleine charge	Faible
Pertes totales				
Méthode calorimétrique	Annexe D		Enveloppe thermique spéciale	Voir Note 4
Essai en opposition à simple alimentation	8.2.1		Deux machines identiques (rotor bobiné)	Faible
Sommation des pertes, avec et sans essai en charge				
P_{LL} déterminées à partir des pertes résiduelles	8.2.2.5.1	Triphasée > 1 kW jusqu'à 150 kW	Couplemètre / dynamomètre pour $\geq 1,25 \times$ la pleine charge	Faible
P_{LL} à partir d'une valeur assignée	8.2.2.5.3			Moyenne à élevée
P_{LL} à partir de l'essai avec rotor retiré et de l'essai de rotation inverse	8.2.2.5.2		Moteur auxiliaire avec puissance assignée $\leq 5 \times$ pertes totales P_T	Elevée
P_{LL} à partir de l'essai Eh-star	8.2.2.5.4	(voir Note 3)	Résistance pour 150 % du courant de phase assigné	Moyenne
Sommation des pertes, sans essai en charge				
Courants, puissances et glissement à partir de la méthode du circuit équivalent P_{LL} à partir d'une valeur assignée	8.2.2.4.3		Si l'équipement d'essai pour les autres essais n'est pas disponible (aucune possibilité d'appliquer une charge assignée, pas de seconde machine)	Moyenne/élevée
<p>NOTE 1 En raison des imprécisions de mesure, la détermination des P_{LL} à partir des pertes résiduelles est limitée à des coefficients de corrélation (voir 8.2.2.5.1.2) supérieurs à 0,95 et peut avoir des incertitudes du rendement déterminé dépassant $\pm 0,5$ %.</p> <p>NOTE 2 Dans la colonne "Incertitude", "Faible" indique une procédure déterminant toutes les composantes de pertes à partir des essais; "Moyenne" indique une procédure qui est basée sur un modèle physique simplifié de machine; "Elevée" indique une procédure qui ne détermine pas toutes les composantes de pertes par des essais.</p> <p>NOTE 3 La méthode pour les P_{LL} à partir de l'essai Eh-star est adaptée aux moteurs entre 1 kW et 150 kW; des caractéristiques assignées plus importantes sont à l'étude. Cette méthode exige que l'enroulement soit connecté en étoile.</p> <p>NOTE 4 Incertitude à déterminer.</p>				

Tableau 3 – Machines synchrones

Méthode	Article	Méthode préférentielle	Dispositifs requis	Incertitude
Directe				
Mesure du couple	9.1.1	Taille de la machine: $H \leq 180$	Couplemètre/dynamomètre pour la pleine charge	Faible
Essai à la machine étalonnée	Annexe D		Machine étalonnée	Voir Note 3
Essai en opposition à double alimentation	9.1.2		Deux machines identiques	Moyenne
Pertes totales				
Facteur de puissance nul avec courant d'excitation à partir du diagramme de Potier/ASA/suédois	9.2.1.2		Alimentation pour pleine tension et plein courant	Moyenne
Méthode calorimétrique	Annexe D		Enveloppe thermique spéciale	Voir Note 3
Essai en opposition à simple alimentation	9.2.1.1		Deux machines identiques	Faible
Sommation des pertes, avec essai en charge				
Sommation sauf P_{LL}	9.2.1		Ensemble de deux machines pour la pleine charge	Elevée
P_{LL} à partir de l'essai de court-circuit	9.2.2.6	Taille de la machine $H > 180$		Faible
Sommation des pertes, sans essai en charge				
Courant d'excitation à partir du diagramme de Potier/ASA/suédois P_{LL} de l'essai de court-circuit	9.2.2.4 9.2.2.6		Si l'équipement d'essai pour les autres essais n'est pas disponible (aucune possibilité d'appliquer une charge assignée, pas de seconde machine)	Moyenne
NOTE 1 En raison des imprécisions d'instrumentation, la méthode des essais directs est limitée aux rendements jusqu'à 95 % à 96 %. Pour des raisons pratiques, la présente norme recommande des essais directs pour les machines ayant une hauteur d'arbre jusqu'à 180 mm, étant donné que celles-ci ne sont pas susceptibles de dépasser un rendement de 95 %. Les machines de taille plus importante et avec des rendements inférieurs à 95 % à 96 % peuvent également être essayées avec succès en utilisant la méthode des essais directs.				
NOTE 2 Dans la colonne "Incertitude", "Faible" indique une procédure déterminant toutes les composantes de pertes à partir des essais; "Moyenne" indique une procédure qui est fondée sur un modèle physique simplifié de machine; "Elevée" indique une procédure qui ne détermine pas toutes les composantes de pertes par des essais.				
NOTE 3 Incertitude à déterminer.				

NOTE Dans les tableaux, H est la hauteur d'arbre (distance entre la ligne centrale de l'arbre et le plancher de la machine), en millimètres (voir la désignation des carcasses dans la CEI 60072-1).

5.4 Alimentation électrique

5.4.1 Tension

La tension doit être conforme à 7.2 (et 8.3.1 pour les essais thermiques) de la CEI 60034-1.

5.4.2 Fréquence

La fréquence doit être égale à $\pm 0,3 \%$ à la fréquence assignée au cours des mesures.

NOTE La présente exigence ne s'applique pas pour la méthode du circuit équivalent (6.4.4.4).

5.5 Instrumentation

5.5.1 Généralités

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 faible possible.

NOTE Pour les appareils de mesure analogiques, il convient que les valeurs lues se situent dans le tiers supérieur de la gamme de mesure de l'instrument.

5.5.2 Appareils de mesure pour les grandeurs électriques

Les appareils de mesure doivent avoir une classe de précision de 0,2, conformément à la CEI 60051.

NOTE Pour un essai individuel de série tel que celui décrit en 9.1 de la CEI 60034-1, une classe de précision de 0,5 est suffisante.

Sauf spécification contraire dans la présente norme, la moyenne arithmétique des trois courants et tensions de ligne doit être utilisée.

5.5.3 Transformateurs de mesure

Les transformateurs de mesure doivent avoir une précision conforme à la CEI 60044-1, de telle sorte que les erreurs des transformateurs de mesure ne soient pas supérieures à $\pm 0,5 \%$ pour les essais généraux ou pas supérieures à $\pm 0,3 \%$ pour les machines à induction, méthode de sommation des pertes, avec une détermination des pertes supplémentaires en charge conforme à 8.2.2.5.1.

5.5.4 Mesure du couple

Les appareils utilisés pour mesurer le couple doivent avoir une précision de $\pm 0,2 \%$ de la pleine échelle.

Lorsque le couple de l'arbre est mesuré au moyen d'un dynamomètre, un essai de correction du couple doit être effectué. Ceci s'applique également si un palier ou un couplage quelconque est interposé entre le dispositif de mesure du couple et l'arbre du moteur. Le couple de la machine T est calculé à l'aide de l'équation:

$$T = T_d + T_c$$

où

T_d est la valeur lue du couple de l'essai en charge;

T_c est la correction du couple, conformément à Annexe A.

5.5.5 Mesure de la vitesse et de la fréquence

Les appareils utilisés pour mesurer la fréquence doivent avoir une précision de $\pm 0,1\%$ de la pleine échelle. Il convient que la mesure de la vitesse soit précise à $0,1\%$ ou 1 révolution à la minute près selon celle des deux options qui donne l'erreur la plus faible.

NOTE 1 La vitesse en min^{-1} est n en $\text{s}^{-1} \times 60$.

NOTE 2 Il convient que la mesure du glissement par une méthode adaptée remplace la mesure de la vitesse.

5.5.6 Mesure de la température

Les appareils utilisés pour mesurer la température des enroulements doivent avoir une précision de $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$.

5.6 Unités

Sauf spécification contraire, les unités des valeurs sont les unités SI répertoriées dans la CEI 60027-1.

5.7 Résistance

5.7.1 Résistance d'essai

La résistance d'enroulement R est la valeur ohmique, déterminée par des méthodes appropriées.

Pour les machines à courant continu, R est la résistance totale de tous les enroulements parcourus par le courant d'induit (induit, enroulements de commutation, de compensation, enroulement composé). Lorsque la mesure des résistances est irréalisable en raison de résistances très faibles, les valeurs calculées sont admissibles.

Pour les machines à courant continu et les machines synchrones, R_f est la résistance d'enroulement de champ.

Pour les machines à courant alternatif polyphasé, $R = R_{ll}$ est la résistance entre lignes de l'enroulement du stator ou de l'enroulement d'induit, conformément à 3.5.3. Dans le cas de machines à induction à rotor bobiné, $R_{r,ll}$ est la résistance entre lignes du rotor. La résistance d'essai à la fin de l'essai thermique doit être déterminée de la même manière qu'avec la procédure d'extrapolation telle que décrite en 8.6.2.3.3 de la CEI 60034-1, mais en utilisant la durée la plus courte possible au lieu de l'intervalle de temps spécifié au Tableau 5 de la CEI 60034-1 et en extrapolant à zéro.

La température d'essai des enroulements doit être déterminée conformément à 5.7.2.

Lorsque la résistance d'enroulement (sous charge) ne peut pas être mesurée directement, la valeur de la résistance d'essai doit être ajustée en tenant compte de la différence entre la température de la résistance mesurée et la température obtenue selon 5.7.2, méthodes a) à e).

5.7.2 Température des enroulements

La température d'essai des enroulements doit être déterminée par l'une des méthodes suivantes (présentées par ordre de préférence):

- température déterminée à partir de la résistance d'essai en charge assignée R_N par la procédure d'extrapolation décrite en 5.7.1;
- température mesurée directement soit par ETD, soit par thermocouple;
- température déterminée conformément à a) sur une seconde machine de même construction et de même conception électrique;
- lorsque la capacité en charge n'est pas disponible, déterminer la température de fonctionnement conformément à la CEI 61986;

- e) lorsque la résistance d'essai en charge assignée R_N ne peut pas être mesurée directement, la température des enroulements doit être supposée égale à la température de référence de la classe thermique assignée donnée au Tableau 4.

Tableau 4 – Température de référence

Classe thermique du système d'isolation	Température de référence °C
130 (B)	95
155 (F)	115
180 (H)	135

Si l'échauffement assigné ou la température assignée est spécifié(e) à une valeur correspondant à une classe thermique inférieure à la classe du système utilisé dans la construction, alors la température de référence doit être celle de la classe thermique la plus basse.

5.7.3 Correction par rapport à la température du fluide de refroidissement de référence

Les valeurs de résistance d'enroulement enregistrées au cours de l'essai doivent être rapportées à une température de référence normalisée de 25 °C. Le facteur de correction pour ajuster la résistance d'enroulement (et le glissement en cas de machines à induction à cage) par rapport à une température de référence normalisée du fluide de refroidissement de 25 °C doit être déterminé par

$$k_{\theta} = \frac{235 + \theta_w + 25 - \theta_c}{235 + \theta_w}$$

où

k_{θ} est le facteur de correction de température pour les enroulements;

θ_c est la température d'entrée du fluide de refroidissement au cours de l'essai;

θ_w est la température des enroulements, conformément à 5.7.2.

La constante de température 235 est valable pour le cuivre; il convient de la remplacer par 225 pour un enroulement en aluminium.

Pour les machines dont le fluide de refroidissement primaire ou secondaire est l'eau, la température de référence de l'eau doit être de 25 °C, conformément au Tableau 4 de la CEI 60034-1. D'autres valeurs peuvent être spécifiées par accord.

6 Méthodes d'essais pour la détermination du rendement

6.1 Etat de la machine en essai et catégories d'essais

Les essais doivent être effectués sur une machine assemblée avec les composants essentiels en place, afin d'obtenir des conditions d'essais similaires ou très proches des conditions normales de fonctionnement.

NOTE 1 Il est préférable que la machine soit choisie de manière aléatoire à partir d'une production en série, sans considérations particulières.

NOTE 2 Les éléments étanches peuvent être retirés au cours des essais, si un essai supplémentaire sur des machines de conception similaire a montré que le frottement est insignifiant après une durée de fonctionnement suffisamment longue.

Les sous-essais qui constituent une 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 avec retard ou individuellement, alors les conditions thermiques spécifiées doivent être rétablies avant d'obtenir les valeurs d'essais.

Sur les machines à balais réglables, les balais doivent être placés dans la position correspondant au service nominal spécifié. Sur les moteurs à induction avec un rotor bobiné équipé d'un dispositif de relevage des balais, les balais doivent être relevés au cours des essais, avec l'enroulement du rotor court-circuité. Pour les mesures à vide, les balais doivent être placés dans l'axe neutre sur les machines à courant continu.

6.2 Mesures du circuit d'excitation

La détermination de la tension U_e et du courant I_e (voir 3.4.3.2) dépend des configurations du système d'excitation (voir 3.4.3.3). Lorsque cela est applicable, les valeurs d'essais doivent être enregistrées conformément à ce qui suit:

- a) pour les machines entraînées par l'arbre, les excitatrices tournantes séparées, les excitatrices statiques et les excitatrices à enroulement auxiliaire (voir 3.4.3.3 a), c), d) et e)), la tension U_e et le courant I_e sont mesurés:
 - aux bornes de l'enroulement d'excitation des machines à courant continu;
 - aux bagues d'enroulement de champ des machines synchrones;
- b) pour les machines excitées par des excitatrices sans balai (voir 3.4.3.3 b)), les valeurs d'essais doivent être enregistrées par l'une des deux méthodes suivantes:
 - tension U_e mesurée à l'aide de bagues auxiliaires (provisoires) connectées aux extrémités de l'enroulement de champ. A partir de la tension et de la résistance R_e déterminer le courant d'enroulement de champ $I_e = \frac{U_e}{R_e} = \frac{U_f}{R_f}$. La résistance d'enroulement de champ doit être mesurée après l'arrêt de la machine en utilisant la procédure d'extrapolation décrite en 5.7.1;
 - tension U_e et courant I_e mesurés à l'aide de bagues de puissance, adaptées à une mesure directe du courant d'enroulement de champ.

NOTE La différence entre U_e et U_f (chute de tension) est quasiment négligeable en pratique.

Les tensions et les courants doivent être mesurés à des températures stabilisées.

Les pertes dans le circuit d'excitation P_e sont déterminées conformément à 7.2.2.5 (machines à courant continu) ou 9.2.2.4 (machines synchrones).

6.3 Mesures directes

6.3.1 Essais de mesure du couple

6.3.1.1 Généralités

Il s'agit de méthodes d'essais dans lesquelles la puissance mécanique P_{mech} d'une machine est déterminée par la mesure du couple sur l'arbre et de la vitesse. La puissance électrique P_{el} (du stator dans les machines à courant alternatif, de l'induit dans les machines à courant continu) est mesurée pendant le même essai.

Les puissances d'entrée et de sortie sont:

- pour le fonctionnement en mode moteur: $P_1 = P_{\text{el}}; P_2 = P_{\text{mech}}$ (voir Figure 1);
- pour le fonctionnement en mode génératrice: $P_1 = P_{\text{mech}}; P_2 = P_{\text{el}}$

NOTE Il est généralement conseillé de prendre plusieurs lectures de tous les appareils à chaque point de charge pendant de courtes périodes de temps et de moyenner les résultats afin d'obtenir une valeur d'essai plus précise.

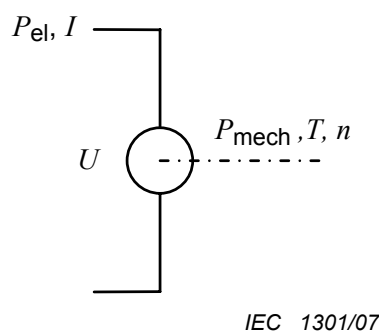


Figure 1 – Schéma pour l’essai de mesure du couple

6.3.1.2 Essai au couplemètre

Coupler soit le moteur en essai à une machine en charge soit la génératrice en essai à un moteur avec un couplemètre. Faire fonctionner la machine en essai à la charge requise.

Enregistrer $U, I, P_{el}, n, T, \theta_c$.

Lorsque l’excitation est requise, procéder conformément à 6.2.

6.3.1.3 Essai au dynamomètre

Coupler la machine en essai à un dynamomètre. Etalonner le dynamomètre de telle sorte que la valeur lue sur le dynamomètre soit 0,0 lorsque le couple de l’arbre est 0,0 (voir 5.5.3). Faire fonctionner la machine à la charge requise.

Enregistrer $U, I, P_{el}, n, T, \theta_c$.

Lorsque l’excitation est requise, procéder conformément à 6.2.

6.3.2 Essai en opposition à double alimentation

6.3.2.1 Généralités

Coupler mécaniquement deux machines identiques ensemble (voir Figure 2).

Les essais sont réalisés avec échange des alimentations, mais avec les appareils et les transformateurs de mesure restant sur la même machine.

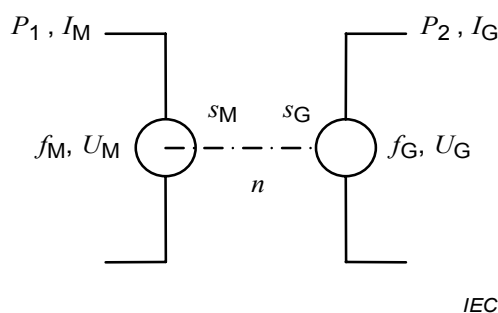


Figure 2 – Schéma pour l’essai en opposition à double alimentation
(pour les machines synchrones: $I_M = I_G, f_M = f_G$)

6.3.2.2 Machines à induction

Connecter les bornes de la machine entraînée (génératrice à induction) à une machine ou à un convertisseur avec distorsion harmonique faible, fournissant la puissance réactive et absorbant la puissance active. Alimenter une machine (le moteur pour les caractéristiques assignées du moteur, la génératrice pour les caractéristiques assignées de la génératrice) avec une tension et une fréquence assignées; la deuxième machine doit être alimentée avec une fréquence inférieure à celle de la première machine pour le fonctionnement en mode génératrice ou supérieure pour le fonctionnement en mode moteur. La tension de la deuxième machine doit être telle que le rapport de la tension assignée sur la fréquence assignée soit correct.

Inverser les connexions du moteur et de la génératrice et répéter l'essai.

Enregistrer pour chaque essai:

- U_M, I_M, P_1, f_M, s_M pour le moteur;
- U_G, I_G, P_2, f_G, s_G pour la génératrice;
- θ_C .

