

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

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

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



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2010 IEC, Geneva, Switzerland

All rights reserved. Unless otherwise specified, no part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester.

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

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de la CEI ou du Comité national de la CEI du pays du demandeur.

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

IEC Central Office
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland
Email: inmail@iec.ch
Web: www.iec.ch

About the IEC

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

About IEC publications

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

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

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 It also gives information on projects, withdrawn and replaced publications.

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

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

- Electropedia: www.electropedia.org

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

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

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

Email: csc@iec.ch

Tel.: +41 22 919 02 11

Fax: +41 22 919 03 00

A propos de la CEI

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

A propos des publications CEI

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

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

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

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

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

- Electropedia: www.electropedia.org

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

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

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

Email: csc@iec.ch

Tél.: +41 22 919 02 11

Fax: +41 22 919 03 00



IEC 60034-2-2

Edition 1.0 2010-03

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

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

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

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX

U

ICS 29.160

ISBN 2-8318-1083-4

CONTENTS

FOREWORD.....	3
1 Scope.....	5
2 Normative references	5
3 Terms and definitions	5
4 Symbols	6
4.1 Quantities.....	6
4.2 Subscripts	6
5 Basic requirements.....	7
5.1 Direct and indirect efficiency determination	7
5.1.1 Direct	7
5.1.2 Indirect.....	7
5.2 Uncertainty.....	7
5.3 Preferred methods.....	7
6 Common determinations	8
6.1 Efficiency	8
6.2 Total loss	8
6.3 Load losses	9
7 Methods	9
7.1 Calibrated machine method	10
7.1.1 General	10
7.1.2 Machine calibration	10
7.1.3 Test procedure	10
7.1.4 Determination of performance.....	11
7.2 Retardation method	12
7.2.1 Fundamentals.....	12
7.2.2 Test procedure	12
7.2.3 Determination of deceleration	14
7.2.4 Determination of retardation constant	15
7.2.5 Determination of losses	16
7.3 Calorimetric method	17
7.3.1 General	17
7.3.2 Calorimetric instrumentation	19
7.3.3 Test procedure	22
7.3.4 Determination of losses	22
Figure 1 – Method of the chord	15
Figure 2 – Reference surface.....	18
Figure 3 – Four coolers connected in parallel, single calorimeter, single coolant.....	20
Figure 4 – Series connected coolers, two coolants.....	20
Figure 5 – Bypass piping	21
Figure 6 – Parallel piping	21
Figure 7 – Characteristics of pure water as a function of temperature	23
Table 1 – Preferred methods for large machines	8

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

ROTATING ELECTRICAL MACHINES –**Part 2-2: Specific methods for determining
separate losses of large machines from tests –
Supplement to IEC 60034-2-1**

FOREWORD

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

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

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

FDIS	Report on voting
2/1585/FDIS	2/1595/RVD

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

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

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

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

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

ROTATING ELECTRICAL MACHINES –

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

1 Scope

This part of IEC 60034 applies to large rotating electrical machines and establishes additional methods of determining separate losses and to define an efficiency supplementing IEC 60034-2-1. These methods apply when full-load testing is not practical and result in a greater uncertainty.

NOTE In situ testing according to the calorimetric method for full-load conditions is recognized.

The specific methods described are:

- Calibrated-machine method.
- Retardation method.
- Calorimetric method.

2 Normative references

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

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

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

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC 60034-1 and IEC 60034-2-1 apply, as well as the following.

3.1

calibrated machine

machine whose mechanical power input/output is determined, with low uncertainty, using measured electrical output/input values according to a defined test procedure

3.2

calibrated-machine method

method in which the mechanical input/output to/from an electrical machine under test is determined from the measurement of the electrical input/output of a calibrated machine mechanically coupled to the test machine

3.3

retardation method

method in which the separate losses in a machine under test are deduced from the measurements of the deceleration rate of its rotating components when only these losses are present

3.4

calorimetric method

method in which the losses in a machine are deduced from the measurements of the heat generated by them

3.5

thermal equilibrium

the state reached when the temperature rises of the several parts of the machine do not vary by more than a gradient of 2 K per hour

[IEV 411-51-08]

4 Symbols

In addition to the symbols in IEC 60034-2-1, the following apply.

4.1 Quantities

A	is an area, m^2 ,
C	is the retardation constant, $\text{kg m}^2 \text{min}^2$,
c_p	is the specific heat capacity of the cooling medium, $\text{J}/(\text{kg K})$,
h	is the coefficient of heat transfer, $\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$,
J	is the moment of inertia, kg m^2 ,
n	is the speed, min^{-1} ,
P_{1E}	is the excitation power supplied by a separate source, W ,
P_k	is the constant loss, W ,
P_{el}	is the electrical power, excluding excitation, W ,
P_e	is the excitation power, W ,
P_{Fe}	is the iron loss, W ,
P_{fw}	is the friction and windage loss, W ,
P_{sc}	is the short-circuit loss, W ,
P_{mech}	is the mechanical power, W ,
P_T	is the total loss, W ,
Q	is the volume rate of flow of the cooling medium, m^3/s ,
t	is the time, s ,
v	is the exit velocity of cooling medium, m/s ,
Δp	is the difference between the static pressure in the intake nozzle and ambient pressure, N/m^2 ,
$\Delta\theta$	is the temperature rise of the cooling medium, or the temperature difference between the machine reference surface and the external ambient temperature, K ,
δ	is the per unit deviation of rotational speed from rated speed,
ρ	is the density of the cooling medium, kg/m^3 ,
θ	is the temperature, $^{\circ}\text{C}$.

4.2 Subscripts

irs	for inside reference surface,
ers	for outside reference surface,
E	for exciter,
c	for the cooling circuit,

- N for rated values,
- rs for the reference surface,
- t for a test procedure,
- 1 for input or initial condition,
- 2 for output condition.

5 Basic requirements

5.1 Direct and indirect efficiency determination

Tests can be grouped in the following categories.

5.1.1 Direct

Input-output measurements on a single machine are considered to be direct. This involves the measurement of electrical or mechanical power into, and mechanical or electrical power out of a machine.

5.1.2 Indirect

Measurements of the separate losses in a machine under a particular condition are considered to be indirect. 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 loss shall be carried out by one of the following methods:

- direct measurement of total loss;
- summation of separate losses.

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 for large machines are given in Table 1.

Table 1 – Preferred methods for large machines

Quantity to be determined	Test method	Clause	Uncertainty
Direct efficiency	Calibrated machine	7.1.4.1	medium
Total losses	Calorimetric ¹	7.3.3d)	low/medium
Friction and windage loss	Calibrated machine	7.1.4.2a)	medium
	Retardation	7.2.5.2	medium
	Calorimetric	7.3.3a)	low/medium
Active iron loss, and additional open-circuit losses in d.c. and synchronous machines	Calibrated machine	7.1.4.2b)	medium
	Retardation	7.2.5.3	medium
	Calorimetric	7.3.3b)	low/medium
Winding and additional-load losses	Calibrated machine	7.1.4.2c)	medium
	Retardation	7.2.5.5	medium
	Calorimetric	7.3.3c)	low/medium

6 Common determinations

These determinations are applicable to more than one of the listed methods.

6.1 Efficiency

Efficiency is:

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

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 the total loss according to 6.2.

NOTE 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: $P_1 = P_{mech}$; $P_2 = P_{el}$.

NOTE 2 P_T includes the excitation power P_e of the machine where applicable.

6.2 Total loss

When the total loss is determined as the sum of the separate losses the following formulae apply:

For direct current machines:

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

¹ If the relative error in P_{irs} (see 7.3.1) is likely to be greater than 3 %, the calorimetric method is not recommended.

$$P_e = P_f + P_E$$

$$P_k = P_{fw} + P_{Fe}$$

For induction machines:

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

$$P_k = P_{fw} + P_{Fe}$$

For synchronous machines:

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

$$P_e = P_f + P_E + P_b$$

$$P_k = P_{fw} + P_{Fe}$$

where:

- P_a is the I^2R armature-winding loss (interpole, compensation and series field winding loss in case of d.c. machines),
- P_b is the brush loss,
- P_E is the exciter loss,
- P_e is the excitation power,
- P_f is the excitation (field winding) loss,
- P_{Fe} is the iron loss,
- P_{fw} is the friction and windage loss,
- P_k is the constant loss,
- P_{LL} is the additional load loss,
- P_r is the I^2R rotor winding loss,
- P_s is the stator I^2R winding loss,
- P_T is the total loss.

6.3 Load losses

Losses relative to machine load (with lowest uncertainty) are best determined from actual measurements. For example: measurements of current, resistance, etc. under full-load operation.

When this is not possible, these values shall be obtained from calculation of the parameters during the design stage.

Determination of losses not itemized in this part may be found in IEC 60034-2-1.

7 Methods

For the determination of performance when machine load and/or size exceed test capabilities (described in IEC 60034-2-1), the following test methods may be used.

NOTE These methods are generally applicable to large machines where the facility cost for other methods is not economical.

7.1 Calibrated machine method

The calibrated machine method may be used to determine the test machine efficiency either directly or by separate losses.

7.1.1 General

This method is generally applied as a factory test.

This method requires a calibrated machine mechanically coupled to the machine under test and is used when neither a torque meter nor dynamometer is available. The mechanical input of the tested machine is calculated from the electrical input of the calibrated machine.

7.1.2 Machine calibration

When a gear-box is directly connected to the machine it shall be considered as part of the calibrated machine.

Calibrate an electric machine, preferably a direct-current machine, according to one of the procedures in IEC 60034-2-1 at a sufficient number of thermally stable loads (including no-load) to determine an accurate relationship of output power as a function of input power adjusted for the temperature of the cooling air/medium at inlet. This is generally developed in the form of a curve.

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

7.1.3 Test procedure

The tested machine shall be equipped with winding ETDs.

The tested machine shall be completely assembled with essential components as for normal operation.

Before starting the test, record the winding resistances and the ambient temperature.

The machine for which the performance is to be determined shall be mechanically coupled to the calibrated machine and be operated at a speed equivalent to its synchronous/rated speed.

Operate the calibrated machine with the test machine at either rated-load, partial-load; no-load not excited, with or without brushes; no-load excited at rated voltage; or short-circuited, which enables specific categories of losses to be determined.

When the test machine is operated at each specified test condition and has reached thermal stability, record:

NOTE The following example represents testing with a motor as the calibrated machine.

– for the calibrated machine

P_1 = power

U_1 = input voltage

I_1 = current

θ_{1c} = temperature of inlet cooling air

θ_{1w} = winding temperature (by variation of resistance if possible)

n_1 = speed

– for the test machine (direct determination as a generator)

P_2 = output power

U_2 = output voltage

I_2 = armature load current

θ_{2w} = windings temperature (either directly by ETDs or by resistance variation)

n_2 = speed

- for the unloaded test machine (as a generator)

U_2 = armature voltage (when excited open-circuit)

I_2 = armature current (when excited short-circuit)

θ_{2w} = windings temperature (either directly by ETDs or by resistance variation)

n_2 = speed

Upon completion of each test, stop the machines and record in the given order:

- test machine winding resistance;
- calibrated machine winding resistance.

Finally operate the calibrated machine without electrical connection to the test machine and record as specified above.

7.1.4 Determination of performance

From the curve developed in 7.1.2 and using the calibrated machine input values, select the appropriate output power to the test machine.

Adjust the output power for the standardized coolant temperature.

Determination of excitation power shall be in accordance with IEC 60034-2-1.

7.1.4.1 Direct efficiency determination

When tested according to 7.1.3 the test machine efficiency is:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \text{ test machine working as a generator, calibrated machine working as a motor}$$

where

P_2 is the output power of test generator

P_1 is the calculated input power to the test generator according to 7.1.3.

and:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \text{ test machine working as a motor, calibrated machine working as a generator}$$

where

P_1 is the input power to test motor

P_2 is the calculated output power from the test motor.

7.1.4.2 Separate losses

Using values of P determined from the calibrated machine curve, it is possible to determine the power dissipated by the test machine for other selected conditions that may be used to determine efficiency according to 6.1.

- a) Friction and windage loss at rated speed (when the test machine is not electrically connected);
- b) Active iron loss, and additional open-circuit losses in d.c. and synchronous machines, (when tested at no-load, open-circuit, excited at rated voltage, minus the windage and friction loss). Field losses from a separate source;
- c) Armature-winding loss and additional-load loss in synchronous machines, (when tested under short-circuit conditions, excited at rated armature current, minus the windage and friction loss). Field losses from a separate source.

7.2 Retardation method

The retardation method can be used in determining the separate losses of rotating electrical machines having an appreciable rotational inertia.

The retardation method is used to determine:

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

7.2.1 Fundamentals

The recorded test loss P_t which retards the machine is proportional to the product of the speed at which this loss corresponds and the deceleration at that speed:

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

where:

- P_t is the loss being measured, W;
- C is the retardation constant according to 7.2.4;
- n is the speed, min^{-1} ;
- dn/dt is the deceleration from 7.2.3.

NOTE The accuracy of the retardation method is directly related to the accuracy of the retardation constant C which depends solely on the moment of inertia J (see 7.2.4).

7.2.2 Test procedure

7.2.2.1 Assembly of test machine

The test machine shall be assembled, with all essential components, as for normal operation, but uncoupled from other rotating parts. A suitable speed sensor shall be attached to the rotating element.

NOTE When the machine cannot be uncoupled, all possible steps should be taken to reduce the mechanical losses in other rotating parts, e.g. by partial dismantling or in the case of a water turbine, by preventing water in the runner chamber. Rotation of the runner in air produces a windage loss which should be determined either experimentally or from calculations.

7.2.2.2 Machine preparation for test

Electrically connect the test machine as a motor (on no-load) fed from a separate power source having a wide range of variable frequency. Any excitation shall be obtained from a separate source with a rapid and precise voltage control.

NOTE 1 The test machine may be driven by its normal prime mover, e.g. by Pelton turbine when the water supply to the runner can be cut off instantly.

NOTE 2 Excitation from a mechanically-coupled exciter is not recommended, but may be permitted when the value of the deviation of speed δ does not exceed 0,05. Losses in exciters coupled to the shaft of the test machine are to be taken into account.

The bearing temperatures shall be adjusted to the normal temperature at which the bearings operate with rated load, by adjusting the coolant flow.

The air temperature shall be adjusted, whenever possible, to the normal temperature at which the windage loss measurement is required by throttling the air coolant flow.

7.2.2.3 Testing preparation

Retardation tests shall be conducted as a series without interruption, whenever possible. It is recommended that the series start and finish with retardation tests of the test machine unexcited.

All tests shall be repeated several times at the preset rated values of open-circuit voltage or short-circuit current. The arithmetic mean value obtained from each series of measurements shall be assumed to be the appropriate loss value of that category of loss.

Select a value of δ (the per unit deviation of rotational speed from rated speed) which shall not be greater than 0,1 and may have to be less than this, depending on the characteristics of the machine.

7.2.2.4 Tests

Rapidly accelerate the test machine to a speed above $n_N (1 + \delta)$. Disconnect the machine from its supply source. Sufficient time delay shall separate the switching off of the supply and starting the measurements to allow electromagnetic transients to decay.

During deceleration to $n_N (1 - \delta)$ place the test machine in the required condition, according to the following tests:

When moment of inertia is known.

- a) running unexcited;
- b) running open-circuited, excited at rated voltage;
- c) running with the armature terminals short-circuited, and the excitation set to give the rated armature current.

NOTE As an alternate, tests may be carried out at various values within limits of the order of 95 % to 105 % of either the rated voltage or rated short-circuit current.

Additional tests, when the moment of inertia is unknown, shall be conducted at the same values as determined in b) and c) according to either d) e) or f).

- d) with the field suppressed, connect the test machine to a transformer previously set under no-load condition and excited to the preset values of current or open-circuit voltage;
- e) with the field suppressed, connect the test machine to a transformer previously set under short-circuit;
- f) with the field suppressed, simultaneously load the exciter or the auxiliary generator with a ballast resistance at a predetermined load.

Each retardation test shall be repeated at least twice.

7.2.2.5 Measurements

Measurements of voltage and current shall be taken at the instant when the test machine passes through rated speed, except in the case of an unexcited retardation test.

NOTE Excitation circuit power should be measured, if excitation is not provided by a separate source.

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.

Highly accurate recording instruments shall be used either with continuous or with discrete recording of test values of speed and time.

For each test category, take sufficient measurements to accurately locate the points $n_N (1 + \delta)$ and $n_N (1 - \delta)$ as a function of time.

7.2.2.5.1 All tests

For all tests, record

- n as a function of t (the armature circuit being short-circuited);
- θ_w = winding temperatures (either directly or by resistance variation);
- θ_a = inlet/outlet temperature of the primary cooling medium.

For the following tests record additionally:

where the numbered subscript denotes the specific test number.

7.2.2.5.2 Test 2

- P_2 during initial operation at rated voltage (see 7.2.4.2.1);
- U_2 open-circuit rated voltage.

7.2.2.5.3 Test 3 (for synchronous machines)

- I_a armature current.

7.2.2.5.4 Test 4

- P_4 transformer no-load loss;
- U_4 open-circuit rated voltage.

7.2.2.5.5 Test 5

- P_5 transformer short-circuit loss;
- I_a armature current.

7.2.2.5.6 Test 6

- P_6 exciter or auxiliary generator load.

7.2.3 Determination of deceleration

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

$$\frac{2 \delta n_N}{t_2 - t_1} \approx - \left. \frac{dn}{dt} \right|_{n = n_N}$$

where

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

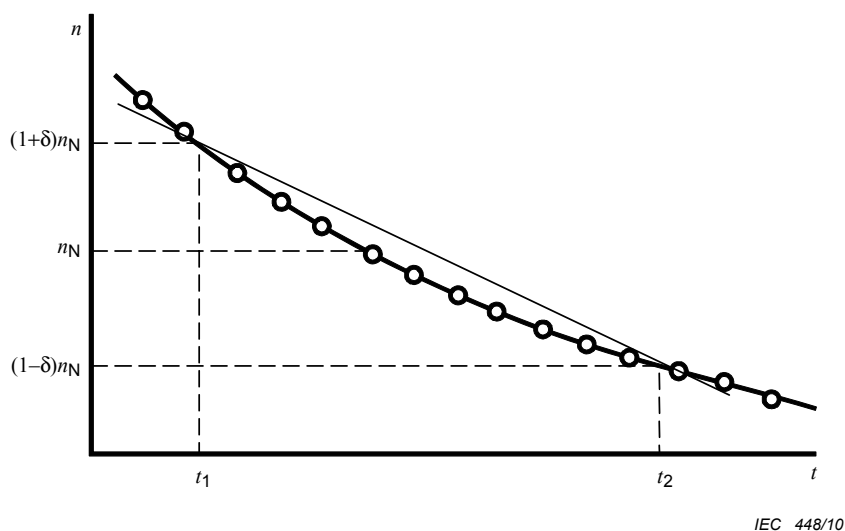


Figure 1 – Method of the chord

Determine the deceleration for the required tests and record as:

$$\left. \frac{dn}{dt} \right|_t$$

Where:

t is the number of the test according to 7.2.2.4.

NOTE According to the definition in 7.2.3 dn/dt is a negative value.

7.2.4 Determination of retardation constant

7.2.4.1 Known moment of inertia

When the moment of inertia of a machine rotating-part has been previously determined by either measurement (preferred) or by design calculation, the retardation constant is calculated from:

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

where:

J is the moment of inertia, in $\text{kg} \cdot \text{m}^2$.

7.2.4.2 Unknown moment of inertia

7.2.4.2.1 Operation as an unloaded motor

When the test machine is operated as an unloaded motor, the input power is equal to the sum of the mechanical loss P_{fw} and iron loss P_{Fe} (the armature circuit I^2R loss is ignored), then the retardation constant C is determined from the formula:

$$C = - \frac{P_{fw} + P_{Fe}}{n_N \frac{dn}{dt} \Big| 2}$$

7.2.4.2.2 Retarded by open-circuited transformer

When the test machine is retarded by the transformer open-circuit loss, with the ohmic I^2R loss according to the transformer open-circuit current ignored, then:

$$P_{fw} + P_{Fe} + P_4 = -C n_N \frac{dn}{dt} \Big| 4$$

hence

$$C = - \frac{P_4}{n_N \left\{ \frac{dn}{dt} \Big| 4 - \frac{dn}{dt} \Big| 2 \right\}}$$

7.2.4.2.3 Retarded by short-circuited transformer

When the test machine is retarded by the transformer short-circuit loss, with the iron loss corresponding to magnetic flux in the short-circuited transformer ignored, then

$$P_{fw} + P_{sc} + P_5 = -C n_N \frac{dn}{dt} \Big| 5$$

hence

$$C = - \frac{P_5}{n_N \left\{ \frac{dn}{dt} \Big| 5 - \frac{dn}{dt} \Big| 3 \right\}}$$

7.2.4.2.4 Retardation by exciter or auxiliary generator

When the test machine is retarded by the exciter or auxiliary generator loaded with a ballast resistance, the retardation losses consist only of the test machine mechanical loss P_{fw} and the measured load P_6 (with allowance for efficiency of the exciter or auxiliary generator which can be determined by calculations). Then:

$$P_{fw} + P_6 = -C n_N \frac{dn}{dt} \Big| 6$$

hence

$$C = - \frac{P_6}{n_N \left\{ \frac{dn}{dt} \Big| 6 - \frac{dn}{dt} \Big| 1 \right\}}$$

7.2.5 Determination of losses

7.2.5.1 General

The tested loss P_t which retards the machine is:

$$P_t = -C n_N \frac{dn}{dt} \Big| t$$

Where:

n_N is rated speed, in min^{-1} ;

P_t is tested loss, in W;

C is retardation constant according to 7.2.4;

$\left. \frac{dn}{dt} \right|_t$ is the deceleration from test t, where t is the specific test number according to 7.2.2.4.

7.2.5.2 Friction and windage loss

The friction and windage (mechanical) loss P_{fw} of the test machine are:

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

7.2.5.3 Iron loss

The iron loss P_{Fe} is:

$$P_{Fe} = -Cn_N \left. \frac{dn}{dt} \right|_2 - P_{fw}$$

NOTE Excitation should be provided by a separate source according to 7.2.2.2.

7.2.5.4 Short-circuit loss

The short-circuit loss P_{sc} is:

$$P_{sc} = -Cn_N \left. \frac{dn}{dt} \right|_3 - P_{fw}$$

NOTE Excitation should be provided by a separate source according to 7.2.2.2.

7.2.5.5 Separation of additional and short-circuit losses

The sum of the I^2R loss and the additional loss in the armature circuit is 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 loss in the armature circuit calculated from the armature circuit resistance corresponding to the test temperature.

7.2.5.6 Measurement of losses in bearings

Losses in common bearings should be stated separately, whether or not such bearings are supplied with the machine.

The losses in bearings and thrust bearings shall be subtracted from the total sum of the mechanical losses. 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.