6.3.2.3 Machines synchrones

La tension et le courant des deux machines doivent être identiques, et une machine (le moteur pour les caractéristiques assignées du moteur, la génératrice pour les caractéristiques assignées de la génératrice) doit avoir un facteur de puissance assigné. Ceci peut être obtenu par un ensemble de machine synchrone et de machine à courant continu alimentant la sortie de la génératrice en retour vers la ligne.

NOTE Le facteur de puissance et le courant d'excitation de l'autre machine s'écarteront des valeurs assignées en raison des pertes absorbées par les deux machines.

Inverser les connexions du moteur et de la génératrice et répéter l'essai.

Enregistrer pour chaque essai: $U, I, f, P_1, P_2, \cos \varphi_M, \cos \varphi_G, \theta_C$.

Pour les systèmes d'excitation, procéder conformément à 6.2.

6.4 Mesures indirectes

6.4.1 Pertes totales

6.4.1.1 Essai en opposition à simple alimentation

6.4.1.1.1 Généralités

Cet essai s'applique aux machines à courant continu, aux machines à induction à rotor bobiné et aux machines synchrones. Coupler mécaniquement deux machines identiques ensemble, et les connecter toutes les deux électriquement à la même alimentation électrique, de façon qu'elles fonctionnent à la vitesse assignée et à la tension assignée, l'une comme moteur et l'autre comme génératrice.

NOTE En variante, les pertes peuvent être fournies par un moteur d'entraînement étalonné, par un survolteur, ou encore par une combinaison de ces divers moyens.

6.4.1.1.2 Machines à courant continu

Connecter la machine entraînée à l'alimentation avec une génératrice de survolteur en série (voir Figure 3). Faire fonctionner les deux machines environ au courant et à la tension interne correspondant au point de charge pour lequel le rendement est requis. Pour les moteurs, l'alimentation doit fournir la tension assignée et la charge requise au moteur. Pour les générateurs, la tension doit être ajustée par le survolteur pour la tension assignée et la charge requise au niveau de la génératrice. L'alimentation en tension couvre principalement les pertes à vide, le survolteur couvre les pertes en charge.

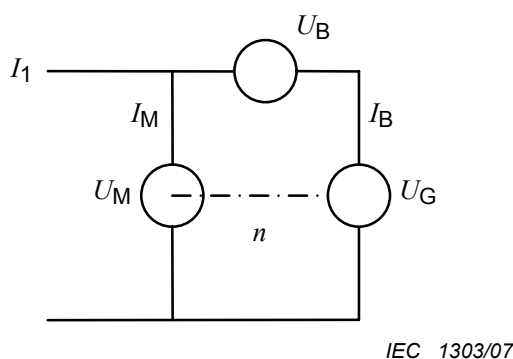


Figure 3 – Schéma pour l’essai en opposition à simple alimentation, machines à courant continu

Si aucun survolteur n’est disponible, il convient que la tension commune aux bornes soit ajustée de telle sorte que la valeur moyenne des courants des deux machines soit le courant assigné.

Enregistrer pour chaque essai:

- U_M , I_1 de l’alimentation électrique;
- P_M absorbées aux bornes du moteur;
- U_B , I_B du survolteur;
- n , θ_c .

Pour les systèmes d’excitation, procéder conformément à 6.2.

6.4.1.1.3 Machines à induction avec rotor bobiné

L’enroulement du rotor du moteur doit être court-circuité et l’enroulement du rotor de la génératrice doit être connecté à une alimentation polyphasée appropriée pour fournir le courant du rotor assigné à la fréquence de glissement. La puissance souhaitée du moteur sera obtenue en ajustant la fréquence et le courant de l’alimentation électrique à la fréquence la plus basse.

Enregistrer pour chaque essai:

- U_1 , P_1 , I_1 de l’alimentation à fréquence industrielle;
- U_r , I_r , P_r de l’alimentation basse fréquence;
- P_M absorbées aux bornes du moteur;
- P_G fournies par la génératrice;
- θ_c .

6.4.1.1.4 Machines synchrones

Coupler mécaniquement les machines avec un déplacement angulaire de leurs rotors, permettant à une machine de fonctionner aux conditions de charge pour lesquelles le rendement est requis, et à l’autre machine de fonctionner à la même valeur absolue du courant du stator (voir Figure 4).

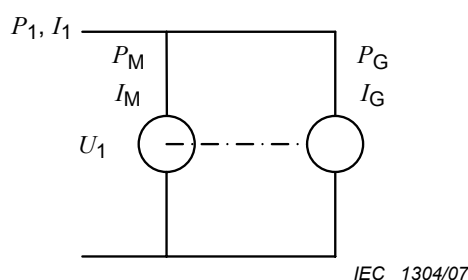


Figure 4 – Schéma pour l'essai en opposition à simple alimentation, machines synchrones

NOTE Le déplacement exprimé comme l'angle électrique α pour cette condition est approximativement le double de l'angle électrique interne à la condition de charge requise. En général, pour une tension donnée, la puissance de circulation dépend de l'angle α et des courants d'excitation du moteur et de la génératrice. Ajuster le courant et le facteur de puissance aux valeurs assignées sur une machine; l'écart du courant d'excitation par rapport à la valeur assignée sur l'autre machine peut être utilisé pour des considérations de précision.

Enregistrer pour chaque essai:

- U_1, I_1, P_1 de l'alimentation à fréquence industrielle;
- I_M, P_M du moteur;
- I_G, P_G de la génératrice;
- valeurs du système d'excitation conformément à 6.2;
- θ_c .

6.4.1.2 Essai à facteur de puissance nul (machines synchrones)

Avant cet essai, les résultats d'un essai de saturation à vide, d'un essai de court-circuit polyphasé maintenu et d'un essai de surexcitation au facteur de puissance nul, conformément aux Articles 25, 26 et 28 de la CEI 60034-4, doivent être disponibles.

Faire fonctionner la machine désaccouplée comme un moteur, à la vitesse assignée et en fonctionnement surexcité. Ajuster la tension d'alimentation à la même force électromotrice E et au même courant d'induit I (à un facteur de puissance proche de zéro) qu'à la charge souhaitée.

NOTE 1 E est la somme vectorielle de la tension aux bornes et de la chute de tension de réactance de Potier, conformément aux Articles 30 et 31 de la CEI 60034-4.

L'essai doit être réalisé aussi près que possible de la température de fonctionnement stabilisée atteinte en fonctionnement à la charge assignée et à la fin de la durée spécifiée dans les caractéristiques assignées. Aucune correction de la température des enroulements ne doit être effectuée.

NOTE 2 Pour l'essai ci-dessus, il est nécessaire que la tension d'alimentation soit ajustable, de telle sorte que les pertes dans le fer aient la même valeur pendant cet essai qu'à un facteur de puissance assigné en charge à la tension assignée. Si la tension d'alimentation n'est pas ajustable mais est égale à la tension assignée, ceci pourrait donner des pertes dans le fer actif sensiblement différentes de celles à pleine charge. En principe, il convient que la puissance réactive soit fournie (c'est-à-dire machine en surexcitation), mais lorsque ceci est impossible en raison de la tension limitée de l'excitatrice, l'essai peut être réalisé avec la puissance réactive absorbée (c'est-à-dire machine en sous-excitation) tant qu'un fonctionnement stable est possible.

Les pertes dans l'enroulement d'excitation à la charge souhaitée seront obtenues à partir du courant d'excitation estimé conformément à l'Article 31 de la CEI 60034-4 (diagramme de Potier), ou à l'Article 32 (diagramme ASA), ou à l'Article 33 (diagramme suédois). Pour la détermination des pertes dans l'excitatrice, voir 6.4.3.3. Lorsque E de l'essai au facteur de puissance nul s'écarte de E à la charge souhaitée, la différence des pertes dans le fer doit être obtenue à partir de la courbe des pertes dans le fer (voir 6.4.2.3) et des deux valeurs de tension de E .

NOTE 3 La précision de cette méthode dépend de la précision des wattmètres et des transformateurs de mesure à un facteur de puissance faible.

Enregistrer au facteur de puissance nul:

- U, f, I, P_1 ;
- valeurs du système d'excitation conformément à 6.2;
- θ_c et θ_w .

6.4.2 Pertes constantes

6.4.2.1 Généralités

Dans le cas de machines à courant continu ou de machines synchrones, la machine peut être essayée en fonctionnant comme un moteur désaccouplé ou couplé à une machine d'entraînement et fonctionnant comme une génératrice (puissance fournie par le couple, mesurée conformément à 6.3.1.2 ou 6.3.1.3).

6.4.2.2 Conditions pour un essai à vide

Les pertes à vide doivent être stabilisées conformément aux conditions suivantes:

- vitesse et tension assignées pour une machine à courant continu (en ajustant le courant de champ);
- fréquence et tension assignées pour une machine à induction;
- fréquence et tension assignées pour une machine synchrone (en ajustant le courant d'excitation), et facteur de puissance unité (courant minimal) lorsqu'elle fonctionne comme un moteur désaccouplé.

NOTE 1 Dans le cas d'une machine à courant continu ou d'une machine synchrone avec une excitatrice entraînée par l'arbre (voir 3.4.3.3 a)), il convient que la machine soit à excitation séparément et que l'excitatrice soit déconnectée de son alimentation et de l'enroulement d'excitation.

Les pertes à vide sont considérées comme stabilisées lorsque la puissance d'entrée à vide varie de 3 % ou moins, lorsqu'elle est mesurée à deux intervalles de 30 min successifs.

NOTE 2 Les pertes à vide sont également considérées comme stabilisées si l'essai à vide est réalisé immédiatement après l'essai en charge.

6.4.2.3 Pertes par frottement et par ventilation, pertes dans le fer

Essayer à un nombre minimal de sept valeurs de tensions, y compris la tension assignée, de telle sorte que:

- quatre valeurs ou plus, soient lues espacées de façon approximativement égale entre 125 % et 60 % de la tension assignée;
- trois valeurs ou plus, soient lues espacées de façon approximativement égale entre 50 % et environ 20 % de la tension assignée, ou (pour une machine fonctionnant en étant désaccouplée) à un point où le courant cesse de diminuer.

Pour les machines à courant continu désaccouplées, la vitesse doit être maintenue constante en ajustant le courant de champ.

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

Enregistrer à chacune des valeurs de tension: U_0, I_0, P_0, R_0 .

où

R_0 est déterminée en mesurant la résistance après les valeurs lues de tension les plus faibles.

NOTE 1 Pour les machines à courant alternatif, R_0 est $R_{II,0}$ et pour les machines à courant continu, R_0 est la résistance totale de tous les enroulements traversés par le courant induit (induit, enroulements de commutation, de compensation). Lorsque la mesure des résistances est irréalisable en raison de résistances très faibles, les valeurs calculées sont admissibles.

Pour une machine couplée, P_0 est déterminée à partir de T et n .

Enregistrer les valeurs du système d'excitation conformément à 6.2.

NOTE 2 Pour les grandes machines synchrones, il est recommandé d'enregistrer d'autres valeurs influençant le rendement, par exemple la température du fluide de refroidissement, la pureté du gaz, la pression du gaz, la température de l'huile des paliers de glissement, la viscosité de l'huile des paliers.

6.4.3 Pertes dans le circuit d'excitation

6.4.3.1 Détermination à partir d'un essai en charge

Faire fonctionner la machine à la charge assignée, comme décrit en 6.4.4.1, jusqu'à stabilisation des températures.

Enregistrer les valeurs du système d'excitation conformément à 6.2.

6.4.3.2 Détermination sans essai en charge

Dans le cas d'une machine synchrone, le courant d'excitation I_e doit être déterminé conformément à l'Article 31 de la CEI 60034-4 (diagramme de Potier), ou à l'Article 32 (diagramme ASA), ou à l'Article 33 (diagramme suédois), à partir d'un essai à vide, un essai de court-circuit et un essai au facteur de puissance nul, ou un essai de réactance d'induit sans rotor.

Enregistrer I_e pour chaque point de charge.

NOTE Dans le cas de machines pour lesquelles les essais ci-dessus ne peuvent pas être réalisés, il convient d'utiliser la valeur du courant d'excitation fournie par le fabricant pour calculer les pertes dans l'enroulement.

6.4.3.3 Pertes dans l'excitatrice

Désaccoupler l'excitatrice de la machine principale (si possible), puis coupler l'excitatrice à:

- a) un dispositif de mesure de couple, afin de déterminer la puissance d'entrée mécanique, conformément à 6.3.1; ou
- b) un moteur d'entraînement étalonné, afin de mesurer la puissance d'entrée électrique du moteur.

Connecter l'excitatrice (dans le cas d'une machine synchrone excitée par l'intermédiaire de bagues) à une charge résistive adaptée. Faire fonctionner l'excitatrice sans excitation et avec la tension U_e et le courant I_e pour chacun des points de charge.

Enregistrer:

- U_e, I_e, P_{Ed}, n, T_E pour chaque point de charge (P_{Ed} conformément à 3.4.3.3);
- $T_{E,0}$ (le couple avec l'excitatrice sans excitation).

NOTE En variante, l'excitatrice peut être couplée à un moteur étalonné, dont la puissance électrique d'entrée est enregistrée.

Lorsque l'excitatrice ne peut pas être désaccouplée de la machine, les pertes dans l'excitatrice doivent être fournies par le fabricant.

6.4.4 Pertes en charge

6.4.4.1 Essai de température à la charge assignée

La machine doit être mise sous charge par des moyens adaptés, avec une alimentation conforme aux caractéristiques assignées de la machine et elle doit être mise en fonctionnement jusqu'à l'obtention de l'équilibre thermique (gradient de 2 K par heure).

A la fin de l'essai à la charge assignée, enregistrer:

- $P_N, I_N, U_N, s, f, \theta_C, \theta_N$;
- $R_N = R$ (la résistance en essai pour la charge assignée, conformément à 5.7.1);
- θ_N (la température des enroulements à la charge assignée, conformément à 5.7.2).

Dans le cas de machines à courant continu alimentées par une puissance redressée, la valeur moyenne I_{av} et la valeur efficace I doivent être mesurées.

NOTE 1 Pour les machines à courant continu, R est la résistance totale de tous les enroulements parcourus par le courant d'induit (induit, enroulements de commutation, de compensation, enroulement composé). Lorsque la mesure des résistances est irréalisable en raison de résistances très faibles, les valeurs calculées sont admissibles.

NOTE 2 Pour les machines à courant continu, $f = 0$.

Pour les valeurs à mesurer pour obtenir les pertes dans l'enroulement d'excitation et les pertes supplémentaires à partir d'un essai en charge, voir 6.4.3.1 et 6.4.5.3.

6.4.4.2 Essai de la courbe de charge

NOTE 1 Cet essai est essentiellement applicable pour la détermination des pertes supplémentaires dans les moteurs à induction.

Avant de commencer à enregistrer les données pour cet essai, la température des enroulements doit être de l'ordre de 5 K de la température θ_N , obtenue à partir d'un essai de température assignée en charge (voir 6.4.4.1).

La machine doit être chargée par des moyens appropriés.

Appliquer la charge à la machine en six points de charge. Il convient de choisir quatre points de charge, qui doivent être espacés de manière approximativement égale entre une charge d'au moins 25 % jusqu'à une charge inférieure ou égale à 100 %. Il convient de choisir convenablement les deux points de charge restants espacés de manière approximativement égale au-dessus d'une charge de 100 %, mais ne dépassant pas une charge de 150 %. 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. Ces essais doivent être réalisés aussi rapidement que possible afin de réduire les variations de températures dans la machine pendant les essais.

Dans les machines à courant alternatif, la variation de fréquence entre tous les points doit être inférieure à 0,1 %. Mesurer R avant la valeur lue de charge la plus élevée et après la valeur lue de charge la plus faible. La résistance pour une charge de 100 % et des charges supérieures doit être la valeur déterminée avant la valeur lue de charge la plus élevée. La résistance utilisée pour les charges inférieures à 100 % doit alors être déterminée comme linéaire avec la charge, en utilisant la valeur lue avant l'essai pour la charge la plus élevée et après la valeur lue la plus faible pour une charge de 25 %.

NOTE 2 Pour les machines à courant alternatif, les résistances peuvent également être déterminées en mesurant la température 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.

Enregistrer pour chaque point de charge: U, I, P_1, R, n, f, T

où R est conforme à 5.7.1.

6.4.4.3 Essai en charge à tension réduite (machines à induction)

Il s'agit d'une méthode appropriée pour les grandes machines qui ne peuvent pas être essayées à pleine charge. Les essais suivants sont requis: un essai en charge, avec la machine fonctionnant en moteur à la vitesse assignée, un essai à vide à la tension réduite U_{red} et un essai à vide à la tension et à la fréquence assignées.

A l'aide de cette méthode, on estime qu'à la tension réduite, tout en maintenant la vitesse constante, les courants diminuent comme la tension et la puissance diminue comme le carré de la tension.

Enregistrer à la tension réduite: $U_{red}, I_{red}, P_{1red}, I_{0red}, \cos(\varphi_{0red})$.

Enregistrer à la tension assignée: $U_N, I_0, \cos(\varphi_0)$.

6.4.4.4 Méthode du circuit équivalent (machines à induction)

6.4.4.4.1 Généralités

Cette méthode peut s'appliquer lorsqu'un essai en charge n'est pas possible. Elle est fondée sur le circuit conventionnel par phase en modèle T d'une machine à induction, comprenant une résistance équivalente pour les pertes dans le fer parallèle à la réactance de champ principale (voir Figure 5). Les paramètres et les grandeurs côté rotor sont rapportés du côté stator; ceci est indiqué par la présence d'une apostrophe ' au niveau des symboles, par exemple $X'_{\sigma r}$.

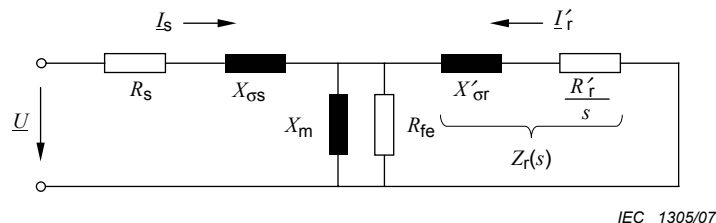


Figure 5 – Machine à induction, modèle T avec résistance équivalente des pertes dans le fer

L'application de la méthode aux machines à induction à cage nécessite que les valeurs désignées suivantes soient disponibles:

- $\frac{X_{\sigma s}}{X'_{\sigma r}}$ rapport de la réactance de fuite du stator sur la réactance de fuite du rotor par rapport au stator.
- α_r coefficient de température des enroulements du rotor (conductivité rapportée à 0 °C).
- $X_{\sigma s}, X_m$ réactance de fuite du stator et réactance magnétisante.