7.3 Calorimetric method

7.3.1 General

The calorimetric method may be used to determine the efficiency of large electrical rotating machinery:

- either by the determination of the total loss on load, or
- by the determination of the segregated losses.

In the calorimetric method losses are determined from the product of the amount of coolant and its temperature rise, and the heat dissipated in the surrounding media.

Calorimetric losses of the machine consist of:

- losses inside the reference surface P_{irs} ,
- losses outside the reference surface P_{ers} (for example external bearings, excitation equipment, external motors for water-cooling pumps).

The loss inside the reference surface P_{irs} is determined from:

$$P_{irs} = P_{irs,1} + P_{irs,2}$$

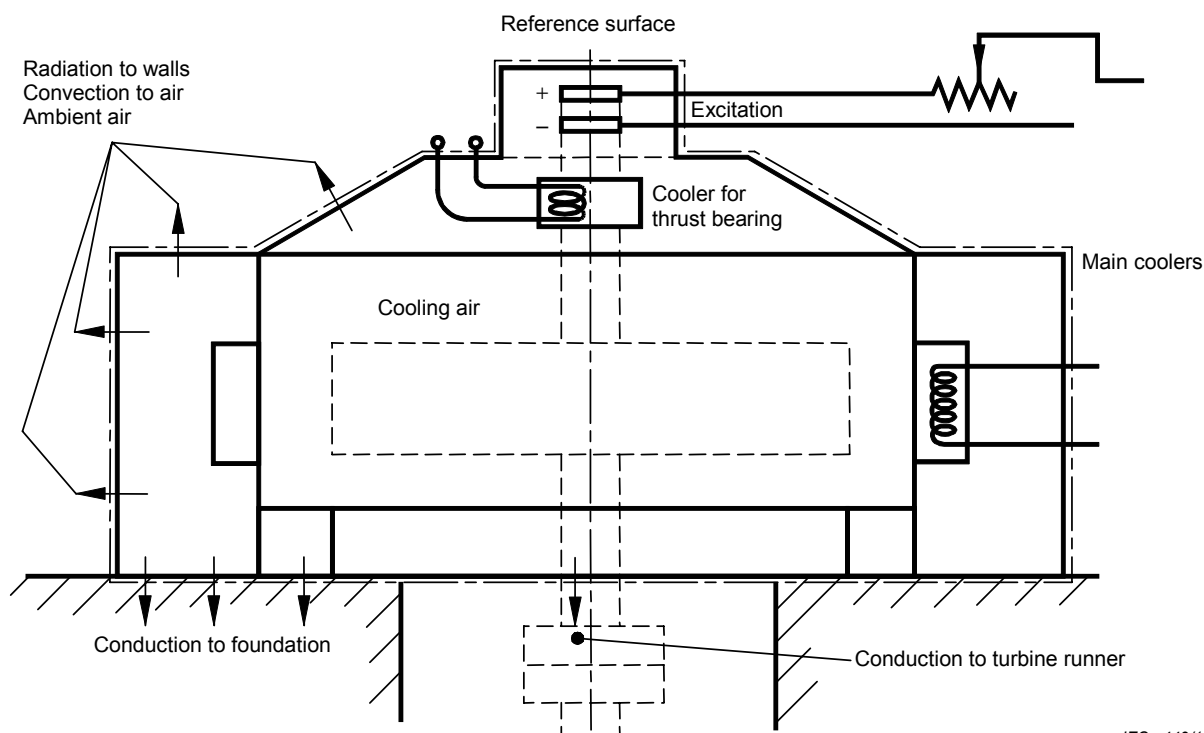
where:

- $P_{irs,1}$ is the loss measured calorimetrically;
- $P_{irs,2}$ is the loss dissipated through the “reference surface” by conduction, convection, radiation, leakage, etc.

The “reference surface” is a surface completely surrounding the machine such that all losses produced inside it (P_{irs}), and not measured calorimetrically, are dissipated through it to the outside (see Figure 2).

The excitation equipment may or may not be inside the reference surface. When outside the reference surface the excitation equipment losses should be determined separately either by measurement or by calculation.

NOTE $P_{irs,2}$ may be negative and therefore subtracted when heat from surrounding ambient flows into the reference surface.



IEC 449/10

Figure 2 – Reference surface

7.3.2 Calorimetric instrumentation

7.3.2.1 Flowmeters

The volume rate of flow of fluids is best measured by volumetric or velocity type flowmeters. Other measuring methods with the same or greater accuracy may be used.

Install the flowmeters in accordance with manufacturer's instructions (straight sections up and downstream, position, etc.). It is recommended to control the flow of the cooling fluid by operating a valve placed downstream from the flowmeter.

Care should be taken that no air bubbles be present in the water.

The flowmeters shall be calibrated before and after the measurements in conditions similar to those prevailing during the test measurements.

In the case of volumetric measurements, the time shall be measured by means of an electrical timing device. The measuring time shall be at least 5 min during at least 2 intervals. The average values shall be recorded.

When measurement is made with a direct-reading flowmeter, 20 readings shall be recorded and an average value determined.

Provisions shall be made to measure both water pressure and temperature at the flowmeter.

7.3.2.2 Thermal detectors

Thermal measurements shall be made preferably by platinum resistance temperature detectors placed directly in the liquid coolant, and positioned in-line with each other so as to obtain direct readings for determination of the temperature rise of the liquid coolant (water, oil).

NOTE Thermocouples are permitted, but their improper use could increase the uncertainty. Thermal detectors placed in oil-filled thermometric pockets are also permitted but add additional uncertainty.

The thermal instruments shall be calibrated before and after the tests.

Recording instruments shall be used.

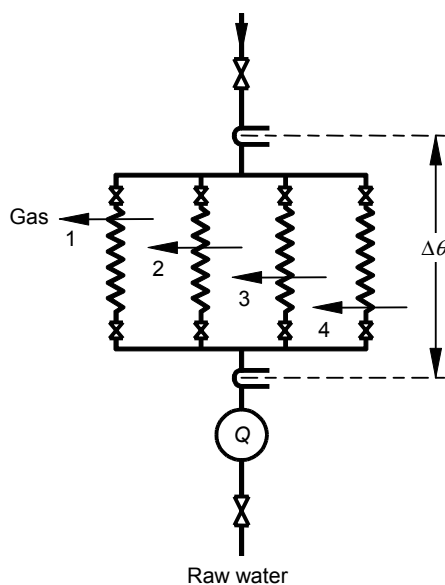
Where possible, water pipes should be insulated from the reference surface and well behind the measuring point to avoid heat transfer to the outside.

Equalizing baffle shall be installed in order to obtain homogeneous flow.

7.3.2.3 Coolers

Calorimetric measurements should be performed separately on every cooling circuit. With a single-medium coolant, one or more calorimeters are needed for the bearing oil, and one calorimeter for the cooling water of air- or gas-coolers. The use of two primary coolants, for example, hydrogen and pure water, requires one or several calorimeters depending upon the connection of the coolers and the scope of measurement.

Figure 3 shows four gas-to-water coolers connected in parallel.

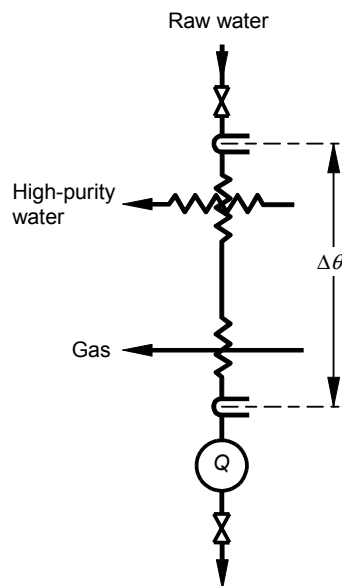


IEC 450/10

Figure 3 – Four coolers connected in parallel, single calorimeter, single coolant

NOTE The result is independent of the distribution of water in the paralleled coolers, of the gas distribution, and of the distribution of losses in the partial gas flows 1 to 4.

Figure 4 shows a series connection of coolers for use with two-fluid cooling.



IEC 451/10

Figure 4 – Series connected coolers, two coolants

For both cases the total of the dissipated losses is determined from the measurement of the volume rate of flow of the cooling water Q , and by measuring the total temperature rise $\Delta\theta$.

7.3.2.4 Pipe layout and connections

It is advisable to establish the measuring paths for oil and water flow measurements, and the temperature measuring points, when planning the pipe layout, as additions or changes to the

installation at a later date are not only costly but can also result in contamination of the bearing oil and high-purity water circuits.

Flowmeter installation shall allow for free pipe lengths between slide valve and flowmeter having the following minimum values as shown in Figure 5: The straight length of inlet piping between flowmeter and S1 is ≥ 10 times and between flowmeter and S2 is ≥ 5 times the nominal diameter of pipe.

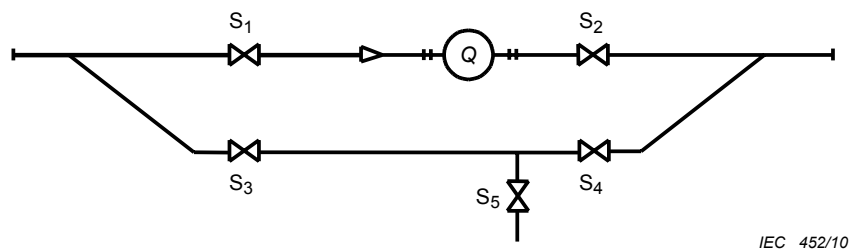


Figure 5 – Bypass piping

To permit flowmeter installation and removal without interrupting operation, a bypass piping arrangement, as shown in Figure 5, permits flowmeter isolation. A small valve S5 is required to verify that no cooling water bypasses the flowmeter (Q), i.e. that the slide valves S3 and S4 are tightly closed.

To obtain an easily measurable temperature, a valve placed downstream from the flowmeter should be used to control the flow of water.

When the temperature rise of the cooling medium is either too small or it is not permissible to change the volume rate of flow (for example bearing oil), bypass calorimetry shall be used which makes possible a larger temperature difference $\Delta\theta$ for improved uncertainty. The parallel piping, with a throttling device, (as shown in Figure 6) permits measuring a fraction of the coolant flow.

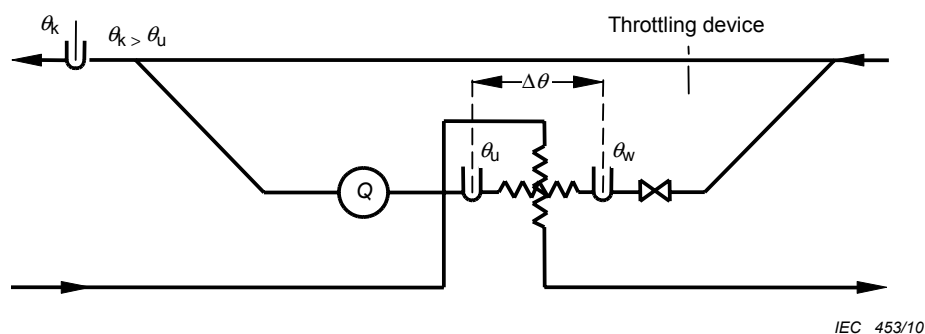


Figure 6 – Parallel piping

Key

Q Flowmeter

θ_w Temperature of hot coolant

θ_u Temperature to which the partial coolant flow within the bypass is cooled down

θ_k Mixed temperature of θ_u and θ_w

To improve measuring accuracy, the bearing and its cooling piping should be insulated, if possible.

7.3.3 Test procedure

The test machine shall be completely assembled as for normal operation.

During testing the test machine temperature and the coolant temperature shall be kept as close to normal operating conditions as possible.

Following assembly of the machine, determine the area of the reference surface. Divide the surface into 10 to 15 approximately equal area segments and attach thermal detectors to each segment. Install sufficient thermal detectors in the ambient air to determine the most accurate average temperature rise.

The calorimetric method may be used to determine the following losses:

- a) Friction and windage loss (with rotor unexcited).
- b) Active iron loss (at no-load usually at U_N and $1,05 U_N$).
- c) Stator-winding and additional-load losses (with stator-winding short-circuited usually at I_N and $0,7 I_N$).
- d) Total losses (usually between 0,5 and 1,0 load at rated and unity power-factor) for determination of efficiency.

When determining the efficiency by adding separate losses it is essential that the measurements should be made at the same cooling-medium temperature.

Operate the machine under the selected test condition until thermal equilibrium is maintained. With respect to coolant temperature thermal equilibrium is reached, when the temperature of the coolant does not vary by more than a gradient of 1 K per hour.

NOTE For guidance, the duration of the test will vary depending on the method of measuring the losses, and is likely to be 10 h to 15 h for determination of losses at full load, and 15 h to 30 h for determination of losses at no-load.

Following temperature stability, record:

- Average flowmeter values for each calorimeter circuit: Q ; p and θ .
- Temperature-rise values for each calorimeter circuit: θ_n and θ_{n+1} .
- Reference surface area.
- Average reference surface temperatures: θ_{rs} .

7.3.4 Determination of losses

7.3.4.1 Test losses

Test losses of the machine consist of the losses inside the reference surface P_{irs} and the losses outside the reference surface P_{ers} , as defined in 7.3.1.

NOTE Losses in bearings inside the reference surface are included in the loss P_{irs} . If possible, they should be measured separately.

7.3.4.2 Coolant loss $P_{irs,1}$

For each operating condition, and when temperature stability has been achieved, the loss (in kW) dissipated by each coolant circuit is:

$$P_{irs,1} = c_p \cdot Q \cdot \rho \cdot \Delta\theta$$

where

Q is the volume rate of flow of the coolant, (m³/s),

$\Delta\theta$ is the temperature rise ($\theta_{n+1} - \theta_n$) of the coolant in K from the total temperature rise $\Delta\theta$ (Figure 3),

c_p is the specific heat capacity of the cooling medium in kJ/(kg K) at pressure p,

ρ is the density of the coolant in kg/m³ at the temperature at the point of flow measurement.

In case of water as a coolant both c_p and ρ are determined from Figure 7.

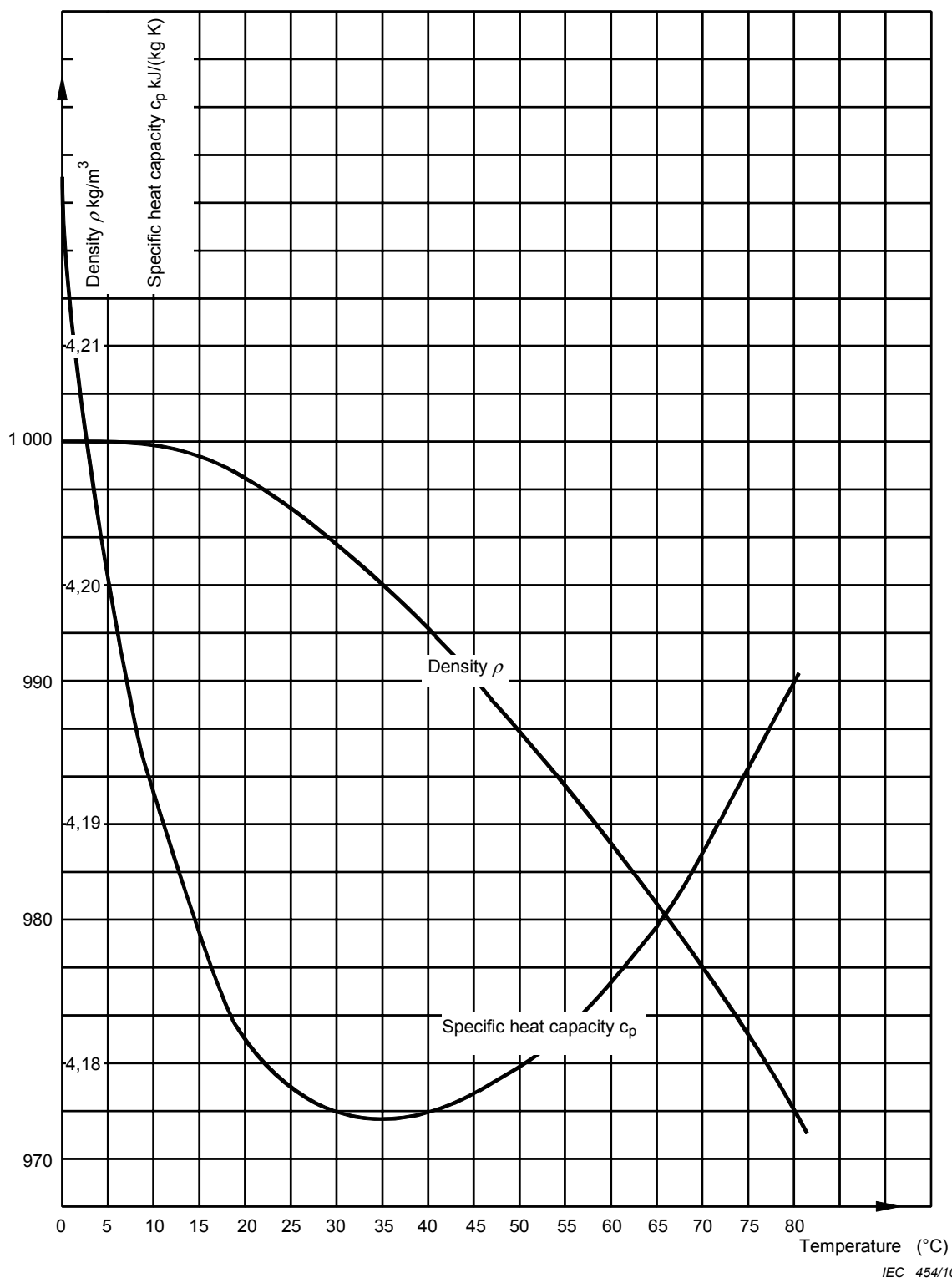


Figure 7 – Characteristics of pure water as a function of temperature

Where there is any doubt as to the accuracy of the factors employed for c_p and ρ , particularly if the cooling water contains salts, it will be necessary for c_p and ρ to be measured.

The temperature measurement includes the difference in temperature due to losses in the coolers and associated pipe-work between measuring points which is assumed to be 1 K for a pressure drop of 4,2 MN/m². The loss corresponding to the pressure drop shall be subtracted from the total losses.

NOTE Bearing losses could be measured using oil as a cooling medium, but there is less uncertainty when measuring on the water side of an oil-to-water heat exchanger because the thermal characteristics of water are better known.

7.3.4.3 Reference-surface loss $P_{irs,2}$

This loss constitutes a small part of the total losses and consists of:

- the losses, dissipated in the foundations and in the shaft by conduction; (usually negligible and very difficult to measure),
- the losses dissipated through the “reference surface” by conduction, convection, radiation, leakage, etc.

The $P_{irs,2}$ loss should be minimized by suitable insulation of the reference surface or portions of the machine. This procedure is suited to locations where it is difficult to suppress external air current or to maintain relatively constant ambient temperature conditions.

In practice, by conducting the tests in such a way that the loss $P_{irs,2}$ is less than 2,5 % of the loss P_{irs} measured at full load, and less than 5 % of the loss P_{irs} determined by the method of separate loss measurements, only the losses dissipated at the surface of the machine need to be taken into consideration. This loss $P_{irs,2}$ may be obtained from the formula:

NOTE $P_{irs,2}$ may be negative when heat flows into the reference surface and must in this case be subtracted.

$$P_{irs,2} = h \times A \times \Delta\theta$$

where:

- $\Delta\theta$ is the temperature difference between the average reference surface temperature and the ambient-air temperature;
- A is the area of the reference surface;
- h is the heat transfer coefficient for losses dissipated from surfaces in contact with air as follows:

For forced-air convection:

- for external surfaces:

$$h = 11 + 3 v [W/(m^2 \cdot K)],$$

where v is the velocity of ambient air in m/s,

- for surfaces entirely within the machine's external surface:

$$h = 5 + 3 v [W/(m^2 \cdot K)],$$

where v is the velocity of cooling air in m/s.

For natural convection:

The loss dissipated by the surface is generally between 10 W and 20 W/(m² • K). A reasonable assumption being 15 W/(m² • K) when the air currents over the transfer surfaces have been eliminated.

7.3.4.4 External loss, P_{ers}

The loss P_{ers} (which is evaluated separately) consists mainly of the following:

- losses in the rheostat in the main excitation circuit, in voltage regulation, shunt and excitation circuits independent of the exciter,
 - losses in the exciter and the slip-rings when their cooling circuits are independent of that of the main machine,
 - losses by friction in the bearings, when they are wholly or partly outside the reference surface.
-

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	27
1 Domaine d'application	29
2 Références normatives	29
3 Termes et définitions	29
4 Symboles	30
4.1 Grandeurs	30
4.2 Indices	31
5 Exigences de base	31
5.1 Détermination directe et indirecte du rendement.....	31
5.1.1 Direct	31
5.1.2 Indirect	31
5.2 Incertitude	31
5.3 Méthodes préférentielles	32
6 Déterminations communes	32
6.1 Rendement.....	32
6.2 Pertes totales	33
6.3 Pertes en charge	33
7 Méthodes	34
7.1 Méthode de la machine étalonnée	34
7.1.1 Généralités.....	34
7.1.2 Etalonnage de la machine	34
7.1.3 Procédure d'essai	34
7.1.4 Détermination des performances	35
7.2 Méthode du ralentissement	36
7.2.1 Principes essentiels.....	36
7.2.2 Procédure d'essai	37
7.2.3 Détermination de la décélération	39
7.2.4 Détermination de la constante de ralentissement.....	40
7.2.5 Détermination des pertes.....	41
7.3 Méthode calorimétrique	42
7.3.1 Généralités.....	42
7.3.2 Appareils calorimétriques	43
7.3.3 Procédure d'essai	47
7.3.4 Détermination des pertes.....	48
Figure 1 – Méthode de la corde	39
Figure 2 – Surface de référence.....	43
Figure 3 – Quatre refroidisseurs connectés en parallèle, un seul calorimètre, un seul fluide de refroidissement.....	45
Figure 4 – Refroidisseurs connectés en série, deux fluides de refroidissements	45
Figure 5 – Tuyauterie de dérivation.....	46
Figure 6 – Tuyauterie parallèle	47
Figure 7 – Caractéristiques de l'eau pure en fonction de la température	49
Tableau 1 – Méthodes préférentielles pour des machines de grande taille	32

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES –

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

AVANT-PROPOS

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

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

Le texte de cette Norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
2/1585/FDIS	2/1595/RVD

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

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

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

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

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

MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES –

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

1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 60034 s'applique à des machines électriques tournantes de grande taille et elle établit des méthodes supplémentaires pour la détermination des pertes séparées et qui sont destinées à définir un rendement, en complément de la CEI 60034-2-1. Ces méthodes s'appliquent lorsqu'un essai à pleine charge n'est pas possible ou qu'il présente une plus grande incertitude.

NOTE Un essai in situ est admis selon la méthode calorimétrique dans des conditions à pleine charge.