NOTE 1 Lorsqu'on utilise la méthode des circuits équivalents en 6.4.4.4 et 8.2.2.4.3, toutes les tensions, tous les courants et toutes les impédances sont des valeurs par phase pour une machine triphasée en connexion en Y; les puissances et les puissances réactives sont par machine complète.

NOTE 2 Pour le cuivre $\alpha_r = 1/235$ et pour l'aluminium $\alpha_r = 1/225$.

NOTE 3 Une méthode pour obtenir les paramètres des modèles est fournie en 8.2.2.4.3.

6.4.4.4.2 Essais à fréquence réduite

Le rotor de la machine étant bloqué, fournir de la puissance à partir d'un convertisseur triphasé à fréquence ajustable capable de fournir jusqu'à 25 % de la fréquence assignée au courant assigné. Une valeur moyenne d'impédance doit être obtenue à partir de la position du rotor par rapport au stator.

NOTE 1 Au cours des essais, il convient que le convertisseur de fréquence, soit une machine ou un convertisseur statique, fournisse un courant pratiquement sinusoïdal au niveau de la sortie.

NOTE 2 Il convient que les enroulements du rotor des machines à rotor bobiné soient court-circuités pour l'essai.

Fournir un courant assigné et réaliser des lectures pour au moins trois fréquences, comprenant une valeur à moins de 25 % de la fréquence assignée et les autres entre 25 % et 50 % de la fréquence assignée. Pendant cet essai rapide, il convient que l'augmentation de la température des enroulements du stator ne dépasse pas 5 K.

Enregistrer pour au moins trois fréquences: U , I , f , P_1 , R_S , θ_C , θ_W .

6.4.4.4.3 Essais à la fréquence assignée

Les valeurs d'impédance peuvent également être déterminées à partir des essais suivants:

- a) Réactance à partir d'un essai à rotor bloqué au courant assigné, à la tension réduite et à la fréquence assignée: enregistrer la tension, le courant, la puissance, la fréquence et les températures.
- b) Résistance en fonctionnement du rotor:
 - 1) à partir d'une fréquence assignée stabilisée, essai en charge réduite à la tension assignée. Enregistrer la tension, la puissance, le courant, le glissement et les températures pour le point de charge; ou
 - 2) à partir d'un essai en circuit ouvert, suivant une fréquence assignée stabilisée, fonctionnement à vide à la tension assignée. Enregistrer la tension en circuit ouvert et la température des enroulements en fonction du temps après la fin de l'essai à vide du moteur.

NOTE Cet essai suppose un déplacement de courant relativement faible dans le rotor.

6.4.5 Pertes supplémentaires en charge

6.4.5.1 Essai en opposition à simple alimentation (machines à courant continu)

Cette méthode permet la détermination de la composante continue des pertes supplémentaires lorsque deux machines à courant continu identiques sont disponibles. Elles doivent être couplées et connectées électriquement et alimentées par une source en courant continu, la machine fonctionnant en génératrice avec une génératrice de survolteur en série (voir Figure 6).

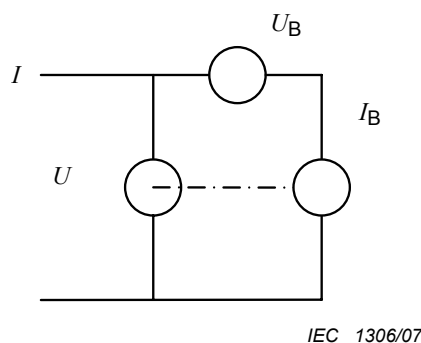


Figure 6 – Schéma pour l'essai en opposition à simple alimentation, pertes supplémentaires, machines à courant continu

Si les machines sont conçues pour un fonctionnement en mode moteur, l'alimentation doit fournir la tension assignée et le courant assigné à la machine fonctionnant en moteur. Dans le cas où les machines sont conçues pour un fonctionnement en mode génératrice, la tension d'alimentation doit être ajustée à la tension assignée et au courant assigné au niveau de la machine fonctionnant en génératrice. Le moteur et la génératrice doivent être mis en fonctionnement avec le flux requis, afin de produire la f.é.m. correspondant à la charge en essai.

NOTE L'alimentation en tension couvre principalement les pertes à vide, le survolteur couvre principalement les pertes en charge.

Dans le cas de machines avec des excitatrices entraînées par l'arbre, les enroulements d'excitation doivent être excités séparément pour cet essai, les excitatrices étant déconnectées de leur alimentation et de l'enroulement d'excitation.

Enregistrer, après stabilisation des températures: $U, I, U_B, I_B, U_{e,M}, I_{e,M}, U_{e,G}, I_{e,G}, n, \theta_c$.

6.4.5.2 Pertes en courant alternatif (machines à courant continu alimentées par convertisseurs)

Les pertes sont obtenues à partir d'un essai en charge avec la machine alimentée par un redresseur approprié. Voir également la CEI 60034-19.

Enregistrer:

- P_1 la puissance en courant alternatif fournie à la machine;
- I la composante de courant efficace alternatif; et
- θ_w les températures des enroulements en contact galvanique avec le circuit d'induit.

NOTE Pour les moteurs bobinés en série, une petite quantité de la puissance d'entrée alternative contribue au couple du moteur développé. Cette quantité est généralement si petite qu'elle peut être négligée.

6.4.5.3 Essai en charge avec mesure du couple (machines à induction)

Pour la détermination des pertes supplémentaires, l'essai en charge conformément à 6.4.4.2 doit être réalisé en fournissant en plus un dispositif de mesure du couple satisfaisant aux exigences de 5.5.4.

Enregistrer en plus pour chaque point de charge le couple: T .

6.4.5.4 Essai avec rotor retiré et essai de rotation inverse (machines à induction)

6.4.5.4.1 Généralités

Il s'agit d'un essai combiné nécessitant deux essais individuels:

- a) avec le rotor retiré (pour les pertes supplémentaires à la fréquence fondamentale);
- b) avec la machine tournant à la vitesse synchrone à l'opposé du champ magnétique, entraînée par des moyens externes (pour les pertes aux fréquences les plus hautes).

Au cours des deux essais, le stator doit être alimenté par un courant polyphasé symétrique de fréquence assignée pour quatre courants entre 25 % et 100 % du courant assigné et deux courants au-dessus et ne représentant pas plus de 150 % du courant assigné. Calculer le courant de charge (du rotor) I_L :

$$I_L = \sqrt{I^2 - I_0^2}$$

où

I est la valeur du courant du stator pendant l'essai donnant un courant de charge souhaité;

I_0 est le courant à vide à la tension assignée.

6.4.5.4.2 Essai avec le rotor retiré

Pour cet essai, toutes les parties dans lesquelles les courants de Foucault pourraient être induits, par exemple les flasques et les parties des paliers, doivent être en place. Appliquer le courant de charge.

Enregistrer pour chaque courant de charge (symboles avec l'indice "rm"): $P_{1,rm}$, $I_{L,rm}$, R_{rm} , $\theta_{w,rm}$.

6.4.5.4.3 Essai de rotation inverse

Pour cet essai, coupler la machine complètement assemblée à un moteur d'entraînement ayant une capacité de sortie au moins égale aux pertes totales et inférieure à cinq fois les pertes totales assignées de la machine à essayer. Lorsqu'un couplemètre est utilisé pour la détermination de la puissance sur l'arbre, son couple maximal ne doit pas dépasser dix fois le couple correspondant aux pertes totales assignées de la machine à essayer. Pour les machines à rotor bobiné, les bornes du rotor doivent être court-circuitées.

Faire fonctionner la machine en essai à la vitesse synchrone dans le sens inverse de la rotation lorsqu'elle est alimentée en séquence de phase normale:

- sans tension appliquée au stator jusqu'à stabilisation des pertes par frottement. Enregistrer: $P_{0,rr}$ fournie par la machine d'entraînement à $I = 0$;
- avec tension appliquée au stator pour obtenir les valeurs du courant du stator égales à celles pour l'essai avec le rotor retiré. Enregistrer pour tous les courants d'essai (symboles avec l'indice "rr"): $I_{L,rr}$, R_{rr} , $P_{1,rr}$; $\theta_{w,rr}$ pour le moteur en essai; $P_{D,rr}$ du moteur d'entraînement.

NOTE Le facteur de puissance faible des essais peut nécessiter une correction d'erreur de phase pour toutes les valeurs lues du wattmètre.

6.4.5.5 Essai Eh-star (machines à induction)

Cet essai nécessite de faire fonctionner le moteur désaccouplé avec une alimentation en tension de déséquilibre. Le circuit d'essai est conforme à la Figure 7.

Les moteurs assignés pour et connectés selon une connexion en triangle doivent être reconnectés selon une connexion en étoile au cours de cet essai. Le point neutre ne doit pas être connecté au neutre ou à la terre du réseau pour éviter les courants homopolaires.

La troisième phase du moteur doit être connectée à la ligne d'alimentation au moyen d'une résistance R_{eh} (voir Figure 7) ayant approximativement les valeurs types suivantes:

- pour les moteurs assignés pour une connexion en étoile:
$$R'_{eh} = \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot I_N} \cdot 0.2$$
- pour les moteurs assignés pour une connexion en triangle:
$$R'_{eh} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_N}{I_N} \cdot 0.2$$

La résistance R_{eh} utilisée au cours de l'essai doit être ajustée de telle sorte que le courant direct $I_{(1)}$ reste en dessous de 30 % du courant inverse $I_{(2)}$ et que la vitesse reste dans la plage des vitesses types du moteur proches de la vitesse assignée (voir ci-dessous). Il est recommandé de commencer l'essai avec une résistance réelle R_{eh} qui ne diffère pas de plus de 20 % de la valeur type R'_{eh} .

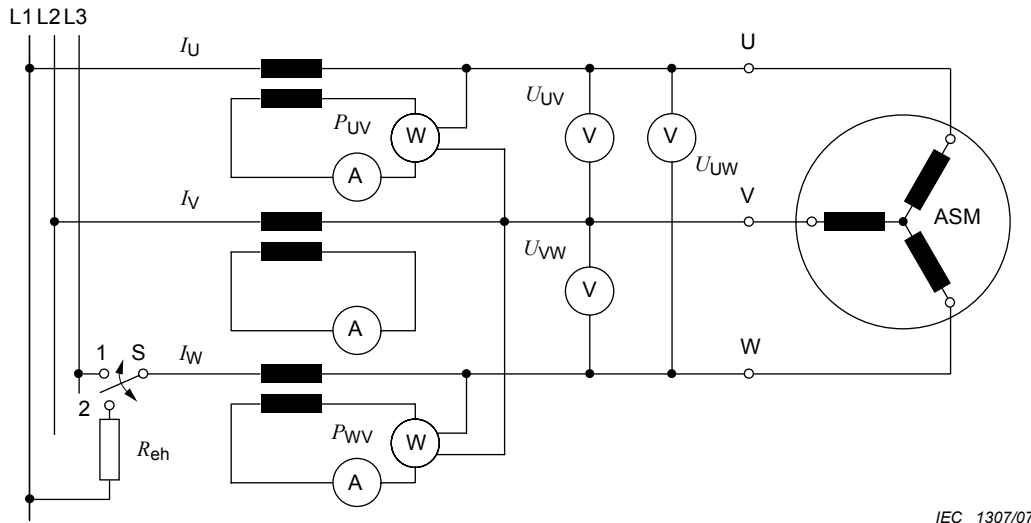


Figure 7 – Circuit d'essai Eh-star

Le courant d'essai I_t est donné par:

- pour les moteurs assignés pour une connexion en étoile:
$$I_t = \sqrt{I_N^2 - I_0^2}$$
- pour les moteurs assignés pour une connexion en triangle:
$$I_t = \frac{\sqrt{I_N^2 - I_0^2}}{\sqrt{3}}$$

La tension d'essai U_t est donnée par:

- pour les moteurs assignés pour une connexion en étoile:
$$U_t = U_N$$
- pour les moteurs assignés pour une connexion en triangle:
$$U_t = U_N \cdot \sqrt{3}$$

Avant l'essai, les pertes à vide doivent être stabilisées conformément à 6.4.2.2.

Mesurer et enregistrer la résistance entre les bornes V et W (R_{VW}) avant et après l'essai complet.

Afin d'éviter un échauffement inégal et excessif des trois phases, l'essai doit être effectué sur une machine froide et aussi vite que possible.

Les gros moteurs ne peuvent être démarrés que sans la résistance R_{eh} (commuter S sur la position 1, voir Figure 7) à tension réduite (25 % – 40 % U_N). Après l'accélération, connecter R_{eh} en commutant sur la position 2.

Il est recommandé que les moteurs plus petits démarrent aussi avec la résistance R_{eh} déjà connectée. Dans ce cas, l'interrupteur n'est pas nécessaire.

Varié la tension d'alimentation pour six points d'essai. Les points d'essai doivent être choisis de façon à ce qu'ils soient espacés de manière approximativement égale entre 150 % et 75 % du courant de phase assigné mesuré en phase V (I_V). Au début de l'essai, commencer avec le courant le plus élevé et procéder par ordre décroissant vers le courant le plus faible.

La résistance entre lignes R_{VW} pour un courant d'essai de 100 % et des courants inférieurs doit être la valeur déterminée après la valeur lue la plus faible (à la fin de l'essai). La résistance utilisée pour les courants supérieurs à 100 % doit être déterminée comme étant une fonction linéaire du courant, en utilisant les valeurs lues avant et après l'essai complet. La résistance d'essai est déterminée en utilisant l'extrapolation, conformément à 5.7.1.

Enregistrer pour chaque point d'essai: $I_U, I_V, I_W, U_{UV}, U_{VW}, U_{WU}, P_{UV}, P_{WV}, n$

NOTE 1 Il est sous-entendu que, dans cet essai, aucun moyennage des résistances de phases n'est admissible.

NOTE 2 Les résistances peuvent également être déterminées en mesurant la température 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.

NOTE 3 Certains wattmètres intégrés communément utilisés mettent en symétrie les trois phases par une connexion en étoile virtuelle interne. Cependant, dans cet essai, l'alimentation est intentionnellement asymétrique. Il est par conséquent essentiel de s'assurer que ni la mise à la terre du point neutre ni un point neutre virtuel n'est établi(e). Il convient d'appliquer strictement le circuit d'essai fourni (voir Figure 7).

Afin d'obtenir des résultats précis, le glissement ne doit pas être supérieur à deux fois le glissement assigné pour tous les courants, en d'autres termes: $n > n_{\text{syn}} - 2 \cdot (n_{\text{syn}} - n_N)$. Si cette condition ne peut pas être satisfaite, l'essai doit être répété avec une valeur augmentée de R_{eh} . Si le moteur est toujours instable à des courants inférieurs à 100 % du courant de phase assigné, il est recommandé d'omettre ces points d'essai.

6.4.5.6 Essai de court-circuit et essai avec machine désaccouplée (machines synchrones)

6.4.5.6.1 Essai de court-circuit avec machine couplée

Coupler la machine essayée avec son enroulement d'induit court-circuité à une machine d'entraînement, avec des dispositions pour enregistrer le couple à l'aide d'un couplemètre (voir 6.3.1.2) ou d'un dynamomètre (voir 6.3.1.3). Faire fonctionner à la vitesse assignée et excitée, de telle sorte que le courant dans l'enroulement primaire court-circuité soit égal au courant assigné.

NOTE Dans le cas d'une machine avec une excitatrice entraînée par l'arbre (voir 3.4.3.3 a)), il convient que la machine soit à excitation séparément et que l'excitatrice soit déconnectée de son alimentation et de l'enroulement d'excitation.

La somme des pertes en charge et des pertes supplémentaires est supposée être indépendante de la température, et aucune correction par rapport à une température de référence n'est apportée. Il est supposé que les pertes supplémentaires varient comme le carré du courant du stator.

Enregistrer: T, n, I .

Les valeurs du système d'excitation sont conformes à 6.2.

6.4.5.6.2 Essai avec machine désaccouplée

La machine est mise en fonctionnement comme un moteur synchrone à une tension fixe, de préférence à environ 1/3 de la valeur normale de tension ou à la valeur la plus faible pour laquelle un fonctionnement stable peut être obtenu. Le courant d'induit est modifié par le contrôle du courant de champ. Il convient de modifier le courant d'induit en six étapes environ, entre 125 % et 25 % du courant assigné et il convient qu'il comprenne un ou deux points à un courant très faible. Il convient que la valeur maximale du courant d'essai, traditionnellement fixée à 125 %, soit obtenue auprès du fabricant, étant donné que parfois le refroidissement du stator ne permettra pas un fonctionnement à un courant assigné dépassant 100 % sans dommages. Il convient de prendre les valeurs lues les plus élevées en premier lieu pour obtenir des températures d'enroulement du stator plus uniformes au cours de l'essai.

Enregistrer: P_1, I, U .

Les valeurs du système d'excitation sont conformes à 6.2.

NOTE Pour les grandes machines, l'étape maximale peut être limitée à 60 % à 70 % du courant d'induit assigné.

7 Détermination du rendement (machines à courant continu)

7.1 Détermination à partir de mesures directes

7.1.1 Essai de mesure du couple

Lorsqu'il est essayé conformément à 6.3.1, le rendement est:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1 + P_{1E}}$$

Conformément à 6.3.1.1, la puissance d'entrée P_1 et la puissance de sortie P_2 sont les suivantes:

- pour le fonctionnement en mode moteur: $P_1 = P_{el}$; $P_2 = P_{mech}$;
- pour le fonctionnement en mode génératrice: $P_1 = P_{mech}$; $P_2 = P_{el}$

où

P_{el} ; T ; et n sont conformes à 6.3.1.2, 6.3.1.3;

$$P_{mech} = 2\pi \times T \times n$$

P_{1E} est conforme à 6.2, en utilisant 3.4.3.3 et 3.4.3.4.

NOTE Les pertes dans le circuit d'excitation non fournies par P_{1E} sont reprises mécaniquement par l'arbre.