Les méthodes spécifiques décrites sont:

- La méthode de la machine étalonnée.
- La méthode du ralentissement.
- La méthode calorimétrique.

2 Références normatives

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

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

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

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions de la CEI 60034-1 et de la CEI 60034-2-1, ainsi que les termes et définitions donnés ci-dessous s'appliquent.

3.1

machine étalonnée

machine dont la puissance mécanique absorbée ou fournie est déterminée avec une faible incertitude, en utilisant des valeurs électriques de sortie ou d'entrée mesurées selon une procédure d'essai définie

3.2

méthode de la machine étalonnée

méthode dans laquelle la puissance mécanique absorbée ou fournie par une machine électrique en essai est déterminée à partir de la mesure de la puissance électrique absorbée ou fournie par une machine étalonnée, accouplée mécaniquement à la machine en essai

3.3

méthode du ralentissement

méthode d'essai dans laquelle les pertes séparées d'une machine en essai sont déduites des mesures du taux de ralentissement de ses composants rotatifs, lorsque seules ces pertes sont présentes

3.4

méthode calorimétrique

méthode dans laquelle les pertes d'une machine sont déduites des mesures de la quantité de chaleur qu'elles produisent

3.5

équilibre thermique

état atteint lorsque les échauffements des diverses parties de la machine ne varient pas de plus d'un gradient de 2 K par heure

[VEI 411-51-08]

4 Symboles

En plus des symboles de la CEI 60034-2-1, ce qui suit s'applique.

4.1 Grandeurs

A	est une surface, m^2 ,
C	est la constante de ralentissement, $kg\ m^2\ min^2$,
c_p	est la capacité thermique spécifique du fluide de refroidissement, $J/(kg\ K)$,
h	est le coefficient de transfert thermique, $W/(m^2\ K)$,
J	est le moment d'inertie, $kg\cdot m^2$,
n	est la vitesse, min^{-1} ,
P_{1E}	est la puissance d'excitation fournie par une source séparée, W ,
P_k	sont les pertes constantes, W ,
P_{el}	est la puissance électrique, à l'exclusion de la puissance d'excitation, W ,
P_e	est la puissance d'excitation, W ,
P_{Fe}	sont les pertes dans le fer, W ,
P_{fw}	sont les pertes par frottement et par ventilation, W ,
P_{sc}	sont les pertes en court-circuit, W ,
P_{mech}	est la puissance mécanique, W ,
P_T	sont les pertes totales, W ,
Q	est le débit volumique du fluide de refroidissement, m^3/s ,
t	est le temps, s ,
v	est la vitesse de sortie du fluide de refroidissement, m/s ,
Δp	est la différence entre la pression statique dans la buse d'admission et la pression ambiante, N/m^2 ,
$\Delta\theta$	est l'augmentation de la température du fluide de refroidissement, ou la différence de température entre la surface de référence de la machine et la température ambiante externe, K ,
δ	est l'écart relatif de la vitesse de rotation rapporté à la vitesse assignée,
ρ	est la densité du fluide de refroidissement, kg/m^3 ,
θ	est la température, $^{\circ}C$.

4.2 Indices

irs	pour la surface de référence intérieure,
ers	pour la surface de référence extérieure,
E	pour l'excitatrice,
c	pour le circuit de refroidissement,
N	pour les valeurs assignées,
rs	pour la surface de référence,
t	pour une procédure d'essai,
1	pour la condition d'entrée ou initiale,
2	pour la condition de sortie.

5 Exigences de base

5.1 Détermination directe et indirecte du rendement

Les essais peuvent être regroupés dans les catégories suivantes.

5.1.1 Direct

Les mesures d'entrée/sortie sur une machine seule sont considérées «directes». Ceci implique la mesure de la puissance électrique ou mécanique absorbée par la machine, et de la puissance mécanique ou électrique fournie par la machine.

5.1.2 Indirect

Les mesures des pertes séparées dans une machine, dans une condition particulière, sont considérées «indirectes». Il ne s'agit généralement pas des pertes totales, mais cela comprend certaines composantes de pertes. Cependant, la méthode peut 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 directe des pertes totales,
- sommation des pertes séparées.

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 des valeurs de rendement obtenues par des méthodes différentes.

5.2 Incertitude

L'incertitude, telle qu'utilisée dans la présente Norme, est l'incertitude de la détermination d'un rendement réel. Elle reflète les variations dans la procédure d'essai et l'équipement d'essai.

Bien qu'il convienne d'exprimer l'incertitude sous la forme d'une valeur numérique, une telle exigence nécessite suffisamment d'essais 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 uniquement sur des 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 sur site (alimentation, charge ou machine d'entraînement).

Des méthodes préférentielles pour des machines de grande taille sont fournies dans le Tableau 1.

Tableau 1 – Méthodes préférentielles pour des machines de grande taille

Quantité à déterminer	Méthode d'essai	Article	Incertitude
Rendement déterminé par des essais directs	Machine étalonnée	7.1.4.1	moyenne
Pertes totales	Calorimétrique ¹⁾	7.3.3 d)	faible/moyenne
Pertes par frottement et par ventilation	Machine étalonnée	7.1.4.2a)	moyenne
	Ralentissement	7.2.5.2	moyenne
	Calorimétrique	7.3.3 a)	faible/moyenne
Pertes dans le fer actif et pertes supplémentaires à vide dans les machines à courant continu et synchrones	Machine étalonnée	7.1.4.2b)	moyenne
	Ralentissement	7.2.5.3	moyenne
	Calorimétrique	7.3.3 b)	faible/moyenne
Pertes dans les enroulements et pertes supplémentaires en charge	Machine étalonnée	7.1.4.2c)	moyenne
	Ralentissement	7.2.5.5	moyenne
	Calorimétrique	7.3.3 c)	faible/moyenne

6 Déterminations communes

Ces déterminations s'appliquent à plusieurs des méthodes mentionnées.

6.1 Rendement

Le rendement est:

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

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 sont les pertes totales, conformément à 6.2.

NOTE 1 La puissance d'entrée P_1 et la puissance de sortie P_2 sont les suivantes:

¹⁾ S'il est probable que l'erreur relative dans P_{irs} (voir 7.3.1) soit supérieure à 3 %, la méthode calorimétrique n'est pas recommandée.

fonctionnant en moteur: $P_1 = P_{el}$; $P_2 = P_{mech}$;

fonctionnant en génératrice: $P_1 = P_{mech}$; $P_2 = P_{el}$.

NOTE 2 P_T inclut la puissance d'excitation P_e de la machine, lorsque cela est applicable.

6.2 Pertes totales

Lorsque les pertes totales sont déterminées par la somme des pertes séparées, les formules suivantes s'appliquent:

Pour les machines à courant continu:

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

$$P_e = P_f + P_E$$

$$P_k = P_{fw} + P_{Fe}$$

Pour les machines à induction:

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

$$P_k = P_{fw} + P_{Fe}$$

Pour les machines synchrones:

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

$$P_e = P_f + P_E + P_b$$

$$P_k = P_{fw} + P_{Fe}$$

où:

- P_a sont les pertes par effet Joule dans l'enroulement d'induit (I^2R) (pertes du pôle auxiliaire, de la bobine de compensation et de l'enroulement de champ série dans le cas des machines à courant continu),
- P_b sont les pertes dans les balais,
- P_E sont les pertes dans l'excitatrice,
- P_e est la puissance d'excitation,
- P_f sont les pertes dans l'enroulement d'excitation (de champ),
- P_{Fe} sont les pertes dans le fer,
- P_{fw} sont les pertes par frottement et par ventilation,
- P_k sont les pertes constantes,
- P_{LL} sont les pertes supplémentaires en charge,
- P_r sont les pertes par effet Joule dans l'enroulement du rotor (I^2R),
- P_s sont les pertes par effet Joule dans l'enroulement du stator (I^2R),
- P_T sont les pertes totales.

6.3 Pertes en charge

La détermination des pertes par rapport à la charge de la machine (avec l'incertitude la plus faible) est meilleure à partir des mesures réelles. Par exemple: des mesures de courant, de résistance, etc., pour un fonctionnement à pleine charge.

Lorsque ceci n'est pas possible, ces valeurs doivent être obtenues d'après le calcul des paramètres au cours de l'étape de conception.

La détermination des pertes non détaillées dans cette partie peut être trouvée dans la CEI 60034-2-1.

7 Méthodes

Les méthodes d'essai suivantes peuvent être utilisées pour déterminer les performances, lorsque la charge de la machine et/ou sa taille dépassent les possibilités de l'essai (décrit dans la CEI 60034-2-1).

NOTE Ces méthodes sont généralement applicables aux machines de grande taille pour lesquelles le coût des installations pour les autres méthodes est prohibitif.

7.1 Méthode de la machine étalonnée

La méthode de la machine étalonnée peut être utilisée pour déterminer le rendement de la machine en essai, soit directement, soit par des pertes séparées.

7.1.1 Généralités

Cette méthode est généralement appliquée comme essai en usine.

Cette méthode nécessite une machine étalonnée couplée mécaniquement à la machine en essai et elle est utilisée lorsqu'on ne dispose ni d'un couplemètre, ni d'un dynamomètre. La puissance mécanique absorbée par la machine en essai est calculée d'après la puissance électrique absorbée par la machine étalonnée.

7.1.2 Etalonnage de la machine

Lorsqu'une boîte de vitesses est directement reliée à la machine, elle doit être considérée comme faisant partie de la machine étalonnée.

Étalonner une machine électrique, de préférence une machine à courant continu, selon l'une des procédures de la CEI 60034-2-1 pour un nombre suffisant de charges thermiquement stables (y compris à vide), afin de déterminer une relation précise entre la puissance de sortie et la puissance d'entrée réglée pour la température de l'air/du fluide de refroidissement à l'entrée. Ceci est généralement réalisé sous la forme d'une courbe.

NOTE Il est généralement conseillé d'enregistrer plusieurs lectures de tous les appareils à chaque point de charge pendant de courtes périodes de temps et de faire la moyenne des résultats, afin d'obtenir une valeur d'essai plus précise.

7.1.3 Procédure d'essai

La machine en essai doit être équipée de sondes internes de température (ETD) dans les enroulements.

La machine en essai doit être complètement assemblée avec ses composants principaux, comme pour le fonctionnement normal.

Avant de commencer l'essai, enregistrer les résistances des enroulements et la température ambiante.

La machine, dont il faut déterminer les performances, doit être couplée mécaniquement à la machine étalonnée et elle doit fonctionner à une vitesse équivalente à sa vitesse synchrone/assignée.

Faire fonctionner la machine étalonnée avec la machine en essai, soit à une charge assignée, soit à une charge partielle, à vide sans excitation, avec ou sans balais; à vide excitée à une

tension assignée ou court-circuitée, ce qui permet de déterminer des catégories spécifiques de pertes.

Lorsque la machine en essai fonctionne dans chaque condition d'essai spécifiée et qu'elle a atteint sa stabilité thermique, enregistrer:

NOTE L'exemple suivant représente des essais réalisés avec un moteur en tant que machine étalonée.

- pour la machine étalonée

P_1 = puissance

U_1 = tension d'entrée

I_1 = courant

θ_{1c} = température de l'entrée d'air de refroidissement

θ_{1w} = température des enroulements (par variation de résistance, si possible)

n_1 = vitesse

- pour la machine en essai (détermination directe, comme une génératrice)

P_2 = puissance de sortie

U_2 = tension de sortie

I_2 = courant d'induit en charge

θ_{2w} = température des enroulements (soit directement par ETD, soit par variation de résistance)

n_2 = vitesse

- pour la machine en essai à vide (comme une génératrice)

U_2 = tension d'induit (excitée, à vide)

I_2 = courant d'induit (excitée, en court-circuit)

θ_{2w} = température des enroulements (soit directement par ETD, soit par variation de résistance)

n_2 = vitesse

A la fin de chaque essai, arrêter les machines et enregistrer dans l'ordre suivant:

- la résistance des enroulements de la machine en essai;
- la résistance des enroulements de la machine étalonée;

Enfin, faire fonctionner la machine étalonée sans connexion électrique à la machine en essai et faire des enregistrements comme il est spécifié ci-dessus.

7.1.4 Détermination des performances

D'après la courbe élaborée en 7.1.2 et en utilisant les valeurs d'entrée de la machine étalonée, choisir la puissance de sortie appropriée à la machine en essai.

Régler la puissance de sortie pour la température ambiante normalisée.

La détermination de la puissance d'excitation doit s'effectuer selon la CEI 60034-2-1.

7.1.4.1 Détermination directe du rendement

Lorsque l'essai est effectué selon 7.1.3, le rendement de la machine en essai est:

$\eta = \frac{P_2}{P_1}$ machine en essai fonctionnant en génératrice, machine étalonnée fonctionnant en moteur

où:

P_2 est la puissance de sortie de la génératrice en essai

P_1 est la puissance absorbée calculée dans la génératrice en essai, selon 7.1.3.

et:

$\eta = \frac{P_2}{P_1}$ machine en essai fonctionnant en moteur, machine étalonnée fonctionnant en génératrice

où:

P_1 est la puissance absorbée dans le moteur en essai

P_2 est la puissance fournie calculée du moteur en essai.

7.1.4.2 Pertes séparées

En utilisant les valeurs de P déterminées d'après la courbe de la machine étalonnée, il est possible de déterminer la puissance dissipée par la machine en essai pour d'autres conditions sélectionnées pouvant être utilisées pour déterminer le rendement, conformément à 6.1.

- Pertes par frottement et par ventilation à la vitesse assignée (lorsque la machine en essai n'est pas connectée électriquement);
- Pertes dans le fer actif et pertes supplémentaires à vide dans des machines à courant continu et synchrones, (lorsqu'elles sont soumises aux essais à vide, en circuit ouvert, excitées à la tension assignée, moins les pertes par frottement et par ventilation). Pertes de champ d'une source séparée;
- Pertes dans l'enroulement d'induit et pertes supplémentaires en charge dans des machines synchrones, (lorsqu'elles sont soumises aux essais dans des conditions de court-circuit, excitées au courant d'induit assigné, moins les pertes par frottement et par ventilation). Pertes de champ d'une source séparée.

7.2 Méthode du ralentissement

On peut utiliser la méthode du ralentissement pour déterminer les pertes séparées des machines électriques tournantes ayant une inertie en rotation significative.

La méthode du ralentissement est utilisée pour déterminer:

- la somme des pertes dues au frottement et des pertes par ventilation («les pertes mécaniques») dans les machines de tous types;
- la somme des pertes dans le fer actif et des pertes supplémentaires à vide dans les machines à courant continu et dans les machines synchrones;
- la somme des pertes par effet Joule (I^2R) dans les enroulements primaires et des pertes supplémentaires en charge («les pertes en court-circuit») dans les machines synchrones.

7.2.1 Principes essentiels

Les pertes totales enregistrées 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 sont les pertes mesurées, W;
- C est la constante de ralentissement selon 7.2.4;
- n est la vitesse, min^{-1} ;
- dn/dt est la décélération d'après 7.2.3.

NOTE La précision de la méthode du ralentissement est en relation directe avec la précision de la constante de ralentissement C qui dépend uniquement du moment d'inertie J (voir 7.2.4).

7.2.2 Procédure d'essai

7.2.2.1 Assemblage de la machine en essai

La machine en essai doit être assemblée avec tous ses composants principaux, comme pour le fonctionnement normal, mais désaccouplée des autres pièces tournantes. Un capteur de vitesse approprié doit être fixé à l'élément tournant.

NOTE Si la machine ne peut pas être désaccouplée, il convient de prendre toutes les mesures possibles pour réduire les pertes mécaniques dans les autres pièces tournantes, par exemple, par démontage partiel ou dans le cas d'un générateur hydraulique, en empêchant l'eau d'entrer dans la chambre de la roue de turbine. La rotation de la roue de turbine dans l'air produit des pertes par ventilation qu'il convient de déterminer soit expérimentalement, soit par des calculs.

7.2.2.2 Préparation de la machine pour l'essai

Connecter électriquement la machine en essai comme moteur (à vide), alimentée par une source d'alimentation séparée ayant une large plage de fréquences variables. Toute excitation doit être obtenue à partir d'une source séparée avec un contrôle de tension rapide et précis.

NOTE 1 La machine en essai peut être entraînée par sa turbine normale, par exemple, dans le cas d'une turbine Pelton, où le courant d'eau vers la roue peut être interrompu instantanément.

NOTE 2 L'excitation par une excitatrice accouplée mécaniquement n'est pas recommandée, mais elle peut être permise au cas où la valeur de l'écart de la vitesse δ ne dépasse pas 0,05. Il faut tenir compte des pertes dans les excitatrices couplées à l'arbre de la machine en essai.

Les températures des paliers doivent être réglées à la température normale à laquelle les paliers fonctionnent avec la charge assignée, en ajustant le débit du fluide de refroidissement.

La température de l'air doit être réglée autant que possible à la température normale à laquelle il est requis de mesurer les pertes par ventilation, par l'ajustement du débit de l'air de refroidissement.

7.2.2.3 Préparation de l'essai

Les essais de ralentissement doivent être effectués en série, autant que possible sans interruption. Il est recommandé de commencer et de terminer chaque série d'essais par des essais de ralentissement de la machine en essai non excitée.

Tous les essais doivent être répétés plusieurs fois aux valeurs assignées présélectionnées de tension à vide ou de courant en court-circuit. La valeur de la moyenne arithmétique obtenue à partir de chaque série de mesures doit être supposée correspondre à la valeur appropriée des pertes de cette catégorie.

Choisir une valeur de δ (écart relatif de la vitesse de rotation par rapport à la vitesse assignée) qui ne doit pas être supérieure à 0,1 et qui peut devoir être inférieure, en fonction des caractéristiques de la machine.

7.2.2.4 Essais

Accélérer rapidement la machine en essai jusqu'à une vitesse supérieure à $n_N (1 + \delta)$. Déconnecter la machine de sa source d'alimentation. Un délai suffisant doit séparer l'extinction de l'alimentation et le début des mesures, pour que les régimes électromagnétiques transitoires soient amortis.

Durant la décélération, jusqu'à $n_N (1 - \delta)$, mettre la machine en essai dans l'état requis, conformément aux essais suivants:

Lorsque le moment d'inertie est connu.

- a) fonctionnement sans excitation;
- b) fonctionnement à vide, excitée à la tension assignée;
- c) fonctionnement avec les bornes de l'induit court-circuitées et l'excitation fixée pour fournir le courant d'induit assigné.

NOTE En variante, les essais peuvent être faits à diverses valeurs dans des limites de l'ordre de 95 % à 105 % soit de la tension assignée, soit du courant de court-circuit assigné.

Lorsque le moment d'inertie est inconnu, des essais supplémentaires doivent être effectués avec les mêmes valeurs que celles déterminées en b) et c), selon d) e) ou f).

- d) le champ étant supprimé, connecter la machine en essai à un transformateur réglé précédemment à vide et excité aux valeurs présélectionnées de courant ou de tension à vide;
- e) le champ étant supprimé, connecter la machine en essai à un transformateur, réglé précédemment en court-circuit;
- f) le champ étant supprimé, charger en même temps l'excitatrice ou la génératrice auxiliaire avec une résistance ballast à une charge prédéterminée.

Chaque essai de ralentissement doit être répété au moins 2 fois.

7.2.2.5 Mesures

Les mesures de tension et de courant doivent être effectuées à l'instant où la machine en essai passe par la vitesse assignée, sauf dans le cas d'un essai de ralentissement sans excitation.

NOTE Si l'excitation n'est pas fournie par une source séparée, il convient que la puissance du circuit d'excitation soit mesurée.

Les valeurs mesurées de la tension à vide ou du courant de court-circuit ne doivent pas différer des valeurs présélectionnées de plus de $\pm 2 \%$. 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.

Des dispositifs d'enregistrement hautement précis, avec un enregistrement continu ou discret des valeurs d'essai de vitesse et de temps doivent être utilisés.

Pour chaque catégorie d'essai, effectuer suffisamment de mesures pour localiser précisément les points $n_N (1 + \delta)$ et $n_N (1 - \delta)$ en fonction du temps.

7.2.2.5.1 Tous les essais

Pour tous les essais, enregistrer:

- n en fonction de t (le circuit d'induit étant court-circuité);

θ_w = températures des enroulements (soit directement, soit par variation de résistance);

θ_a = température d'entrée/sortie du fluide de refroidissement.

Pour les essais suivants, enregistrer de plus:

où l'indice numéroté indique un numéro d'essai spécifique.

7.2.2.5.2 Essai 2

P_2 durant le fonctionnement initial à la tension assignée (voir 7.2.4.2.1);

U_2 tension assignée à vide.

7.2.2.5.3 Essai 3 (pour les machines synchrones)

I_a courant d'induit.

7.2.2.5.4 Essai 4

P_4 pertes du transformateur à vide;

U_4 tension assignée à vide.

7.2.2.5.5 Essai 5

P_5 pertes du transformateur en court-circuit;

I_a courant d'induit.

7.2.2.5.6 Essai 6

P_6 charge de l'excitatrice ou de la génératrice auxiliaire.

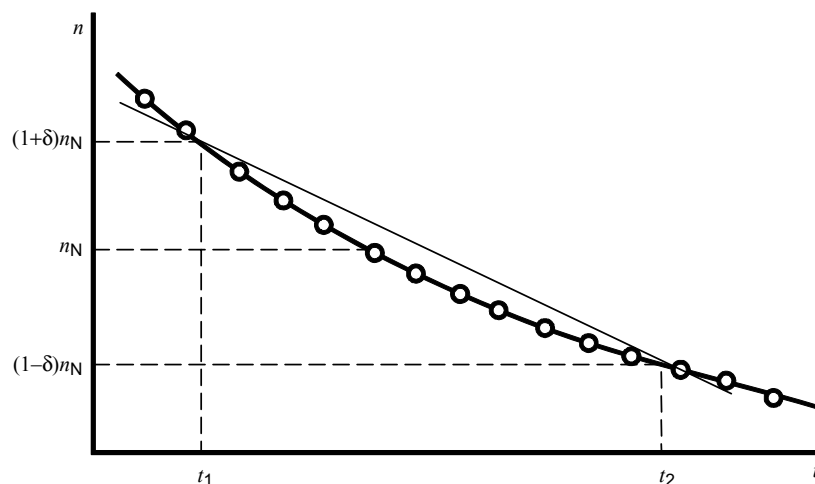
7.2.3 Détermination de la décélération

La méthode dite de «la corde» nécessite la mesure de l'intervalle de temps ($t_2 - t_1$) pendant lequel la vitesse de la machine en essai ralentit de $n_N (1 + \delta)$ à $n_N (1 - \delta)$, voir la Figure 1. Le rapport de l'intervalle de vitesse $2 \delta n_N$ à ($t_2 - t_1$) est approximativement la décélération à la vitesse assignée:

$$\frac{2 \delta n_N}{t_2 - t_1} \approx - \left. \frac{dn}{dt} \right|_{n = n_N}$$

où:

δ est l'écart relatif de la vitesse rapportée à la vitesse assignée.