7.1.2 Essai en opposition à double alimentation

Lorsque des machines identiques sont mises en fonctionnement dans des conditions assignées essentiellement identiques, le rendement doit être calculé à partir de la moitié des pertes totales et de la puissance d'entrée moyenne du moteur et de la génératrice, comme suit:

$$\eta = 1 - \frac{P_T}{\frac{P_1 + P_2}{2} + P_{1E}}$$

où

$$P_T = \frac{1}{2}(P_1 - P_2) + P_{1E} \quad ; \quad P_{1E} = \frac{1}{2}(P_{1E,M} + P_{1E,G})$$

et

P_1 et P_2 sont conformes à 6.3.2;

P_{1E} est conforme à 6.2, en utilisant 3.4.3.3 et 3.4.3.4.

7.2 Détermination à partir de mesures indirectes

7.2.1 Pertes totales

7.2.1.1 Procédure pour essai en opposition à simple alimentation

Lorsque des machines identiques sont mises en fonctionnement dans des conditions essentiellement assignées, le rendement est calculé en attribuant la moitié des pertes totales à chaque machine.

Calculer le rendement à partir de

$$\eta = 1 - \frac{P_T}{P_M + P_{1E}}$$

où

P_M est la puissance absorbée aux bornes de la machine fonctionnant en moteur (à l'exclusion de la puissance d'excitation), conformément à 6.4.1.1;

P_T sont les pertes totales, définies comme la moitié du total absorbé;

P_{1E} est la puissance d'excitation fournie par une source séparée (pour les machines avec une génératrice de survolteur, voir 6.4.1.1.2):

$$P_T = \frac{1}{2}(U_M \times I_1 + U_B \times I_B) + P_{1E} ; \quad P_{1E} = \frac{1}{2}(P_{1E,M} + P_{1E,G})$$

7.2.2 Sommaton des pertes séparées

7.2.2.1 Rendement

Le rendement est déterminé à partir de:

$$\eta = \frac{P_1 + P_{1E} - P_T}{P_1 + P_{1E}} = \frac{P_2}{P_2 + P_T}$$

où

P_1 est la puissance d'entrée, à l'exclusion de la puissance d'excitation provenant d'une source séparée;

P_2 est la puissance de sortie;

P_{1E} est la puissance d'excitation fournie par une source séparée;

P_T est conforme à 7.2.2.2.

NOTE 1 Généralement, la première expression est davantage utilisée pour un moteur, la deuxième pour une génératrice.

NOTE 2 P_T inclut la puissance d'excitation P_e (voir 6.2) de la machine lorsque cela est applicable.

7.2.2.2 Pertes totales

Les pertes totales doivent être considérées comme la somme des pertes séparées 7.2.2.3 à 7.2.2.6 se composant de

$$P_T = P_k + P_a + P_b + P_{LL} + P_e$$

$$P_e = P_f + P_{Ed}$$

où

P_a sont les pertes dans l'enroulement d'induit;

P_b sont les pertes dans les balais;

P_k sont les pertes constantes;

P_{LL} sont les pertes supplémentaires;

P_f sont les pertes dans l'enroulement d'excitation (de champ);

P_{Ed} sont les pertes dans l'excitatrice.

7.2.2.3 Pertes constantes

7.2.2.3.1 Détermination des pertes constantes

Déterminer les pertes constantes à partir de l'équation suivante:

$$P_k = P_0 - P_a$$

où

$$P_a = I_0^2 \times R_0;$$

I_0 et R_0 sont, pour chaque valeur de tension, enregistrés conformément à 6.4.2.3.

Lorsque la mesure des résistances est irréalisable en raison de résistances très faibles, les valeurs calculées sont admissibles, corrigées pour la température prévue des enroulements.

NOTE Dans les pertes d'induit P_a , les éléments suivants sont inclus: enroulements de compensation, enroulements du pôle de commutation et résistances de shunt (commutateurs). Dans le cas de commutateurs en parallèle avec un enroulement en série, les pertes dans l'enroulement électrique peuvent être déterminées à l'aide du courant total et de la résistance résultante.

7.2.2.3.2 Pertes par frottement et par ventilation (facultatives)

Pour chacune des valeurs de tension de 50 % ou moins de 6.4.2.3, élaborer une courbe des pertes constantes (P_k) à partir de 7.2.2.3.1, par rapport à la tension U_0^2 . 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} .

7.2.2.3.3 Pertes dans le fer (facultatives)

Pour chacune des valeurs de tension comprises entre 60 % et 125 % de 6.4.2.3, élaborer une courbe des pertes constantes (P_k) à partir de 7.2.2.3.1, par rapport à la tension U_0 . Les pertes dans le fer doivent être prises pour la tension interne, à:

$$U_0 = U_N - (IR)_a - 2U_b \text{ dans le cas d'un moteur}$$

$$U_0 = U_N + (IR)_a + 2U_b \text{ dans le cas d'une génératrice}$$

où

U_N est la tension assignée;

$2U_b$ est la chute de tension dans les balais, telle qu'indiquée en 7.2.2.4.2;

I est le courant du point de charge souhaité;

R est la résistance de tous les enroulements du circuit d'induit à la température à pleine charge.

Déterminer les pertes dans le fer à partir de

$$P_{fe} = P_k - P_{fw}$$

où

P_{fw} vient de 7.2.2.3.2.

7.2.2.4 Pertes en charge

7.2.2.4.1 Pertes dans l'enroulement du circuit d'induit

Pour chaque charge enregistrée, déterminer les pertes dans les enroulements du circuit d'induit:

$$P_a = I^2 \times R$$

où

I et R sont conformes à 5.7.2 et 6.4.4.2, R prenant en compte tous les enroulements du circuit d'induit.

7.2.2.4.2 Pertes électriques dans les balais

Déterminer les pertes dans les balais à l'aide d'une chute de tension assignée par balai:

$$P_b = 2 \times U_b \times I$$

où

I est le courant d'induit aux caractéristiques assignées considérées;

U_b est la chute de tension supposée par balai en fonction du type de balai:

1,0 V pour le carbone, l'électrographite ou le graphite;

0,3 V pour le métal-carbone.

7.2.2.5 Pertes dans le circuit d'excitation

Dans le cas d'un essai en charge conformément à 6.4.3.1, les pertes dans l'enroulement d'excitation résultent de la tension et du courant mesurés comme suit:

$$P_f = U_e \times I_e$$

Sans essai en charge, les pertes dans l'enroulement d'excitation P_e doivent être calculées à partir de $I_e^2 \times R_f$, où R_f est la résistance de l'enroulement d'excitation de shunt (ou enroulement de l'excitation séparée), corrigée pour la température de référence spécifiée en 5.7.3 et I_e est le courant d'excitation conformément à la liste suivante.

- Dans le cas des génératrices à excitation en dérivation ou à excitation séparée avec ou sans pôles de commutation, I_e représente 110 % du courant d'excitation correspondant à un fonctionnement à vide à une tension égale à la tension assignée majorée de la chute ohmique dans le circuit d'induit (induit, balais et enroulements de commutation, s'il y a lieu, voir aussi 7.2.2.4.1) au courant du point de charge spécifique.
- Dans le cas des génératrices compensées à excitation en dérivation ou à excitation séparée, I_e représente le courant d'excitation correspondant à un fonctionnement à vide à une tension égale à la tension assignée majorée de la chute ohmique dans le circuit d'induit au courant du point de charge spécifique.
- Dans le cas des génératrices à excitation compound ajustée, I_e représente le courant d'excitation correspondant au fonctionnement à vide à la tension assignée.
- Dans le cas des génératrices à excitation hypercompound ou hypocompound et des types spéciaux de génératrices non couverts par les points a) à c): I_e est soumis à un accord.
- Dans le cas des moteurs shunt, I_e est égal au courant d'excitation à vide correspondant à la tension assignée.

Les pertes dans l'excitatrice P_{Ed} conformément à 6.4.3.3, si déterminées à partir des essais, sont

$$P_{Ed} = (T_E - T_{E,0}) \times 2 \pi n + P_{1E} - U_e \times I_e$$

où

$T_{E,0}$ est le couple avec l'excitatrice sans excitation.

Dans tous les autres cas, les pertes calculées doivent être utilisées.

7.2.2.6 Pertes supplémentaires en charge

7.2.2.6.1 Pertes en courant continu (essai en opposition à simple alimentation)

Déterminer les pertes supplémentaires par machine au courant assigné à partir des valeurs mesurées de 6.4.5.1.

$$P_{LL} = \frac{1}{2} (P_1 - \Sigma P_k - \Sigma P_a - P_{con} - 2U_b (I + I_B) - 2I_B U_b)$$

où

$P_1 = U_M \times I_1 + U_B \times I_B$ est la puissance provenant de l'alimentation et du survolteur; voir Figure 3;

ΣP_k est la somme des pertes constantes des deux machines selon 7.2.2.3;

ΣP_a est la somme des pertes par résistance des deux circuits d'induit selon 7.2.2.4.1;

P_{con} sont les pertes dans les connexions de câbles.

Pour la détermination des pertes pour d'autres points de charge, appliquer les facteurs décrits en Tableau 5.

7.2.2.6.2 Pertes en courant alternatif

Les pertes supplémentaires dues à la composante alternative de la tension d'alimentation résultent de:

$$P_{LL} = P_1 - I^2 \times R_a$$

où

R_a est la résistance continue du circuit d'induit à charge-température assignées;

P_1 et I sont conformes à 6.4.5.2.

7.2.2.6.3 Pertes provenant de la tolérance assignée (pertes en courant continu) et calculs (pertes en courant alternatif)

Il est supposé que les pertes en courant continu varient comme le carré du courant, et que leur valeur totale au courant assigné maximal est:

- a) pour les machines non compensées:
 - 1 % de la puissance d'entrée assignée pour les moteurs;
 - 1 % de la puissance de sortie assignée pour les génératrices;
- b) pour les machines compensées:
 - 0,5 % de la puissance d'entrée assignée pour les moteurs;
 - 0,5 % de la puissance de sortie assignée pour les génératrices.

Pour les machines à vitesse constante, la puissance assignée est la puissance avec le courant assigné maximal et la tension assignée maximale.

Pour les moteurs à variation de vitesse par variation de la tension appliquée, la puissance d'entrée assignée est définie pour chaque vitesse comme la puissance d'entrée lorsque le courant assigné maximal à la vitesse considérée est associé à la tension correspondant à cette vitesse.

Pour les moteurs à vitesse variable, dans lesquels l'augmentation de la vitesse est obtenue par affaiblissement du champ, la puissance d'entrée assignée est définie comme la puissance d'entrée lorsqu'on associe la tension assignée au courant assigné maximal. Pour les génératrices à vitesse variable, dans lesquelles la tension est maintenue constante par variation du champ, la puissance de sortie assignée est définie comme la puissance de sortie disponible aux bornes à la tension assignée et au courant assigné maximal. Les pertes supplémentaires à la vitesse correspondant au plein champ doivent être celles spécifiées ci-dessus en a) et b). Aux autres vitesses, les pertes supplémentaires doivent être calculées en utilisant les facteurs multiplicateurs appropriés donnés au Tableau 5.

Tableau 5 – Facteurs multiplicateurs pour divers rapports de vitesses

Rapport des vitesses	Facteur
1,5:1	1,4
2:1	1,7
3:1	2,5
4:1	3,2

Le rapport des vitesses figurant à la première colonne du Tableau 5 doit être considéré comme le rapport de la vitesse vraie considérée à la vitesse assignée minimale pour service continu.

Pour des rapports de vitesses différents de ceux indiqués au Tableau 5, les facteurs multiplicateurs appropriés peuvent être obtenus par interpolation.

Pour les moteurs alimentés par des convertisseurs de puissance statiques, dès que le facteur d'ondulation du courant (voir CEI 60034-1) du courant d'induit dépasse 0,1, les pertes supplémentaires provoquées par la composante alternative du courant d'induit (voir 7.2.2.6.2) doivent être considérées en plus des pertes spécifiées ci-dessus.

8 Détermination du rendement (machines à induction)

8.1 Détermination à partir de mesures directes

8.1.1 Essai de mesure du couple

Lorsqu'il est essayé conformément à 6.3.1, le rendement est:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

La puissance d'entrée P_1 et la puissance de sortie P_2 sont conformes à 6.3.1.1.

- pour le fonctionnement en mode moteur: $P_1 = P_{el}$; $P_2 = P_{mech}$;
- pour le fonctionnement en mode génératrice: $P_1 = P_{mech}$; $P_2 = P_{el}$

où

P_{el} , T et n sont conformes à 6.3.1.2 et 6.3.1.3.

$$P_{mech} = 2\pi \times T \times n.$$

8.1.2 Essai en opposition à double alimentation

Lorsque des machines identiques sont mises en fonctionnement dans des conditions assignées essentiellement identiques, le rendement doit être calculé à partir de la moitié des pertes totales et de la puissance d'entrée moyenne du moteur et de la génératrice, comme suit:

$$\eta = 1 - \frac{P_T}{\frac{P_1 + P_2}{2}}$$

où

$$P_T = \frac{1}{2}(P_1 - P_2)$$

P_1 et P_2 sont conformes à 6.3.2.

8.2 Détermination à partir de mesures indirectes

8.2.1 Pertes totales à partir de l'essai en opposition à simple alimentation

Lorsque des machines identiques sont mises en fonctionnement dans des conditions essentiellement assignées, le rendement est calculé en attribuant la moitié des pertes totales à chaque machine.

Calculer le rendement à partir de

$$\eta = 1 - \frac{P_T}{P_M}$$

où

P_M est la puissance absorbée aux bornes de la machine fonctionnant en moteur, conformément à 6.4.1.1;

P_T sont les pertes totales, définies comme la moitié du total absorbé, pour les machines à induction à rotor bobiné, mesurées conformément à 6.4.1.1.3, comme suit:

$$P_T = \frac{1}{2}(P_1 + P_r)$$

8.2.2 Somme des pertes séparées

8.2.2.1 Rendement

Le rendement est déterminé à partir de:

$$\eta = \frac{P_1 - P_T}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_T}$$

NOTE Généralement, la première expression est davantage utilisée pour un moteur, la deuxième pour une génératrice.

où

P_1 est la puissance d'entrée obtenue à partir d'un essai à la charge assignée selon 6.4.4.1;

P_2 est la puissance de sortie;

P_T est conforme à 8.2.2.2.

8.2.2.2 Pertes totales

Les pertes totales doivent être considérées comme la somme de 8.2.2.3 (pertes constantes), 8.2.2.4 (pertes en charge) et 8.2.2.5 (pertes supplémentaires en charge):

$$P_T = P_k + P_s + P_r + P_{LL}$$

8.2.2.3 Pertes constantes

8.2.2.3.1 Généralités

La soustraction des pertes dans l'enroulement à vide (à la température pendant l'essai à vide) à partir de la puissance d'entrée à vide, donne les pertes constantes qui sont la somme des pertes par frottement, des pertes par ventilation et des pertes fer. Pour chaque valeur de tension enregistrée en 6.4.2, déterminer les pertes constantes.

$$P_k = P_0 - P_s = P_{fw} + P_{fe}$$

où

$$P_s = 1,5 \times I_0^2 \times R_{llo} \text{ (voir 6.4.2.3)}$$

8.2.2.3.2 Pertes par frottement et par ventilation

A partir des points de pertes à vide déterminés ci-dessus, utiliser tous ceux qui ne présentent aucun effet de saturation significatif et élaborer une courbe des pertes constantes (P_k), en fonction de la tension au carré (U_0^2). 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} .

NOTE Les pertes par ventilation et par frottement sont considérées comme indépendantes de la charge et la même valeur de ventilation et de frottement peut être utilisée pour chacun des points de charge.

8.2.2.3.3 Pertes dans le fer

A partir des valeurs de tension comprises entre 60 % et 125 % de la tension assignée, tracer une courbe de $P_{fe} = P_k - P_{fw}$ en fonction de la tension U_0 . Les pertes dans le fer du point de charge souhaité sont tirées de la courbe à la tension U_r , qui prend en considération la chute de tension résistive dans l'enroulement primaire:

$$U_r = \sqrt{\left(U - \frac{\sqrt{3}}{2} \times I \times R \cos \varphi \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \times I \times R \sin \varphi \right)^2}$$

où

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3} \times U \times I}; \quad \sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}$$

U , P_1 , I et R sont conformes à 6.4.4.2.

8.2.2.4 Pertes en charge

8.2.2.4.1 A partir d'un essai en charge

8.2.2.4.1.1 Généralités

Les pertes en charge pour la détermination du rendement assigné doivent utiliser les entrées de 6.4.4.1.

Les pertes en charge pour la détermination des pertes supplémentaires en charge doivent utiliser les entrées de 6.4.4.2.

8.2.2.4.1.2 Pertes dans l'enroulement du stator et correction de température

Les pertes dans l'enroulement du stator non corrigées à chacun des points de charge sont:

$$P_s = 1,5 \times I^2 \times R$$

où

I et R sont déterminés en 6.4.4.1.

Les pertes dans l'enroulement du stator corrigées à chacun des points de charge sont déterminées en utilisant la résistance d'enroulement du stator R_N à partir de l'essai assigné en charge, corrigée pour une température du fluide de refroidissement de référence de 25 °C:

$$P_{s,0} = P_s \times k_\theta$$

où

k_θ est conforme à 5.7.3.

8.2.2.4.1.3 Pertes dans l'enroulement du rotor et correction de température

Pour les pertes dans l'enroulement du rotor non corrigées, pour chacun des points de charge, utiliser l'équation:

$$P_r = (P_1 - P_s - P_{fe}) \times s$$

où

$$s = 1 - \frac{p \times n}{f}$$

P_1 , n et f sont conformes à 6.4.4.1;

P_s est conforme à 8.2.2.4.1.2;

P_{fe} est conforme à 8.2.2.3.3.

Les pertes dans l'enroulement du rotor corrigées à chacun des points de charge sont déterminées en utilisant la valeur du glissement pour chacun des points, corrigée pour une température du fluide de refroidissement de référence de 25 °C et en utilisant la valeur corrigée des pertes dans l'enroulement du stator (voir 8.2.2.4.1.2) pour chacun des points.

$$P_{r,0} = (P_1 - P_{s,0} - P_{fe}) \times s_\theta$$

où

$P_{s,0}$ est conforme à 8.2.2.4.1.2;

P_{fe} est conforme à 8.2.2.3.3;

$s_\theta = s \times k_\theta$ est le glissement corrigé pour une température du fluide de refroidissement de référence de 25 °C (voir 5.7.3);

k_θ est conforme à 5.7.3.

8.2.2.4.1.4 Pertes électriques dans les balais (rotor bobiné uniquement)

Ces pertes sont incluses en 8.2.2.4.1.3.

Déterminer les pertes dans les balais par phase à l'aide d'une chute de tension supposée par balai, comme il suit:

$$P_b = N \times U_b \times I_2$$

où

N est le nombre total de phases transportant I ;

I_2 est le courant secondaire (non rapporté au primaire);

U_b est la chute de tension supposée par balai en fonction du type de balai:

1,0 V pour le carbone, l'électrographite ou le graphite;

0,3 V pour le métal-carbone.

NOTE Pour I_2 il est admis d'utiliser une valeur désignée.

8.2.2.4.2 Pertes à partir d'un essai en charge à la tension réduite

A partir du résultat de l'essai 6.4.4.3, calculer le courant en charge et la puissance absorbée à la tension assignée:

$$\underline{I} = \underline{I}_{\text{red}} \frac{U_N}{U_{\text{red}}} + \Delta \underline{I}_0$$

où:

$$\Delta \underline{I}_0 = -j(|\underline{I}_0| \sin \varphi_0 - |\underline{I}_{0,\text{red}}| \frac{U_N}{U_{\text{red}}} \sin \varphi_{0,\text{red}})$$

$$P_1 = P_{1,\text{red}} \times \left(\frac{U_N}{U_{\text{red}}} \right)^2$$

NOTE Les symboles du courant soulignés indiquent des vecteurs (voir Figure 8).

A l'aide des valeurs I et P_1 ainsi déterminées, et avec le glissement mesuré à la tension réduite, il est possible de calculer les pertes en charge, de la même façon qu'en 8.2.2.4.1.

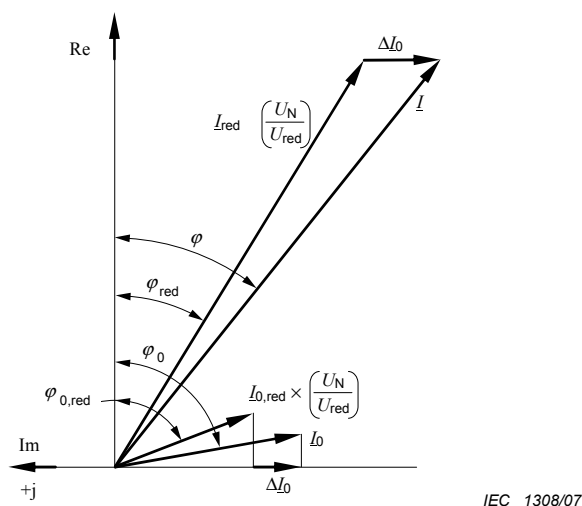


Figure 8 – Schéma vectoriel pour obtenir le vecteur courant à partir de l'essai à la tension réduite

8.2.2.4.3 Pertes à partir de la méthode du circuit équivalent

8.2.2.4.3.1 Valeurs provenant des mesures

La méthode est fondée sur le circuit en modèle T (voir 6.4.4.4 et la Figure 5).

NOTE Lorsqu'on suit la méthode du circuit équivalent, toutes les tensions, tous les courants et toutes les impédances sont par phase pour une machine triphasée en connexion en Y; les puissances et les puissances réactives sont par machine complète.

La procédure décrite dans le présent paragraphe s'applique à la méthode de 6.4.4.4.2. En utilisant la méthode de 6.4.4.4.3, remarquer les écarts suivants:

- a) les réactances sont calculées de la même manière qu'en 8.2.2.4.3.2;
- b) la résistance en fonctionnement du rotor est déterminée:
 - en utilisant l'essai décrit en 6.4.4.4.3 a)

par calcul inverse à l'aide du circuit équivalent de la Figure 5, en supposant une valeur pour R_r' . Ajuster la valeur de R_r' jusqu'à ce que la puissance calculée soit de l'ordre de 0,1 % de la puissance mesurée ou jusqu'à ce que le courant calculé soit de l'ordre de 0,1 % du courant mesuré;
 - en utilisant l'essai décrit en 6.4.4.4.3 b)

en déterminant la constante de temps à partir de la pente du tracé de la tension décroissante et la durée sur l'essai en circuit ouvert. Déterminer R_r' à partir de l'équation:

$$R_r' = \frac{(X_m + X_{\sigma r}')}{2\pi f \tau_0}$$

où:

- X_m est la réactance magnétisante;
- $X_{\sigma r}$ est la réactance de fuite du rotor;
- f est la fréquence de ligne;
- τ_0 est la constante de temps en circuit ouvert.

Corriger la valeur de R_r' par rapport à la température de fonctionnement à partir de la température d'essai.

Déterminer les puissances réactives

- à partir de l'essai à vide à la tension assignée $U_0 = U_N$ et à la fréquence assignée (6.4.2.2)

$$P_{Q,0} = \sqrt{(3U_0 I_0)^2 - P_0^2}$$

- à partir de l'essai à rotor bloqué, à la fréquence réduite (6.4.4.4.2)

$$P_{Q,lr} = \sqrt{(3U I)^2 - P_1^2}$$

où

U_0, I_0 et P_0 , sont la tension de phase, le courant de phase et la puissance fournie à partir de l'essai à vide à la tension assignée aux bornes;

U, I et P_1 sont la tension de phase, le courant de phase et la puissance fournie à partir de l'essai d'impédance à rotor bloqué (voir 6.4.4.4.3) aux fréquences f de cet essai.

8.2.2.4.3.2 Paramètres du circuit équivalent

Les paramètres du circuit équivalent sont déterminés dans les étapes suivantes.

- Réactances

Calculer les réactances X_m à partir de l'essai à vide et $X_{\sigma s,lr}$ à partir de l'essai à rotor bloqué à 25 % de la fréquence assignée:

$$X_m = \frac{3U_0^2}{P_{Q,0} - 3I_0^2 X_{\sigma s}} \times \frac{1}{\left(1 + \frac{X_{\sigma s}}{X_m}\right)^2} \quad X_{s,lr} = \frac{P_{Q,lr}}{3I^2 \left(1 + \frac{X_{\sigma s}}{X'_{\sigma r}} + \frac{X_{\sigma s}}{X_m}\right)} \times \left(\frac{X_{\sigma s}}{X'_{\sigma r}} + \frac{X_{\sigma s}}{X_m}\right)$$

$$X_{\sigma s} = \frac{f_N}{f_{lr}} X_{\sigma s,lr} \quad X'_{\sigma r} = \frac{X_{\sigma s}}{X_{\sigma s} / X'_{\sigma r}}$$

Calculer en utilisant les valeurs définies comme valeurs de départ (voir 6.4.4.4.1):

$$X_{\sigma s}, X_m \text{ and } \frac{X_{\sigma s}}{X'_{\sigma r}}$$

Recalculer jusqu'à ce que X_m and $X_{\sigma s}$ s'écartent de moins de 0,1 % des valeurs de l'étape précédente.

- Résistance des pertes dans le fer

Déterminer la résistance par phase équivalente aux pertes dans le fer à la tension assignée à partir de

$$R_{fe} = \frac{3U_{N,ph}^2}{P_{fe}} \times \frac{1}{\left(1 + \frac{X_{\sigma s}}{X_m}\right)^2}$$

où

P_{fe} sont les pertes dans le fer conformément à 8.2.2.3.3 à partir de P_0 à la tension assignée.

- Résistance du rotor

Déterminer la résistance du rotor non corrigée pour chaque point d'essai d'impédance à rotor bloqué:

$$R'_{r,lr} = \left(\frac{P_1}{3I^2} - R_s\right) \times \left(1 + \frac{X'_{\sigma r}}{X_m}\right)^2 - \left(\frac{X'_{\sigma r}}{X_{\sigma s}}\right)^2 \times \frac{X_{\sigma s,lr}^2}{R_{fe}}$$

où

R_s est la résistance d'enroulement du stator par phase à la température correspondante θ_w .

NOTE Si la température de l'enroulement du rotor diffère trop de la température de l'enroulement du stator, la méthode deviendra inexacte.

La résistance du rotor corrigée pour la température de référence (voir 5.7.2 et le Tableau 4) est, pour chaque fréquence d'essai d'impédance à rotor bloqué, donnée par:

$$R''_{r,lr} = R'_{r,lr} \times \frac{1 + \alpha_r \theta_{ref}}{1 + \alpha_r \theta_w}$$

Tracer une courbe des valeurs de $R''_{r,lr}$ en fonction de la fréquence f_{lr} . L'intersection avec $f_{lr} = 0$ donne la résistance du rotor par rapport au stator R'_r .

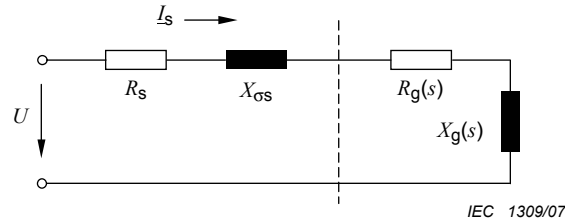


Figure 9 – Machines à induction, modèle réduit pour le calcul

- Impédances dépendant de la charge

Pour chaque point de charge intermédiaire souhaité, calculer les valeurs de l'impédance dépendant du glissement et de l'admittance (voir Figure 9):

$$Z_r = \sqrt{\left(\frac{R_r'}{s}\right)^2 + X_{\sigma r}'^2} \quad Y_g = \sqrt{\left(\frac{R_r'/s}{Z_r^2} + \frac{1}{R_{fe}}\right)^2 + \left(\frac{X_{\sigma r}'}{Z_r^2} + \frac{1}{X_m}\right)^2}$$

$$R_g = \frac{R_r'/s + 1}{Y_g^2} \quad X_g = \frac{X_{\sigma r}' + 1}{Y_g^2}$$

Calculer l'impédance résultante vue des bornes:

$$R = R_s + R_g \quad X = X_{\sigma s} + X_g \quad Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

où

s est le glissement estimé;

R_s est la résistance d'enroulement du stator par phase à la température de référence θ_{ref} .

8.2.2.4.3.3 Courants et pertes

Les valeurs de performance sont déterminées dans les étapes suivantes.

Déterminer: $I_s = \frac{U_N}{Z}$ courant de phase du stator; $I_r' = I_s \frac{1}{Y_g Z_r}$ courant de phase du rotor;

$P_\delta = 3I_r'^2 \frac{R_r'}{s}$ puissance d'entrefer transférée au rotor; $P_{fe} = 3I_s^2 \frac{1}{Y_g^2 R_{fe}}$ pertes dans le fer

$P_s = 3I_s^2 R_s$; $P_r = 3I_r'^2 R_r'$ pertes dans l'enroulement du stator et du rotor

$P_{LL} = P_{LL,N} \left(\frac{I_r'}{I_{r,N}}\right)^2$ pertes supplémentaire en charge à partir d'une valeur $P_{LL,N}$ en charge

assignée, soit assignée (8.2.2.5.3) ou mesurée (8.2.2.5.2) ou déterminée conformément à 8.2.2.5.4.

Les pertes totales sont:

$$P_T = P_s + P_{fe} + P_r + P_{LL} + P_{fw}$$

Etant donné que la puissance d'entrée et la puissance sur l'arbre sont $P_1 = 3I_s^2 R$ et $P_2 = P_1 - P_T$, le glissement doit être corrigé, et les calculs du courant et des pertes doivent être

répétés jusqu'à ce que P_2 pour le fonctionnement en mode moteur, ou P_1 pour le fonctionnement en mode génératrice, soit assez proche de la valeur souhaitée.

Le rendement (fonctionnement en mode moteur) provient de:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

8.2.2.5 Pertes supplémentaires en charge

8.2.2.5.1 A partir d'un essai en charge avec mesure du couple

8.2.2.5.1.1 Pertes résiduelles, P_{Lr}

Les pertes résiduelles doivent être déterminées pour chaque point de charge en soustrayant de la puissance d'entrée: la puissance de sortie, les pertes dans l'enroulement du stator à la résistance de l'essai, les pertes dans le fer, les pertes par ventilation et par frottement et les pertes dans l'enroulement du rotor correspondant à la valeur déterminée du glissement.

$$P_{Lr} = P_1 - P_2 - P_s - P_r - P_{fe} - P_{fw}; \quad P_2 = 2\pi \times T \times n$$

où

P_1 , T et n sont conformes à 6.4.4.2;

P_s est conforme à 8.2.2.4.1.2;

P_{fe} est conforme à 8.2.2.3.3;

P_{fw} est conforme à 8.2.2.3.2;

P_r est conforme à 8.2.2.4.1.3.

8.2.2.5.1.2 Lissage des valeurs des pertes résiduelles

Les valeurs des pertes résiduelles doivent être lissées en utilisant une analyse de régression linéaire (voir Figure 10) basée sur l'expression des pertes en fonction du carré du couple en charge conformément à la relation:

$$P_{Lr} = A \times T^2 + B$$

où

T est conforme à 8.2.2.5.1.1;

A et B sont des constantes déterminées conformément à 6.4.4.2 et 8.2.2.5.1.1 à partir d'au moins six points de charge à l'aide des équations suivantes:

$$A = \frac{i \times \sum((P_L) \times (T^2)) - \sum P_L \times \sum T^2}{i \times \sum (T^2)^2 - (\sum T^2)^2}$$

A est la pente conformément à

B est l'intersection conformément à $B = \frac{\sum P_L}{i} - A \times \frac{\sum T^2}{i}$

i est le nombre de points de charge additionnés.

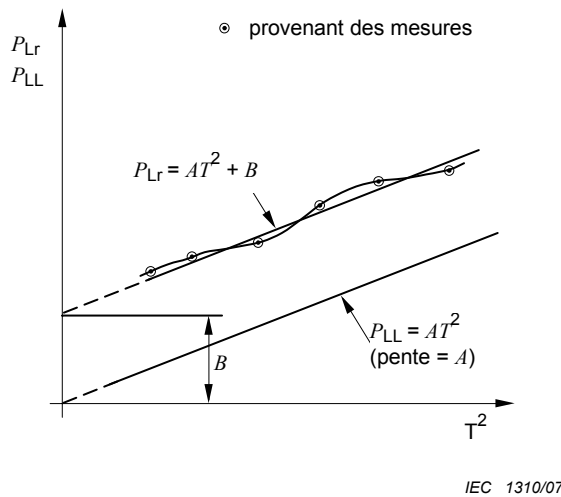


Figure 10 – Lissage des valeurs des pertes résiduelles

Le coefficient de corrélation est conforme à

$$\gamma = \frac{i \times \sum (P_L \times T^2) - (\sum P_L) \times (\sum T^2)}{\sqrt{\left(i \times \sum (T^2)^2 - (\sum T^2)^2 \right) \times \left(i \times \sum P_L^2 - (\sum P_L)^2 \right)}}$$

Lorsque le coefficient de corrélation γ est inférieur à 0,95, supprimer le point le plus défavorable et répéter la régression. Si γ augmente jusqu'à $\geq 0,95$, utiliser la deuxième régression; si γ reste inférieur à 0,95, l'essai n'est pas satisfaisant, et les erreurs d'instrumentation ou de lectures d'essai, ou les deux, sont indiquées. Il convient d'analyser et de corriger la source de l'erreur, et il convient de répéter l'essai (voir 6.4.4.2).

8.2.2.5.1.3 Pertes supplémentaires en charge P_{LL}

Lorsque la constante de pente A est établie, une valeur des pertes supplémentaires en charge pour chaque point de charge doit être déterminée à l'aide de l'équation:

$$P_{LL} = A \times T^2$$

où

A et T sont conformes à 8.2.2.5.1.2.

8.2.2.5.2 A partir d'un essai avec rotor retiré et d'un essai en rotation inverse

Atténuer les valeurs d'essai (voir 6.4.5.4) des puissances du stator $P_{1,rm}$ and $P_{1,rr}$ et de la puissance sur l'arbre ($P_{D,rr} - P_{0,rr}$) en appliquant une analyse de régression au logarithme des puissances et des courants, entraînant les relations ci-dessous:

$$P_{1,rm} = A_{rm} \times I^{N1} + B_{L,rm}; \quad P_{1,rr} = A_{rr} \times I^{N2} + B_{L,rr}; \quad (P_{D,rr} - P_{0,rr}) = A_{D,rr} \times I^{N3} + B_{D,rr}$$

Les puissances lissées seront alors les suivantes:

$$P_{1,rm} = A_{rm} \times I^{N1}; \quad P_{1,rr} = A_{rr} \times I^{N2}; \quad (P_{D,rr} - P_{0,rr}) = A_{D,rr} \times I^{N3}$$

Si les données sont précises, chaque courbe présentera une relation proche de la loi en puissance carrée entre la puissance et le courant.

Les pertes supplémentaires en charge sont: $P_{LL} = P_{LL,rm} + P_{LL,rr}$ où, pour chaque courant d'essai:

$$P_{LL,rm} = P_{1,rm} - (3 \times I^2 \times R_{s,rm}) \text{ sont les pertes à la fréquence fondamentale}$$

où

$R_{s,rm}$ est la résistance de phase du stator rapportée à la moyenne des températures $\theta_{W,rm}$;

$$P_{LL,rr} = (P_{D,rr} - P_{0,rr}) - (P_{1,rr} - P_{LL,rm} - (3 \times I^2 \times R_{s,rr})) \text{ sont les pertes aux fréquences plus élevées}$$

où

$R_{s,rr}$ est la résistance de phase du stator rapportée à la moyenne des températures $\theta_{W,rr}$.

Les pertes supplémentaires en charge à un point de fonctionnement spécifié peuvent être déterminées à partir des étapes suivantes.

- a) Calculer une valeur approximative pour le courant de charge I_{NL} correspondant à la valeur assignée du courant de ligne du stator:

$$I_{NL} = \sqrt{I_N^2 - I_0^2}$$

où

I_N est la valeur assignée du courant de ligne du stator;

I_0 est la valeur du courant à vide du stator.