IEC 448/10

Figure 1 – Méthode de la corde

Déterminer la décélération pour les essais requis et enregistrer:

$$\left. \frac{dn}{dt} \right|_t$$

où:

t est le numéro de l'essai selon 7.2.2.4.

NOTE Selon la définition de 7.2.3, dn/dt est une valeur négative.

7.2.4 Détermination de la constante de ralentissement

7.2.4.1 Moment d'inertie connu

Lorsque le moment d'inertie d'une pièce tournante de la machine a été déterminé au préalable, soit par une mesure (de préférence), soit par calcul de conception, la constante de ralentissement est calculée d'après:

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

où:

J est le moment d'inertie, en $\text{kg} \cdot \text{m}^2$.

7.2.4.2 Moment d'inertie inconnu

7.2.4.2.1 Fonctionnement en moteur à vide

Lorsqu'on fait fonctionner la machine en essai en moteur à vide, la puissance d'entrée est égale à la somme des pertes mécaniques P_{fw} et des pertes dans le fer P_{Fe} (les pertes du circuit d'induit $I^2 R$ sont ignorées), la constante de ralentissement C est alors déterminée d'après la formule:

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

7.2.4.2.2 Ralentissement par transformateur à vide

Lorsque la machine en essai est ralentie par les pertes du transformateur à vide, et que les pertes par effet Joule $I^2 R$ correspondant au courant à vide du transformateur sont négligées, alors:

$$P_{fw} + P_{Fe} + P_4 = -C n_N \left. \frac{dn}{dt} \right|_4$$

donc

$$C = - \frac{P_4}{n_N \left\{ \left. \frac{dn}{dt} \right|_4 - \left. \frac{dn}{dt} \right|_2 \right\}}$$

7.2.4.2.3 Ralentissement par transformateur court-circuité

Lorsque la machine en essai est ralentie par les pertes du transformateur en court-circuit, et que les pertes dans le fer correspondant au flux magnétique du transformateur court-circuité sont négligées, alors:

$$P_{fw} + P_{sc} + P_5 = -C n_N \left. \frac{dn}{dt} \right| 5$$

donc

$$C = - \frac{P_5}{n_N \left\{ \left. \frac{dn}{dt} \right| 5 - \left. \frac{dn}{dt} \right| 3 \right\}}$$

7.2.4.2.4 Ralentissement par excitatrice ou génératrice auxiliaire

Lorsque la machine en essai est ralentie par la charge d'une excitatrice ou d'une génératrice auxiliaire sur une résistance ballast, les pertes entraînant le ralentissement ne comportent que les pertes mécaniques P_{fw} de la machine en essai et de la charge mesurée P_6 (compte tenu du rendement de l'excitatrice ou de la génératrice auxiliaire, qui peut être déterminé par calculs). Alors:

$$P_{fw} + P_6 = -C n_N \left. \frac{dn}{dt} \right| 6$$

donc

$$C = - \frac{P_6}{n_N \left\{ \left. \frac{dn}{dt} \right| 6 - \left. \frac{dn}{dt} \right| 1 \right\}}$$

7.2.5 Détermination des pertes

7.2.5.1 Généralités

Les pertes de l'essai P_t ralentissant la machine sont:

$$P_t = -C n_N \left. \frac{dn}{dt} \right| t$$

où:

n_N est la vitesse assignée, en min^{-1} ;

P_t sont les pertes de l'essai, en W;

C est la constante de ralentissement selon 7.2.4;

$\left. \frac{dn}{dt} \right| t$ est la décélération de l'essai t , où t est le numéro d'essai spécifique selon 7.2.2.4.

7.2.5.2 Pertes par frottement et par ventilation

Les pertes par frottement et par ventilation (mécaniques) P_{fw} de la machine en essai sont:

$$P_{fw} = -C n_N \left. \frac{dn}{dt} \right| 1$$

7.2.5.3 Pertes dans le fer

Les pertes dans le fer P_{Fe} sont:

$$P_{Fe} = -C n_N \left. \frac{dn}{dt} \right| 2 - P_{fw}$$

NOTE Il convient que l'excitation soit fournie par une source séparée selon 7.2.2.2.

7.2.5.4 Pertes en court-circuit

Les pertes en court-circuit P_{sc} sont:

$$P_{sc} = -Cn_N \left. \frac{dn}{dt} \right|_3 - P_{fw}$$

NOTE Il convient que l'excitation soit fournie par une source séparée selon 7.2.2.2.

7.2.5.5 Séparation des pertes supplémentaires et en court-circuit

La somme des pertes I^2R et des pertes supplémentaires dans le circuit d'induit est déterminée comme la différence des pertes mesurées dans les troisième et premier essais. La séparation de cette somme en composants, si nécessaire, est effectuée en retranchant de celle-ci les pertes I^2R dans le circuit d'induit, calculées d'après la résistance du circuit d'induit correspondant à la température d'essai.

7.2.5.6 Mesure des pertes dans les paliers

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 et dans les paliers de butée doivent être soustraites de la somme totale des pertes mécaniques. Si la machine en essai utilise un refroidissement direct des paliers, ces pertes sont distribuées entre la machine en essai et toute autre machine couplée mécaniquement à celle-ci, par exemple une turbine, proportionnellement aux masses de leurs pièces tournantes. En l'absence de refroidissement direct, la distribution des pertes dans les paliers doit être déterminée d'après des formules empiriques.

7.3 Méthode calorimétrique

7.3.1 Généralités

On peut utiliser la méthode calorimétrique pour déterminer le rendement de machines électriques tournantes de grande taille:

- a) soit en déterminant les pertes totales en charge, soit
- b) en déterminant les pertes séparées.

Dans la méthode calorimétrique, les pertes sont déterminées à partir du produit de la quantité de fluide de refroidissement par son échauffement, et de la quantité de chaleur dissipée à l'extérieur.

Les pertes calorimétriques de la machine sont constituées:

- des pertes à l'intérieur de la surface de référence P_{irs} ,
- des pertes à l'extérieur de la surface de référence P_{ers} (par exemple, les paliers externes, le matériel d'excitation, les moteurs externes pour les pompes de refroidissement par eau).

Les pertes à l'intérieur de la surface de référence P_{irs} sont déterminées d'après:

$$P_{irs} = P_{irs,1} + P_{irs,2}$$

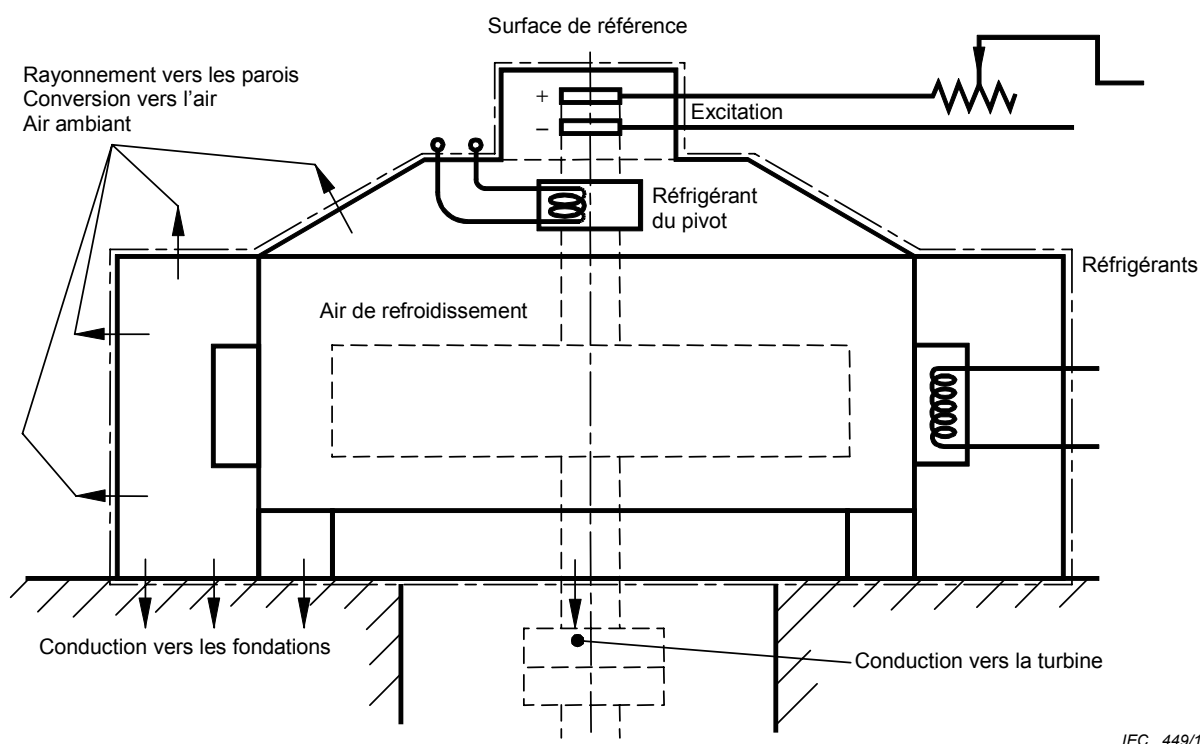
où:

- $P_{irs,1}$ sont les pertes mesurées de façon calorimétrique;
- $P_{irs,2}$ sont les pertes dissipées à travers la «surface de référence» par conduction, convection, rayonnement, fuite, etc.

La «surface de référence» est une surface enveloppant complètement la machine, de sorte que toutes les pertes produites à l'intérieur de celle-ci (P_{irs}), et non mesurées de façon calorimétrique, sont dissipées à travers celle-ci vers l'extérieur (voir la Figure 2).

Le matériel d'excitation peut se trouver ou non à l'intérieur de la surface de référence. Lorsqu'il est à l'extérieur de la surface de référence, il convient de déterminer les pertes du matériel d'excitation séparément, soit par une mesure, soit par un calcul.

NOTE $P_{irs,2}$ peuvent être négatives et en conséquence soustraites, lorsque la chaleur provenant de l'extérieur s'écoule dans la surface de référence.



IEC 449/10

Figure 2 – Surface de référence

7.3.2 Appareils calorimétriques

7.3.2.1 Débitmètres

Le débit volumique des fluides est mesuré au mieux par des débitmètres de type volumétrique ou de vitesse. On peut utiliser d'autres méthodes de mesure d'une précision égale ou supérieure.

Installer les débitmètres conformément aux instructions du fabricant (sections rectilignes en amont et en aval, position, etc.). Il est recommandé de contrôler le débit du fluide de refroidissement en actionnant une vanne disposée en aval du débitmètre.

Il convient de prendre soin à ce qu'il n'y ait aucune bulle d'air présente dans l'eau.

Les débitmètres doivent être étalonnés avant et après les mesures dans des conditions similaires à celles qui prévalent durant les mesures de l'essai.

Dans le cas de mesures volumétriques, le temps doit être mesuré au moyen d'un dispositif de chronométrage électrique. Le temps de mesure doit être au moins de 5 min, durant au moins 2 intervalles. Les valeurs moyennes doivent être enregistrées.

Lorsqu'une mesure est effectuée avec un débitmètre à lecture directe, 20 lectures doivent être enregistrées, afin de déterminer une valeur moyenne.

Des dispositions doivent être prises pour mesurer à la fois la pression et la température de l'eau dans le débitmètre.