- b) Pour la valeur du courant de charge I_{NL} , calculer une valeur assignée des pertes parasites en charge P_{NLL} comme suit:

$$P_{NLL} = A_{Drr} \times I_{NL}^{N3} + 2A_{rrm} \times I_{NL}^{N1} - A_{rr} \times I_{NL}^{N2} - 6I_{NL}^2 \times (R_{srm} - 0.5R_{srr})$$

- c) Calculer la valeur du courant de charge I_L à chaque point de fonctionnement:

$$I_L = \sqrt{I^2 - I_0^2}$$

où

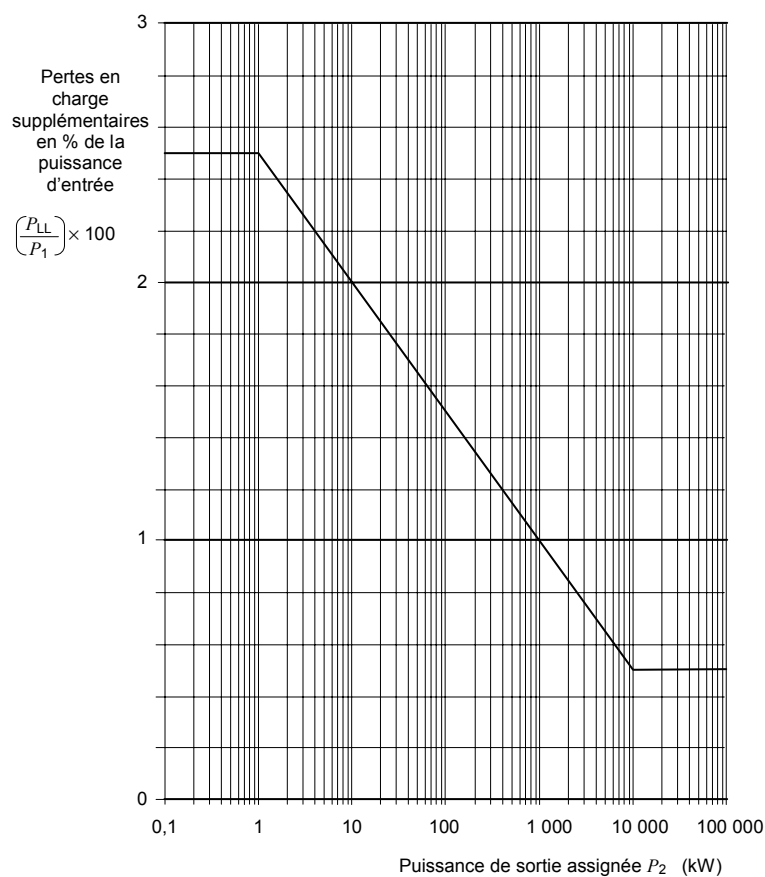
I est le courant de ligne du stator au point de fonctionnement.

- d) Calculer les pertes parasites en charge P_{LL} au point de fonctionnement:

$$P_{LL} = P_{NLL} \times \left(\frac{I_L}{I_{NL}} \right)^2$$

8.2.2.5.3 A partir d'une valeur allouée assignée

La valeur des pertes supplémentaires en charge P_{LL} à la charge assignée peut être déterminée comme un pourcentage de la puissance d'entrée P_1 à l'aide de la courbe de la Figure 11.



IEC 1311/07

Figure 11 – Valeur allouée assignée pour les pertes supplémentaires en charge P_{LL} , machines à induction

Les valeurs de la courbe peuvent être décrites à l'aide des équations suivantes:

$$\text{pour } P_2 \leq 1 \text{ kW} \quad P_{LL} = P_1 \times 0,025$$

$$\text{pour } 1 \text{ kW} < P_2 < 10\,000 \text{ kW} \quad P_{LL} = P_1 \times \left[0,025 - 0,005 \log_{10} \left(\frac{P_2}{1 \text{ kW}} \right) \right]$$

$$\text{pour } P_2 \geq 10\,000 \text{ kW} \quad P_{LL} = P_1 \times 0,005$$

Pour des charges autres qu'assignées, on doit supposer que les pertes supplémentaires en charge varient comme le carré du courant primaire moins le carré du courant à vide.

NOTE La courbe ne représente pas une moyenne, mais une enveloppe supérieure d'un grand nombre de valeurs mesurées, et elle peut, dans la plupart des cas, produire des pertes supplémentaires en charge plus élevées que 8.2.2.5.1 ou 8.2.2.5.2.

8.2.2.5.4 A partir d'un essai Eh-star

8.2.2.5.4.1 Détermination des valeurs intermédiaires

Pour chaque point d'essai selon 6.4.5.5 calculer les valeurs en utilisant les équations de l'Annexe B.

8.2.2.5.4.2 Lissage des valeurs des pertes supplémentaires en charge

Les valeurs des pertes supplémentaires en charge doivent être lissées en utilisant l'analyse de régression linéaire (voir Figure 10).

Les pertes doivent être exprimées en fonction du carré du courant de séquence négative $I_{i(2)}$ par rapport au courant d'essai I_t , conformément à 6.4.5.5:

$$P_{Lr} = A \cdot \left(\frac{I_{i(2)}}{I_t} \right)^2 + B$$

Les valeurs A et B doivent être calculées selon la même procédure que celle décrite en 8.2.2.5.1.2.

Lorsque la constante de pente A est établie, la valeur des pertes supplémentaires en charge pour la charge assignée doit être déterminée à l'aide de l'équation $P_{LL} = A \times T^2$.

9 Détermination du rendement (machines synchrones)

9.1 Détermination à partir de mesures directes

9.1.1 Procédure de couple

Lorsqu'il est essayé conformément à 6.3.1, le rendement est:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1 + P_{1E}}$$

La puissance d'entrée P_1 et la puissance de sortie P_2 sont conformes à 6.3.1.1.

- pour le fonctionnement en mode moteur: $P_1 = P_{el}$; $P_2 = P_{mech}$;
- pour le fonctionnement en mode génératrice: $P_1 = P_{mech}$; $P_2 = P_{el}$

où

P_{el} , T et n sont conformes à 6.3.1.2 et 6.3.1.3;

$P_{mech} = 2\pi \times T \times n$

P_{1E} est conforme à 6.2, en utilisant 3.4.3.3 et 3.4.3.4.

NOTE Les pertes dans le circuit d'excitation non fournies par P_{1E} sont reprises mécaniquement par l'arbre.

9.1.2 Essai en opposition à double alimentation

Lorsque des machines identiques sont mises en fonctionnement dans des conditions assignées essentiellement identiques, le rendement doit être calculé à partir de la moitié des pertes totales et de la puissance d'entrée moyenne du moteur et de la génératrice, comme suit:

$$\eta = 1 - \frac{P_T}{\frac{P_1 + P_2}{2} + P_{1E}}$$

où

$$P_T = \frac{1}{2}(P_1 - P_2) + P_{1E} ; P_{1E} = \frac{1}{2}(P_{1E,M} + P_{1E,G})$$

P_1 et P_2 sont conformes à 6.3.2;

P_{1E} est conforme à 6.2, en utilisant 3.4.3.4.

9.2 Détermination à partir de mesures indirectes

9.2.1 Pertes totales

9.2.1.1 Procédure pour essai en opposition à simple alimentation

Lorsque des machines identiques sont mises en fonctionnement dans des conditions essentiellement assignées, le rendement est calculé en attribuant la moitié des pertes totales à chaque machine.

Calculer le rendement à partir de:

$$\eta = 1 - \frac{P_T}{P_M + P_{1E}}$$

où

P_M est la puissance absorbée aux bornes de la machine fonctionnant en moteur (à l'exclusion de la puissance d'excitation), conformément à 6.4.1.1;

P_T sont les pertes totales, définies comme la moitié du total absorbé;

P_{1E} est la puissance d'excitation fournie par une source séparée, pour les machines synchrones, mesurée conformément à 6.4.1.1.4.

$$P_T = \frac{1}{2}P_1 + P_{1E}; \quad P_{1E} = \frac{1}{2}(P_{1E,M} + P_{1E,G})$$

9.2.1.2 Procédure du facteur de puissance nul

Pour chaque point de charge souhaité, déterminer le rendement avec les valeurs mesurées à partir de 6.4.1.2 comme suit:

$$\eta = 1 - \frac{P_T}{P_1 + P_{1E}}$$

où

$P_1 = \sqrt{3} \times U_N \times I \cos \varphi_N$ est la puissance absorbée aux bornes de l'enroulement d'induit en fonctionnement assigné;

P_T sont les pertes totales, y compris les pertes par excitation.

Les pertes totales sont:

- a) pour les machines avec un type d'excitatrice c) et d) (voir 3.4.3.3):

$$P_T = P_{1,zpf} + \Delta P_{fe} + P_e;$$

P_e doit être déterminé conformément à 6.2, en appliquant la correction de température suivante pour la résistance d'enroulement d'excitation:

$$R_e = R_{e,0} \times \frac{235 + \theta_e}{235 + \theta_0}; \quad \theta_e = 25 + (\theta_w - \theta_c) \left(\frac{I_e}{I_{e,zpf}} \right)^2$$

où

I_e est le courant dans l'enroulement d'excitation, déterminé comme décrit dans la CEI 60034-4 (voir aussi 6.4.1.2);

$P_{1,zpf}$ est égale à P_1 conformément à 6.4.1.2;

R_e est la résistance d'enroulement d'excitation, avec température corrigée pour la charge souhaitée;

$R_{e,0}$ est la résistance d'enroulement à froid à la température θ_0 ;

$I_{e,zpf}$ est le courant dans l'enroulement d'excitation à partir de l'essai au facteur de puissance nul;

θ_w est la température de l'enroulement d'excitation de l'essai au facteur de puissance nul;

θ_c est la température du fluide de refroidissement de référence de l'essai au facteur de puissance nul;

θ_e est la température de l'enroulement d'excitation corrigée pour I_e ;

ΔP_{fe} est donné ci-dessous.

- b) pour les machines avec un type d'excitatrice a) et b) (voir 3.4.3.3):

P_e , P_{Ed} et P_{1E} sont telles que définies en 6.2 à partir d'un essai de 6.4.3.3 pour le courant dans l'enroulement d'excitation à la charge souhaitée, déterminé conformément à la CEI 60034-4 (voir aussi 6.4.1.2):

$$P_T = P_{1,zpf} + P_{1E,zpf} + \Delta P_{fe} + P_e$$

$$P_e = P_f + P_{Ed} - P_{f,zpf} - P_{Ed,zpf}$$

où

$P_{1,zpf}$, $P_{f,zpf}$ et $P_{1E,zpf}$ sont les valeurs mesurées à partir de l'essai de 6.4.1.2;

P_f est déterminé comme pour les machines à excitation séparée;

P_{Ed} , $P_{Ed,zpf}$ sont déterminés à partir d'un essai de 6.4.3.3 pour I_e , R_e et $I_{e,zpf}$, $R_{e,zpf}$;

ΔP_{fe} est déterminé à partir de la courbe de tension-pertes dans le fer (voir 6.4.2.3), et est la différence des valeurs pour les tensions égales à la f.é.m. pour la charge souhaitée et à la f.é.m. de l'essai au facteur de puissance nul.

NOTE Les équations sont exprimées pour le fonctionnement en mode moteur.

9.2.2 Sommmation des pertes séparées

9.2.2.1 Rendement

Le rendement est déterminé à partir de:

$$\eta = \frac{P_1 + P_{1E} - P_T}{P_1 + P_{1E}} = \frac{P_2}{P_2 + P_T}$$

où

P_1 est la puissance d'entrée, à l'exclusion de la puissance d'excitation provenant d'une source séparée;

P_2 est la puissance de sortie;

P_{1E} est la puissance d'excitation fournie par une source séparée;

P_T est conforme à 9.2.2.2.

NOTE 1 Généralement, la première expression est davantage utilisée pour un moteur, la deuxième pour une génératrice.

NOTE 2 P_T inclut la puissance d'excitation P_e (voir 6.2) de la machine lorsque cela est applicable.

9.2.2.2 Pertes totales

Les pertes totales, y compris les pertes dans le circuit d'excitation, sont:

$$P_T = P_k + P_s + P_{LL} + P_e$$

où

P_k est conforme à 9.2.2.3;

P_s est conforme à 9.2.2.5;

P_{LL} est conforme à 9.2.2.6;

P_e est conforme à 9.2.2.4.

9.2.2.3 Pertes constantes

9.2.2.3.1 Généralités

Pour chaque valeur de tension enregistrée en 6.4.2.3, déterminer les pertes constantes:

$$P_k = P_0 - P_s$$

où

$$P_s = 1,5 \times I_0^2 \times R_{11,0}$$

P_0 , I_0 et $R_{11,0}$ sont conformes à 6.4.2.3.

Pour les machines avec des excitatrices sans balai, les pertes par excitation doivent également être soustraites comme suit:

$$P_k = P_0 - P_s - P_{f,0} - P_{Ed} + P_{1E}$$

où

$P_{f,0}$ sont les pertes dans l'enroulement d'excitation à vide;

P_{Ed} sont les pertes dans l'excitatrice, conformément à 6.4.3.3, correspondant à U_e et I_e du point d'essai;

P_{1E} est la puissance, conformément à 6.2, correspondant à U_e et I_e du point d'essai.

9.2.2.3.2 Pertes par frottement et par ventilation

A partir des points d'essai à vide (voir 6.4.2.3), utiliser tous ceux qui ne présentent aucun effet de saturation significatif et élaborer une courbe des pertes constantes (P_k), en fonction de la tension au carré (U_0^2). 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} .

NOTE Les pertes par ventilation et par frottement sont considérées comme indépendantes de la charge et les mêmes valeurs de ventilation et de frottement peuvent être utilisées pour chacun des points de charge.

9.2.2.3.3 Pertes dans le fer

Pour chacune des valeurs de tension (voir 6.4.2.3), élaborer une courbe des pertes constantes en fonction de la tension. Soustraire de cette valeur les pertes par ventilation et par frottement pour déterminer les pertes fer.

$$P_{fe} = P_k - P_{fw}$$

9.2.2.4 Pertes dans le circuit d'excitation

9.2.2.4.1 Généralités

Pour chaque point de charge, déterminer les pertes par excitation:

$$P_e = P_f + P_{Ed} + P_b$$

P_{Ed} et P_f sont conformes à 9.2.2.4.2 et 9.2.2.4.3, respectivement.

P_b est conforme à 9.2.2.4.4, lorsque des balais sont utilisés.

9.2.2.4.2 A partir d'un essai en charge

P_f sont les pertes dans l'enroulement d'excitation, conformément à 6.4.3.1.

P_{Ed} sont les pertes de l'excitatrice, conformément à 6.4.3.3:

$$P_{Ed} = 2\pi n(T_E - T_{E,0}) + P_{1E} - P_f$$

9.2.2.4.3 Sans essai en charge

P_f sont les pertes dans l'enroulement d'excitation, conformément à 6.4.3.2.

P_{Ed} sont les pertes dans l'excitatrice, conformément à 6.4.3.3.

Dans le cas de machines synchrones à excitation séparée, les pertes dans l'enroulement d'excitation P_f sont le produit de U_e , I_e , réduites par les pertes dans les balais P_b , conformément à 9.2.2.4.4.

9.2.2.4.4 Pertes électriques dans les balais

Déterminer les pertes dans les balais à partir d'une chute de tension assignée par balai de chaque polarité:

$$P_b = 2 \times U_b \times I_e$$

où

I_e est conforme à l'essai en charge 6.4.3.1 ou est déterminé par calcul comme en 6.4.3.2;

U_b est la chute de tension par balai de chaque polarité en fonction du type de balai:

1,0 V pour le carbone, l'électrographite ou le graphite:

0,3 V pour le métal-carbone.

9.2.2.5 Pertes en charge

9.2.2.5.1 Détermination à partir d'un essai en charge

A chacun des points de charge, déterminer les pertes dans l'enroulement du stator:

$$P_s = 1,5 \times I^2 \times R_{II}$$

où

I est conforme à 6.4.4.1;

R_{II} est conforme à 6.4.4.1, corrigée pour une température du fluide de refroidissement de référence primaire de 25 °C.

9.2.2.5.2 Détermination sans essai en charge

Déterminer les pertes dans l'enroulement du stator:

$$P_s = 1,5 \times I^2 \times R_{II}$$

où

I est le courant du stator estimé pour le point de charge souhaité;

R_{II} est la résistance d'enroulement mesurée, rapportée à la température de référence en 5.7.2.

9.2.2.6 Pertes supplémentaires en charge P_{LL}

9.2.2.6.1 A partir d'un essai avec machine couplée

Les pertes supplémentaires en charge au courant assigné proviennent de la puissance absorbée de l'essai de court-circuit de 6.4.5.6.1, réduites par les pertes par frottement et par ventilation P_{fw} , conformément à 9.2.2.3.2 et les pertes en charge au courant assigné, conformément à 9.2.2.5.1 ou 9.2.2.5.2.

$$P_{LL,N} = 2\pi nT - P_{fw} - P_s$$

Dans le cas d'une machine avec excitation sans balai, l'enroulement d'excitation et la composante des pertes de l'excitatrice fournis par la machine d'entraînement doivent en plus être soustraits:

$$P_{LL,N} = 2\pi nT + P_{1E} - P_{fw} - P_s - P_f - P_{Ed}$$

où

P_f est conforme à 6.2;

P_{Ed} sont les pertes dans l'excitatrice, conformément à 6.4.3.3.

Pour les autres points de charge, les pertes supplémentaires proviennent de

$$P_{LL} = P_{LL,N} \times \left(\frac{I}{I_N} \right)^2$$

9.2.2.6.2 A partir d'un essai avec machine désaccouplée

Les pertes supplémentaires en charge doivent être déterminées à partir de l'essai de court-circuit avec machine désaccouplée de 6.4.5.6.2.

Afin de déterminer les pertes supplémentaires pour tout courant d'induit, les pertes constantes P_k conformément à 9.2.2.3 et les pertes en charge P_s conformément à 9.2.2.5.1 pour tout courant d'induit, doivent être déduites de la puissance d'entrée à chaque courant d'induit pris de l'essai de 6.4.5.6.2.

Annexe A (normative)

Correction des valeurs lues du couple du dynamomètre

NOTE Cette méthode de correction s'applique également si un palier quelconque est interposé entre le dispositif de mesure du couple et l'arbre du moteur.

A.1 Correction à partir d'un essai avec le moteur fonctionnant à vide

A.1.1 Dynamomètre couplé

Faire fonctionner le moteur à la tension et à la fréquence assignées, couplé au dynamomètre, ce dernier étant hors tension.

Mesurer et enregistrer $P_{d,0}$, $I_{d,0}$, n , $T_{d,0}$ et $R_{d,0}$ ou la température θ (avec R déduit des mesures d'essai).

Déterminer le glissement (s) et

$$P_d = (I^2 R)_{d,0} = 1,5 \times I_{d,0}^2 \times R_{d,0}$$

A.1.2 Moteur désaccouplé

Faire fonctionner le moteur à la tension et à la fréquence assignées, désaccouplé du dynamomètre.

Mesurer et enregistrer P_0 , I_0 et R_0 ou la température θ (avec R déduit des mesures d'essai).

Déterminer:

$$P_s = (I^2 R)_0 = 1,5 \times I_0^2 \times R_0$$

A.1.3 Correction du dynamomètre

Déterminer la correction du couple du dynamomètre T_c en N·m comme suit:

$$T_c = \frac{(P_{d,0} - P_d - P_{fe})(1-s) - (P_0 - P_s - P_{fe})}{2\pi n} - T_{d,0}$$

où

n , $P_{d,0}$, P_d , s et $T_{d,0}$ sont conformes à A.1.1;

P_0 et P_s sont conformes à A.1.2;

P_{fe} est conforme à 8.2.2.3.3.

NOTE En pratique, T_d est principalement compensé par étalonnage du dynamomètre, de telle sorte que la valeur lue sur le dynamomètre soit 0,0 lorsque le couple de l'arbre est 0,0.

A.2 Correction à partir d'un essai avec le moteur désaccouplé

Désaccoupler le moteur essayé; le dispositif de couplage doit être couplé avec l'arbre du dynamomètre. Faire fonctionner le dynamomètre comme un moteur, avec refroidissement externe éventuel. La correction du dynamomètre T_c est égale au couple mesuré, avec des vitesses n égales à celles en charge à chacun des points de charge.

NOTE Cet essai n'est pas possible avec des dispositifs de charge fonctionnant comme une charge mécanique uniquement, par exemple des dynamomètres à courant de Foucault.

Annexe B (normative)

Calcul des valeurs pour la méthode Eh-star

Déterminer les tensions et courants complexes suivants à partir des résultats d'essai:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{UV} &= U_{UV} \\ U'_{WU} &= \frac{U_{VW}^2 - U_{WU}^2 - U_{UV}^2}{2 \cdot U_{UV}} \\ U''_{WU} &= \sqrt{U_{WU}^2 - U_{WU}'^2} \\ U'_{VW} &= -U_{UV} - U'_{WU} \\ U''_{VW} &= -U''_{WU} \\ I'_V &= -\frac{(P_{UV} - P_{VW}) + U_{WU} \cdot I_W}{U_{UV}}\end{aligned}$$

NOTE Dans l'équation ci-dessus, on suppose que le courant I_W est en phase avec la tension U_{WU} . Dans le cas où l'impédance de la résistance contient une composante réactive notable, utiliser la formule suivante

$$I'_V = -\frac{(P_{UV} - P_{VW}) + R_{eh} \cdot I_W^2}{U_{UV}}$$

où R_{eh} est la valeur mesurée de la composante résistive.

$$\begin{aligned}I''_V &= \sqrt{I_V^2 - I_V'^2} \\ k_1 &= \frac{1}{2 \cdot I_V^2} \cdot (I_W^2 - I_U^2 - I_V^2) \\ I'_U &= k_1 \cdot I'_V + \sqrt{(k_1^2 - \frac{I_U^2}{I_V^2})(I_V^2 - I_V'^2)} \\ I''_U &= \frac{k_1 I_V^2 - I'_U \cdot I'_V}{I_V''} \\ I'_W &= -I'_U - I'_V \\ I''_W &= -I''_U - I''_V\end{aligned}$$

Déterminer les tensions internes entre lignes à partir des tensions et courants entre lignes complexes:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{iUV} &= \underline{U}_{UV} + \frac{R_{VW}}{2} \cdot (I_V - I_U) \\ \underline{U}_{iVW} &= \underline{U}_{VW} + \frac{R_{VW}}{2} \cdot (I_W - I_V) \\ \underline{U}_{iWU} &= \underline{U}_{WU} + \frac{R_{VW}}{2} \cdot (I_U - I_W)\end{aligned}$$

Séparer en composantes directe et inverse entre lignes ($a = e^{j2\pi/3}$):

$$\underline{U}_{iLL(1)} = \frac{1}{3} \cdot (\underline{U}_{iUV} + \underline{a} \cdot \underline{U}_{iVW} + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{iWU})$$

$$\underline{U}_{iLL(2)} = \frac{1}{3} \cdot (\underline{U}_{iUV} + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{iVW} + \underline{a} \cdot \underline{U}_{iWU})$$

Déterminer les composantes directe et inverse de la tension de phase interne \underline{U}_i :

$$\underline{U}_{i(1)} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot e^{-j\frac{\pi}{6}} \cdot \underline{U}_{iLL(1)}$$

$$\underline{U}_{i(2)} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot e^{j\frac{\pi}{6}} \cdot \underline{U}_{iLL(2)}$$

Déterminer les tensions de phase internes asymétriques:

$$\underline{U}_{iU} = \underline{U}_{i(1)} + \underline{U}_{i(2)}$$

$$\underline{U}_{iV} = \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{i(1)} + \underline{a} \cdot \underline{U}_{i(2)}$$

$$\underline{U}_{iW} = \underline{a} \cdot \underline{U}_{i(1)} + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{i(2)}$$

Déterminer la résistance des pertes dans le fer:

$$R_{fe} = \frac{U_t^2}{P_{fe}}$$

où

U_t est selon 6.4.5.5

P_{fe} est selon 8.2.2.3.3

$$I_{feU} = \frac{U_{iU}}{R_{fe}}$$

$$I_{feV} = \frac{U_{iV}}{R_{fe}}$$

$$I_{feW} = \frac{U_{iW}}{R_{fe}}$$

Déterminer les courants de phase internes:

$$\underline{I}_{iU} = \underline{I}_U - \underline{I}_{feU}$$

$$\underline{I}_{iV} = \underline{I}_V - \underline{I}_{feV}$$

$$\underline{I}_{iW} = \underline{I}_W - \underline{I}_{feW}$$

Déterminer les composantes directe et inverse des courants de phase internes:

$$\underline{I}_{i(1)} = \frac{1}{3} \cdot (\underline{I}_{iU} + \underline{a} \cdot \underline{I}_{iV} + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{iW})$$

$$\underline{I}_{i(2)} = \frac{1}{3} \cdot (\underline{I}_{iU} + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{iV} + \underline{a} \cdot \underline{I}_{iW})$$

Les valeurs absolues du courant direct $I_{i(1)}$ doivent être inférieures à 30 % de la valeur absolue du courant inverse $I_{i(2)}$ afin d'obtenir des résultats précis. Si cette condition n'est pas satisfaite, l'essai doit être répété avec une valeur différente de R_{eh} .

Déterminer la puissance d'entrefer:

$$P_{\delta(1)} = 3 \cdot (U'_{i(1)} \cdot I'_{i(1)} + U''_{i(1)} \cdot I''_{i(1)})$$

$$P_{\delta(2)} = 3 \cdot (U'_{i(2)} \cdot I'_{i(2)} + U''_{i(2)} \cdot I''_{i(2)})$$

Déterminer les pertes supplémentaires en charge:

$$P_{Lr} = k \cdot [(1-s) \cdot (P_{\delta(1)} - P_{\delta(2)}) - P_{fw}]$$

$$\text{where } k = \frac{1}{1 + (I_{i(1)}/I_{i(2)})^2}$$

Annexe C (informative)

Types de systèmes d'excitation

Les types de systèmes d'excitation pris en compte pour la détermination des pertes dans l'excitatrice sont les suivants:

a) excitatrice entraînée par l'arbre

Une excitatrice à courant continu ou à courant alternatif est entraînée par l'arbre de l'unité principale, directement ou par un mécanisme d'entraînement. Lorsque l'unité principale est une machine synchrone, la puissance d'excitation est fournie à l'enroulement d'excitation par l'intermédiaire de bagues et de balais.

b) excitatrice sans balai

Une excitatrice à courant alternatif couplée à l'unité principale synchrone fournit l'enroulement de champ directement par l'intermédiaire de redresseurs tournants, en évitant les bagues et les balais. L'excitatrice peut être une génératrice synchrone ou une machine à induction.

La puissance d'excitation d'une excitatrice synchrone est déduite soit à partir d'une excitatrice pilote à courant alternatif couplée directement avec une excitation à aimants permanents, soit à partir d'un enroulement auxiliaire (secondaire) placé dans des encoches du stator de l'unité principale (pareil qu'en e), ou encore à partir d'une alimentation statique.

Une excitatrice à induction est connectée à une alimentation en tension alternative variable.

c) excitatrice tournante séparée

Une génératrice à courant continu ou alternatif faisant partie d'un groupe moteur-générateur séparé fournit le courant d'excitation à l'enroulement de champ de l'unité principale.

d) système d'excitation statique (excitatrice statique)

La puissance d'excitation est fournie à l'enroulement de champ de l'unité principale par une source statique comme des batteries ou un convertisseur statique de puissance alimenté par une source séparée.

e) excitation provenant d'un enroulement auxiliaire (excitatrice à partir d'un enroulement auxiliaire)

La puissance d'excitation pour une génératrice à courant alternatif est fournie par un enroulement auxiliaire (secondaire) placé dans des encoches du stator de l'unité principale, utilisant un flux fondamental ou harmonique, et alimente l'enroulement de champ par l'intermédiaire de redresseurs, de bagues et de balais.

Annexe D (normative)

Autres méthodes d'essai

D.1 Objet

Les procédures d'essai suivantes issues de la CEI 60034-2:1972 et de son amendement 1:1995 et de la CEI 60034-2A:1974 (définissant la CEI 60034-2A:1974 comme Article 17) et de son amendement 2:1996 ne sont pas incluses dans la présente CEI 60034-2-1:

Méthode du moteur taré

Essai de ralentissement

Méthode calorimétrique

Ces méthodes sont considérées comme applicables essentiellement aux grandes machines pour lesquelles la mise en œuvre d'autres méthodes est onéreuse. Elles seront intégrées dans la CEI 60034-2-2 qui est à l'étude. La présente annexe prévoit de retenir ces méthodes comme normative en attendant. La présente annexe sera supprimée à la publication de la CEI 60034-2-2 qui couvre la révision de ces méthodes.

D.2 Méthode du moteur taré

D.2.1 Définition

Essai dans lequel la puissance mécanique absorbée ou fournie par une machine électrique est calculée à partir de la puissance électrique fournie ou absorbée par une machine auxiliaire tarée accouplée mécaniquement à la machine en essai.

D.2.2 Méthode

La machine dont il s'agit de mesurer les pertes est séparée du réseau, désaccouplée de son moteur d'entraînement, s'il y a lieu, et entraînée à sa vitesse nominale par un moteur taré, c'est-à-dire par un moteur électrique dont les pertes ont été déterminées auparavant avec une grande précision, de manière à permettre de déterminer la puissance mécanique qu'il fournit sur son arbre, connaissant la puissance électrique qu'il absorbe et sa vitesse de rotation. La puissance mécanique transmise par le moteur taré à l'arbre de la machine essayée mesure les pertes de cette dernière pour les conditions de fonctionnement dans lesquelles est fait l'essai. Dans cette méthode, la machine essayée peut être à vide, excitée ou non excitée, avec ou sans balais, ou en court-circuit, ce qui permet de séparer certaines catégories de pertes.

En variante, le moteur taré peut être remplacé par un moteur dynamométrique, ou par un moteur quelconque entraînant la machine à essayer par un torsiomètre approprié permettant de connaître le couple transmis à la machine essayée et, par suite, la puissance mécanique absorbée par cette dernière.

D.2.3 Détermination du rendement

La machine tournant dans les conditions nominales de vitesse, tension et courant conformément au D.2.2, le rendement est pris égal au rapport de la puissance utile à la puissance absorbée.

L'essai doit être effectué: à une température aussi voisine que possible de celle atteinte en fonctionnement à la fin du temps spécifié dans le service nominal. Aucune correction de la température des enroulements ne doit être effectuée.

NOTE L'Article D.2 reprend, sans modifications techniques, le 4.4 et l'Article 13 de la CEI 60034-2:1972; de même que les 7.3.2, 9.3.2 et 11.3.2 de la CEI 60034-2, l'amendement 1:1995.

D.3 Méthode de ralentissement

D.3.1 Définition

Méthode d'essai dans laquelle les pertes d'une machine sont calculées à partir du taux de ralentissement de la machine lorsque n'interviennent que ces pertes.

Une méthode de ralentissement peut être utilisée pour déterminer les pertes séparées des machines électriques tournantes.

Les méthodes de détermination des pertes objet du présent article sont destinées particulièrement aux grandes machines synchrones mais les principes utilisés peuvent être appliqués également aux autres machines (machines asynchrones à courant alternatif et machines à courant continu disposant principalement d'une inertie de rotation appréciable) en tenant compte des pertes appropriées à ces machines.

La méthode de ralentissement est utilisée pour déterminer:

- la somme des pertes dues au frottement dans les paliers et les paliers de butée et des pertes totales par ventilation («les pertes mécaniques») dans les machines de tous types;
- la somme des pertes dans le fer et des pertes supplémentaires à vide dans les machines à courant continu et les machines synchrones;
- la somme des pertes en charge I^2R dans les enroulements primaires et des pertes supplémentaires en charge («les pertes en court-circuit») dans les machines synchrones.

D.3.2 Généralités

D.3.2.1 Principes essentiels

Les pertes totales P_t qui ralentissent la machine sont proportionnelles au produit de la vitesse à laquelle ces pertes correspondent et de la décélération à cette vitesse:

$$P_t = -Cn \frac{dn}{dt}$$

où

P_t représente les pertes totales pendant l'essai de ralentissement.

Quand n est donné en tr/min et P_t en kW, C est la constante de ralentissement:

$$C = \frac{4\pi^2 J}{60^2 10^3} = 10,97 \times 10^{-6} J$$

où

J est le moment d'inertie, en kg·m².

La décélération dn/dt peut être obtenue soit directement en utilisant un accéléromètre, soit indirectement par une des méthodes indiquées ci-dessous en D.3.2.2, D.3.2.3 et D.3.2.4.

D.3.2.2 Méthode de la corde

Cette méthode nécessite la mesure de l'intervalle de temps ($t_2 - t_1$) pendant lequel la vitesse de la machine à l'essai ralentit à partir de $n_N \cdot (1 + \delta)$ jusqu'à $n_N \cdot (1 - \delta)$, voir la Figure D.1. Le rapport de l'intervalle de vitesse $2 \delta n_N$ à l'intervalle de temps $t_2 - t_1$ donne approximativement la dérivée de la vitesse par rapport au temps à la vitesse assignée:

$$\frac{2\delta n_N}{n_2 - n_1} \approx - \frac{dn}{dt} \Big|_{n = n_N}$$

où

δ est la déviation relative de la vitesse rapportée à la vitesse assignée.

La valeur de δ ne doit pas être supérieure à 0,1 et peut devoir être inférieure selon les caractéristiques de la machine.

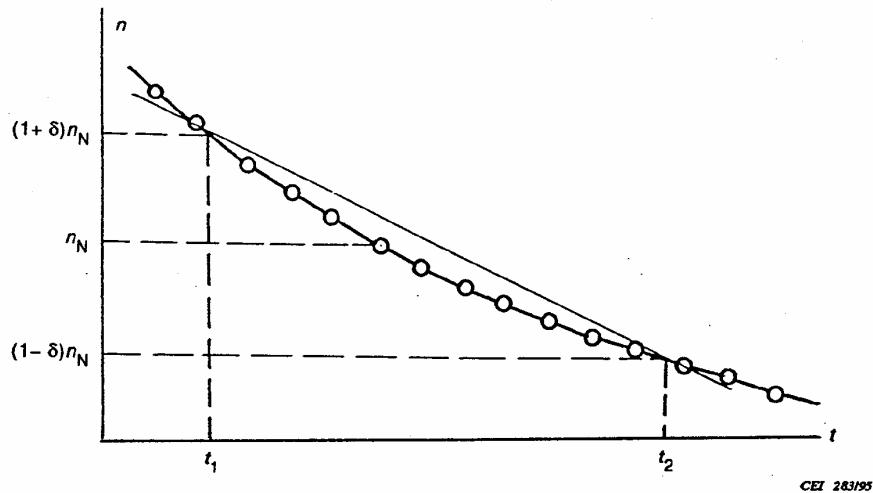


Figure D.1 – Méthode de la corde

D.3.2.3 Méthode de la sécante limite

Cette méthode est une variante de la méthode de la corde destinée aux cas où la vitesse ne peut être augmentée au-dessus de la valeur assignée. Pour t_1 il faut prendre l'instant où la vitesse de rotation à la valeur assignée n_N et pour t_2 les instants où elle prend les valeurs $n_N \cdot (1 - \delta)$. La déviation δ prend des valeurs successives décroissantes et la dérivée de la vitesse de rotation par rapport au temps est la limite du coefficient angulaire de la corde passant par les points t_1 et t_2 lorsque δ tend vers zéro, voir la Figure D.2.

$$\lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\delta n_N}{t_2 - t_1} \approx - \left. \frac{dn}{dt} \right|_{n = n_N}$$

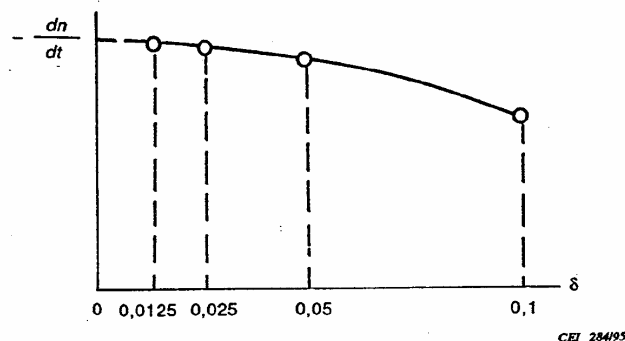


Figure D.2 – Méthode de la sécante limite

D.3.2.4 Méthode de la vitesse de rotation moyenne

Si t_1 , t_2 et t_3 sont les instants successivement enregistrés, et N les tours complets de l'arbre entre deux lectures successives, les valeurs moyennes de la vitesse pendant les intervalles de temps seront:

$$\bar{n}_{12} = \frac{60 N}{t_2 - t_1} \quad \text{et} \quad \bar{n}_{23} = \frac{60 N}{t_3 - t_2}$$

et la décélération de l'arbre à un instant intermédiaire t_2 est

$$\frac{dn}{dt} = 2 \frac{\bar{n}_{23} - \bar{n}_{12}}{t_3 - t_1}$$

Les valeurs calculées de décélération sont tracées en fonction des valeurs moyennes de la vitesse de rotation. La valeur de décélération à la vitesse assignée est déterminée à partir de la courbe.

D.3.3 Composition des essais de ralentissement

D.3.3.1 Composition des essais avec le moment d'inertie connu

Quand le moment d'inertie d'une partie tournante de la machine est connu par mesure ou par calcul, deux essais de base de ralentissement sont suffisants pour une machine à courant continu: machine non excitée et machine tournant à vide et excitée pour obtenir la tension assignée à la vitesse assignée. Pour une machine synchrone on ajoute un troisième essai de ralentissement avec l'enroulement d'induit en court-circuit, l'excitation étant réglée pour obtenir le courant d'induit assigné.

Le premier essai donne les pertes mécaniques P_{fw} (par frottement et par ventilation) de la machine à l'essai à partir de la formule:

$$P_{fw} = -C n_N \left. \frac{dn}{dt} \right|_1$$

Le deuxième essai donne les pertes mécaniques P_{fw} et les pertes dans le fer P_{fe} à partir de la formule:

$$P_{fw} + P_{fe} = -C n_N \left. \frac{dn}{dt} \right|_2$$

Le troisième essai donne les pertes mécaniques P_{fw} et les pertes en court-circuit P_k à partir de la formule:

$$P_{fw} + P_k = -C n_N \left. \frac{dn}{dt} \right|_3$$

Dans les formules ci-dessus

$$\left. \frac{dn}{dt} \right|_1, \quad \left. \frac{dn}{dt} \right|_2, \quad \left. \frac{dn}{dt} \right|_3$$

sont les valeurs de la dérivée de la vitesse par rapport au temps respectivement dans les premier, deuxième et troisième essais.

On définit les pertes dans le fer comme la différence des pertes mesurées dans les deuxième et premier essais.

La somme des pertes I^2R et des pertes supplémentaires dans l'enroulement induit est déterminée comme la différence des pertes mesurées dans les troisième et premier essais. La séparation de cette somme en composants, si besoin était, peut être faite en retranchant de

celle-ci les pertes I^2R dans les enroulements d'induit calculées par la résistance de l'enroulement d'induit correspondant à la température d'essai. Pour cette raison, la température de l'enroulement doit être déterminée par une méthode appropriée immédiatement après chaque essai de ralentissement avec l'enroulement d'induit en court-circuit.

D.3.3.2 Composition des essais avec le moment d'inertie inconnu

Si le moment d'inertie de la partie tournante d'une machine est inconnu ou si cette machine est couplée mécaniquement à d'autres parties tournantes, par exemple une turbine, dont l'inertie est inconnue, des essais supplémentaires doivent être effectués pour déterminer la constante de ralentissement C .

S'il est possible de faire fonctionner la machine à l'essai en moteur à vide alimenté par une source de tension, de nombre de phases et de fréquence convenables (dans le cas d'une machine à courant alternatif) et de mesurer la puissance appliquée, égale à la somme des pertes mécaniques P_{fw} et des pertes dans le fer P_{fe} du fait que les pertes I^2R dans l'enroulement d'induit sont habituellement ignorées, alors la constante de ralentissement C est déterminée à partir de la formule:

$$C = \frac{P_{fw} + P_{fe}}{n_N \left. \frac{dn}{dt} \right|_2}$$

Si la mesure de la puissance est difficile du fait des oscillations de fréquence d'une source d'alimentation, elle peut être remplacée par la mesure de l'énergie apportée à la machine à l'essai à l'aide d'un compteur. De ce fait, il est nécessaire de faire tourner la machine pendant quelque temps dans des conditions d'alimentation constantes.

S'il est impossible de faire fonctionner la machine à l'essai en moteur à vide, il faut ajouter aux trois essais de ralentissement considérés en D.3.3.1 un quatrième essai de ralentissement. La machine à l'essai dans ce cas est ralentie par des pertes P qui peuvent être mesurées et qui sont du même ordre que les pertes attendues P_{fe} et P_k . Dans ce but, on peut utiliser les pertes à vide ou en court-circuit d'un transformateur connecté, qui sont mesurées séparément. En variante, on peut utiliser la charge d'une excitatrice ou d'une génératrice auxiliaire montée sur l'arbre de la machine essayée et débitant sur une résistance ballast.

Lorsque la machine essayée est ralentie par les pertes à vide du transformateur, et que les pertes en court-circuit de la machine à l'essai correspondant au courant à vide du transformateur sont négligées, alors

$$P_{fw} + P_{fe} + P = -C n_N \left. \frac{dn}{dt} \right|_4 ;$$

donc

$$C = \frac{P}{n_N \left\{ \left. \frac{dn}{dt} \right|_4 - \left. \frac{dn}{dt} \right|_2 \right\}}$$

Lorsque la machine à l'essai est ralentie par les pertes en court-circuit du transformateur, et que les pertes dans le fer de la machine à l'essai correspondant au flux magnétique de court-circuit du transformateur sont habituellement négligées. Donc

$$P_{fw} + P_k + P = -C n_N \left. \frac{dn}{dt} \right|_5 ;$$

et

$$C = \frac{P}{n_N \left\{ \left. \frac{dn}{dt} \right|_5 - \left. \frac{dn}{dt} \right|_3 \right\}}$$

Lorsque la machine à l'essai est ralentie par la charge d'une excitatrice ou d'une génératrice auxiliaire sur la résistance ballast, les pertes causant le ralentissement ne comportent que les pertes par frottement P_{fw} de la machine à l'essai et de la charge mesurée P (compte tenu du rendement de la machine de charge qui peut être déduit de calculs). Donc:

$$P_{fw} + P = -C n_N \left. \frac{dn}{dt} \right|_6 ;$$

de sorte que

$$C = \frac{P}{n_N \left\{ \left. \frac{dn}{dt} \right|_6 - \left. \frac{dn}{dt} \right|_1 \right\}}$$

D.3.4 Procédure d'essai de ralentissement

D.3.4.1 Etat d'une machine à l'essai pendant les essais de ralentissement

Une machine à l'essai doit être assemblée complètement comme pour le fonctionnement normal. Les paliers doivent être «rodés» avant l'essai. La température du fluide de refroidissement doit être ajustée autant que possible à la température normale à laquelle il est nécessaire de mesurer les pertes par ventilation par l'ajustement du débit du fluide de refroidissement. Les températures des paliers doivent être ajustées à la température normale à laquelle les paliers fonctionnent avec la charge assignée, par l'ajustement du débit du fluide de refroidissement.

D.3.4.2 Machine à l'essai couplée avec d'autres mécanismes

Si possible, la machine à l'essai doit être désaccouplée des machines connectées mécaniquement, par exemple d'une turbine dans le cas d'un générateur hydraulique. Si la machine ne peut pas être désaccouplée, il faut prendre toutes les mesures pour réduire les pertes mécaniques dans ce mécanisme, par exemple, par son démontage partiel. Dans le cas d'un générateur hydraulique, l'eau doit être évacuée de la chambre de la roue de turbine. De même, il faut prendre des mesures pour éliminer la possibilité de l'écoulement de l'eau du côté de l'amont et de son aspiration par la roue motrice tournante de la turbine du côté de l'aval. La rotation de la roue motrice tournante de la turbine dans l'air produit des pertes par ventilation qui peuvent être appréciées par l'expérimentation ou par les calculs par accord entre le constructeur et l'acheteur.

D.3.4.3 Rotation d'une machine à l'essai

Dans certains cas, la machine à l'essai peut être entraînée par sa turbine, par exemple, dans le cas d'une turbine Pelton, où le courant d'eau vers la roue peut être interrompu instantanément. Toutefois, la machine à l'essai fonctionne en général en moteur à vide alimenté par une source séparée avec une vitesse variable dans de larges proportions. Dans tous les cas, la machine à l'essai doit être excitée par une source indépendante avec un contrôle de tension rapide et précis. L'excitation par l'excitatrice accouplée mécaniquement n'est pas en principe recommandée mais peut être permise au cas où la déviation δ de la vitesse est relativement faible, par exemple, si elle ne dépasse pas 0,05. Dans tous les cas, il faut tenir compte des pertes dans les excitatrices couplées à l'arbre de la machine à l'essai.

D.3.4.4 Procédures réalisées avant le début des essais

Chaque essai débute en augmentant rapidement la vitesse de la machine à l'essai jusqu'à une valeur dépassant la limite $n_N \cdot (1 + \delta)$ d'une quantité telle que pendant le ralentissement jusqu'à cette vitesse la machine puisse être placée dans les conditions exigées, notamment:

- la machine est déconnectée d'une source d'alimentation;
- en cas de ralentissement par les pertes mécaniques uniquement, le champ de la machine à l'essai est supprimé;

- en cas de ralentissement par la somme des pertes mécaniques et des pertes en court-circuit, le champ est supprimé, les bornes de l'enroulement d'induit sont court-circuitées et la machine est excitée au courant de court-circuit présélectionné;
- en cas de ralentissement par les pertes d'un transformateur la machine à l'essai est connectée au transformateur préalablement placé dans un certain état (à vide ou en court-circuit) après la suppression du champ et excitée aux valeurs présélectionnées de courant ou de tension à vide;
- en cas de ralentissement par les pertes en charge de l'excitatrice ou d'une génératrice auxiliaire montée sur l'arbre de la machine, le champ de la machine à l'essai est supprimé et la charge spécifiée est établie simultanément.

Dans tous les cas indiqués ci-dessus, un délai suffisant doit séparer le déclenchement de la source d'alimentation et l'origine des mesures, pour que les régimes transitoires électromagnétiques soient amortis.

En cas de ralentissement par la somme des pertes mécaniques, des pertes dans le fer ou par les pertes à vide d'un transformateur, aucune procédure n'est exigée après le déclenchement de la machine à l'essai d'une source, si l'excitation de la machine à l'essai correspond à la tension à vide présélectionnée, et, dans le cas d'une machine synchrone, à la vitesse assignée et au facteur de puissance unité.

D.3.4.5 Procédures au cours du ralentissement

Les lectures de tous les dispositifs de mesure utilisés pour chaque essai (ampèremètre du courant d'excitation, voltmètre de la tension à vide, ampèremètre du courant de court-circuit) ainsi que les lectures de tous les instruments exigés pour mesurer la puissance lors des essais supplémentaires de ralentissement lorsque le moment d'inertie J est inconnu, doivent être prises au moment du passage de la machine à l'essai à la vitesse assignée; en cas de ralentissement d'une machine non excitée aucune lecture n'est exigée pour l'instant.

Les valeurs mesurées de la tension à vide et du courant de court-circuit ne doivent pas différer des valeurs présélectionnées de ± 2 %. La valeur finale calculée de la dérivée de la vitesse par rapport au temps pour chacun des essais doit être ramenée aux valeurs présélectionnées à partir d'une loi proportionnelle au carré du rapport de la valeur présélectionnée à celle mesurée.

D.3.4.6 Programme d'essais de ralentissement

Les essais de ralentissement doivent être effectués en série sans interruption, autant que possible. Il est recommandé de commencer et de terminer chaque série d'essais par des essais de ralentissement avec la machine non excitée. Si pour quelque raison, l'exécution continue des essais n'est pas possible, il est alors recommandé de commencer et de terminer chaque série d'essais par des essais de ralentissement sur une machine non excitée.

Les essais peuvent être soit répétés plusieurs fois avec les mêmes valeurs présélectionnées de tension à vide ou du courant de court-circuit, par exemple les valeurs assignées, soit réalisés avec des valeurs variant dans des limites étroites, par exemple de 95 % à 105 % des valeurs assignées. Dans le premier cas, les valeurs moyennes arithmétiques obtenues à partir de toutes les mesures sont réputées les valeurs réelles mesurées de chaque type de pertes. Dans le deuxième cas, les valeurs sont portées sur une courbe en fonction de la tension et du courant. Les valeurs réelles mesurées des pertes sont réputées celles qui correspondent aux valeurs présélectionnées de tension ou de courant sur les courbes tracées.

Les essais supplémentaires de ralentissement lorsque le moment d'inertie de la machine à l'essai n'est pas connu, doivent être effectués aux mêmes valeurs de tension ou de courant que celles obtenues à vide ou en court-circuit. Si cela n'est pas possible, les valeurs respectives doivent être déterminées à partir des courbes comme indiqué ci-dessus.

D.3.5 Exécution des mesures

D.3.5.1 Méthodes de mesure

Le but des mesures effectuées au cours d'essais de ralentissement est l'obtention de la valeur cherchée de la dérivée de la vitesse par rapport au temps et peut être obtenue par une des trois méthodes:

a) par la méthode accélérométrique - mesure directe de la décélération en fonction du temps:

$$\frac{dn}{dt} = f(t);$$

b) par la méthode tachymétrique - mesure de la vitesse en fonction du temps:

$$n = f(t);$$

c) par la méthode chronographique - mesure du déplacement angulaire de l'arbre de la machine à l'essai en fonction du temps:

$$n = f(t).$$

Les dispositifs de mesure peuvent être utilisés dans tous les cas pour l'enregistrement continu aussi bien que discontinu des valeurs à mesurer et du temps.

D.3.5.2 Méthode accélérométrique

La fonction vitesse par rapport au temps pour les grandes machines ayant un circuit de ventilation compliqué peut ne pas être complètement uniforme. De ce fait, les valeurs instantanées de décélération au cours du ralentissement au moment du passage à la vitesse assignée peuvent être aléatoires. Par conséquent, les vraies valeurs de la dérivée de la vitesse par rapport au temps peuvent être déterminées par la courbe des décélérations mesurées par rapport au temps ou à la vitesse et en utilisant une courbe appropriée fournie ou une technique de corrélation.

D.3.5.3 Méthode tachymétrique

Une courbe de la vitesse en fonction du temps est obtenue suivant les résultats des mesures. Sur cette courbe, on définit les instants auxquels cette vitesse prend les valeurs indiquées pour les méthodes de la corde ou de la sécante limite. Les intervalles de temps entre les instants correspondants à la vitesse inférieure et à la vitesse supérieure sont utilisés pour le calcul des valeurs de décélération pendant le ralentissement.

Si sur l'arbre de la machine essayée il y a une excitatrice ou une autre machine électrique, elle peut être utilisée comme génératrice tachymétrique à condition que le signal de tension ne pulse pas avec la vitesse de rotation de la machine à l'essai. L'excitation doit être alimentée par une source stable de courant continu, par exemple par une batterie d'accumulateurs séparée.

Lorsque le signal de tension pulse avec la vitesse, ou lorsqu'une telle machine sur l'arbre de la machine en essai est absente, une machine à courant continu peut être couplée. Elle peut être entraînée par l'arbre de la machine à l'essai au moyen d'une transmission par courroie sans soudure ou par une autre méthode assurant une rotation uniforme.

Les lectures de vitesse peuvent être relevées soit aux intervalles de temps exacts spécifiés par les méthodes respectives, de ce fait il n'y a aucun besoin d'un enregistrement spécial de temps, soit avec les signaux de l'arbre de la machine à l'essai; dans ce cas les lectures de temps doivent être enregistrées simultanément avec les lectures de la vitesse. Il n'y a aucun besoin de faire les relevés à chaque révolution de l'arbre; en général 30 à 40 lectures pendant la totalité de l'essai sont tout à fait suffisantes.

Lorsque des instruments de mesure de haute précision sont disponibles, la mesure de vitesse de rotation peut être remplacée par la mesure des valeurs instantanées de vitesse ou de la période de la tension de la machine à l'essai ou de toute autre machine à courant

alternatif couplée sur son arbre; il n'est pas nécessaire que le nombre de paires de pôles des deux machines soit égal.

D.3.5.4 Méthode chronographique

Les compteurs de temps utilisés peuvent être des indicateurs visuels avec mouvement continu (non pas-à-pas) du pointeur ou des indicateurs digitaux avec imprimantes (électriques ou mécaniques).

Les enregistrements du temps doivent être effectués en fonction des signaux obtenus à partir de l'arbre de la machine essayée, soit pour un tour complet de l'arbre, soit pour un nombre entier de tours.

NOTE Lorsque, en utilisant la méthode tachymétrique, les indications de vitesse sont obtenues d'après les signaux provenant de l'arbre de la machine à l'essai, les lectures du temps peuvent réunir la méthode chronographique et la méthode tachymétrique dans le but de leur contrôle mutuel.

Dans certains cas, lorsque le groupe a des caractéristiques de décélération uniforme, une précision suffisante peut être obtenue par la mesure du temps de ralentissement entre deux vitesses présentant la même différence par rapport à la vitesse assignée

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\Delta n}{\Delta t}$$

La fréquence de tension au stator assure la meilleure détermination de la vitesse sur une machine synchrone.

D.3.5.5 Mesure des pertes dans les paliers

Les pertes dans les paliers et dans les paliers de butée peuvent être soustraites de la somme totale des pertes par frottement, si exigé. Elles peuvent être déterminées par la méthode calorimétrique conformément à la CEI 60034-2A. Si la machine à l'essai utilise le refroidissement direct pour les paliers, ces pertes sont distribuées entre la machine à l'essai et toute autre machine couplée mécanique, par exemple une turbine, proportionnellement aux masses de leurs parties tournantes. En l'absence de refroidissement direct la distribution des pertes dans les paliers peut être déterminée d'après les formules empiriques par accord entre constructeur et acheteur.

NOTE L'Article D.3 reprend, sans modifications techniques, le 4.7 de la CEI 60034-2:1972; et l'Article 15 de la CEI 60034-2, l'amendement 1:1995.

D.4 Méthode calorimétrique

D.4.1 Définition

Méthode d'essai dans laquelle on détermine les pertes de la machine à partir de la quantité de chaleur qu'elles produisent. Les pertes sont calculées à partir du produit de la quantité de réfrigérant par son échauffement, et le cas échéant de la quantité de chaleur dissipée à l'extérieur.

NOTE Le paragraphes D.4.1 reprend le 4.8 de la CEI 60034-2:1972.

D.4.2 Méthode

Conformément à la CEI 60034-2A 1974 (dénommée Article 17 dans la CEI 60034-2, amendement 1 1995).

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

3, rue de Varembé
P.O. 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