7.3.2.2 Détecteurs thermiques

Les mesures thermiques doivent être effectuées de préférence par des détecteurs de température à résistance de platine, placés directement dans le liquide de refroidissement et alignés les uns avec les autres, de façon à obtenir des lectures directes pour déterminer l'élévation de température du liquide de refroidissement (eau, l'huile).

NOTE Des thermocouples sont autorisés, mais leur utilisation incorrecte peut augmenter l'incertitude. Des détecteurs thermiques disposés dans des poches thermométriques remplies d'huile sont également autorisés, mais ils ajoutent une incertitude supplémentaire.

Les instruments thermiques doivent être étalonnés avant et après les essais.

Des instruments d'enregistrement doivent être utilisés.

Si cela est possible, il convient d'isoler les tuyaux d'eau de la surface de référence, et bien au-delà du point de mesure, pour éviter un transfert de chaleur vers l'extérieur.

Une chicane d'égalsation doit être installée pour obtenir un écoulement homogène.

7.3.2.3 Refroidisseurs

Il convient d'effectuer séparément les mesures calorimétriques sur chaque circuit de refroidissement. Avec un refroidissement à fluide unique, un ou plusieurs calorimètres sont nécessaires pour l'huile des paliers, et un calorimètre est nécessaire pour l'eau de refroidissement des refroidisseurs à air ou à gaz. L'utilisation de deux fluides de refroidissement primaires, par exemple, de l'hydrogène et de l'eau pure, nécessite un ou plusieurs calorimètres, en fonction de la connexion des refroidisseurs et du domaine d'application de la mesure.

La Figure 3 représente quatre refroidisseurs gaz-eau connectés en parallèle.

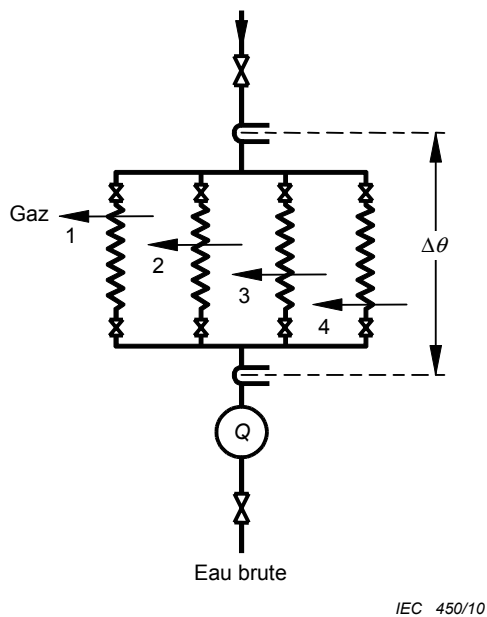


Figure 3 – Quatre refroidisseurs connectés en parallèle, un seul calorimètre, un seul fluide de refroidissement

NOTE Le résultat est indépendant de la distribution de l'eau dans les refroidisseurs en parallèle, de la distribution du gaz et de la distribution des pertes dans les écoulements partiels de gaz 1 à 4.

La Figure 4 représente une connexion en série de refroidisseurs destinés à être utilisés avec un refroidissement à deux fluides.

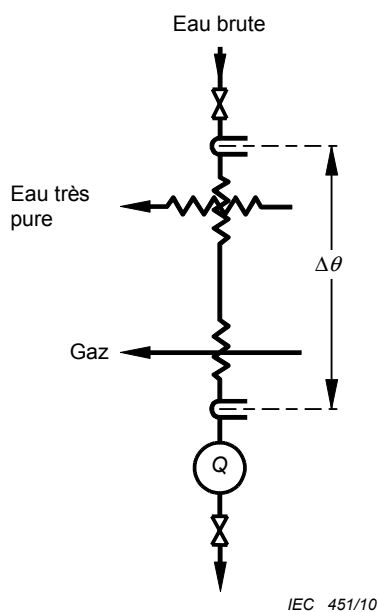


Figure 4 – Refroidisseurs connectés en série, deux fluides de refroidissements

Dans les deux cas, le total des pertes dissipées est déterminé d'après la mesure du débit volumique de l'eau de refroidissement Q , et en mesurant l'élévation totale de température $\Delta\theta$.

7.3.2.4 Disposition et branchements des tuyaux

Il est conseillé de déterminer les chemins de mesure pour les mesures d'écoulement d'huile et d'eau et les points de mesure de température lors de la prévision de la disposition des tuyaux, car des ajouts ou des modifications de l'installation ultérieurs sont non seulement coûteux, mais peuvent également avoir pour conséquence une contamination de l'huile des paliers et des circuits d'eau très pure.

L'installation du débitmètre doit autoriser des longueurs de tuyaux libres entre la vanne à tiroir et le débitmètre ayant les valeurs minimales suivantes, comme indiqué à la Figure 5. La longueur rectiligne de la tuyauterie d'entrée entre le débitmètre et S1 est ≥ 10 fois le diamètre nominal du tuyau et entre le débitmètre et S2 elle est ≥ 5 fois ce diamètre.

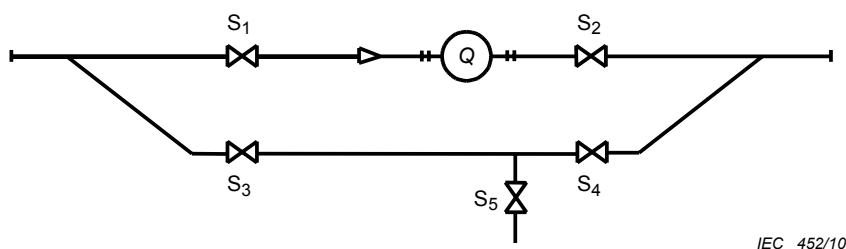
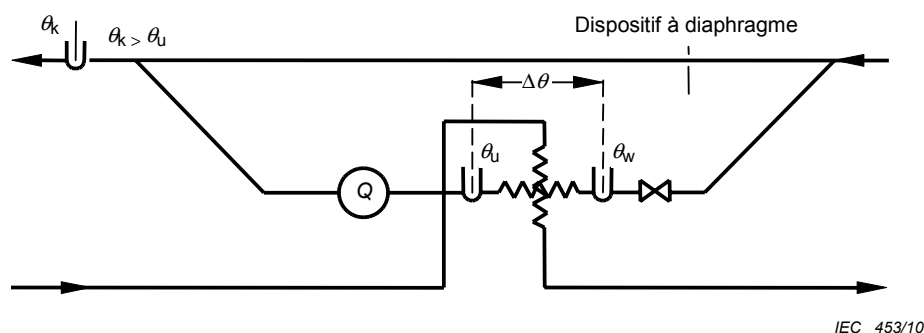


Figure 5 – Tuyauterie de dérivation

Pour permettre l'installation et le retrait du débitmètre sans interrompre le fonctionnement, un aménagement de tuyauterie de dérivation, comme représenté à la Figure 5, permet l'isolation du débitmètre. Une petite vanne S5 est requise pour vérifier que l'eau de refroidissement ne contourne pas le débitmètre (Q), c'est-à-dire que les vannes à tiroir S3 et S4 sont hermétiquement fermées.

Pour obtenir une température facilement mesurable, il convient d'utiliser une vanne disposée en aval du débitmètre pour contrôler le débit de l'eau.

Lorsque l'élévation de température du fluide de refroidissement est soit trop faible, soit qu'il n'est pas admissible de modifier le débit volumique (par exemple, l'huile des paliers), on doit utiliser une calorimétrie de contournement autorisant une différence de température $\Delta\theta$ plus grande pour diminuer l'incertitude. La tuyauterie parallèle, avec un dispositif d'ajustement (comme représenté sur la Figure 6) permet de mesurer une fraction du débit du fluide de refroidissement.



Légende

Q Débitmètre

θ_w Température de fluide de refroidissement chaud

θ_u Température à laquelle est refroidi, dans la tuyauterie de dérivation, le fluide réfrigérant partiellement dérivé

θ_k Température du mélange de θ_u et θ_w

Figure 6 – Tuyauterie parallèle

Pour améliorer la précision de la mesure, il convient d'isoler, si possible, le palier et sa tuyauterie de refroidissement.

7.3.3 Procédure d'essai

La machine en essai doit être complètement assemblée comme pour le fonctionnement normal.

Durant l'essai, la température de la machine en essai et la température du fluide de refroidissement doivent être maintenues aussi proches que possible des conditions normales de fonctionnement.

À la suite de l'assemblage de la machine, déterminer l'aire de la surface de référence. Diviser la surface en 10 à 15 segments d'aire approximativement égale et fixer des détecteurs thermiques à chaque segment. Installer suffisamment de détecteurs thermiques dans l'air ambiant pour déterminer l'élévation de température moyenne de la manière la plus précise possible.

La méthode calorimétrique peut être utilisée pour déterminer les pertes suivantes:

- Pertes par frottement et par ventilation (le rotor n'étant pas excité).
- Pertes dans le fer (à vide, habituellement à U_N et $1,05 U_N$).
- Pertes dans l'enroulement du stator et pertes supplémentaire en charge (l'enroulement du stator étant court-circuité, habituellement à I_N et $0,7 I_N$).
- Pertes totales (habituellement entre une charge de 0,5 et 1,0 avec un facteur de puissance assigné et unitaire) pour déterminer le rendement.

Lors de la détermination du rendement en additionnant des pertes séparées, il convient, et c'est essentiel, d'effectuer les mesures à la même température que celle du fluide de refroidissement.

Faire fonctionner la machine dans la condition d'essai sélectionnée, jusqu'à maintenir l'équilibre thermique. On considère que l'équilibre thermique du fluide de refroidissement est atteint lorsque la température de celui-ci ne varie pas de plus d'un gradient de 1 K par heure.

NOTE A titre de recommandation, la durée de l'essai varie selon le procédé de mesure des pertes et elle est probablement de 10 h à 15 h pour déterminer les pertes à pleine charge, et de 15 h à 30 h pour déterminer les pertes à vide.

Après avoir atteint la stabilité de température, enregistrer:

- Les valeurs moyennes du débitmètre pour chaque circuit de calorimètre: Q , p et θ .
- Les valeurs d'élévation de température pour chaque circuit de calorimètre: θ_n et θ_{n+1} .
- L'aire de la surface de référence.
- Les températures moyennes de la surface de référence: θ_{rs} .

7.3.4 Détermination des pertes

7.3.4.1 Pertes de l'essai

Les pertes de l'essai de la machine sont constituées des pertes à l'intérieur de la surface de référence P_{irs} et des pertes à l'extérieur de la surface de référence P_{ers} , comme défini en 7.3.1.

NOTE Les pertes dans les paliers à l'intérieur de la surface de référence sont incluses dans les pertes P_{irs} . Il convient, si possible, de les mesurer séparément.

7.3.4.2 Pertes dans le fluide de refroidissement $P_{irs,1}$

Pour chaque condition de fonctionnement et lorsque la stabilité de température est obtenue, les pertes (en kW) dissipées par chaque circuit de refroidissement sont:

$$P_{irs,1} = c_p \cdot Q \cdot \rho \cdot \Delta\theta$$

où:

- Q est le débit volumique du fluide de refroidissement, (m³/s);
- $\Delta\theta$ est l'élévation de température ($\theta_{n+1} - \theta_n$) du fluide de refroidissement en K par rapport à l'élévation de température totale $\Delta\theta$ (Figure 3);
- c_p est la capacité thermique spécifique du fluide de refroidissement, en kJ/(kg K) à la pression p ;
- ρ est la densité du fluide de refroidissement en kg/m³ à la température au point de mesure du débit.

Dans le cas où on utilise de l'eau comme fluide de refroidissement, c_p et ρ sont toutes deux déterminées d'après la Figure 7.

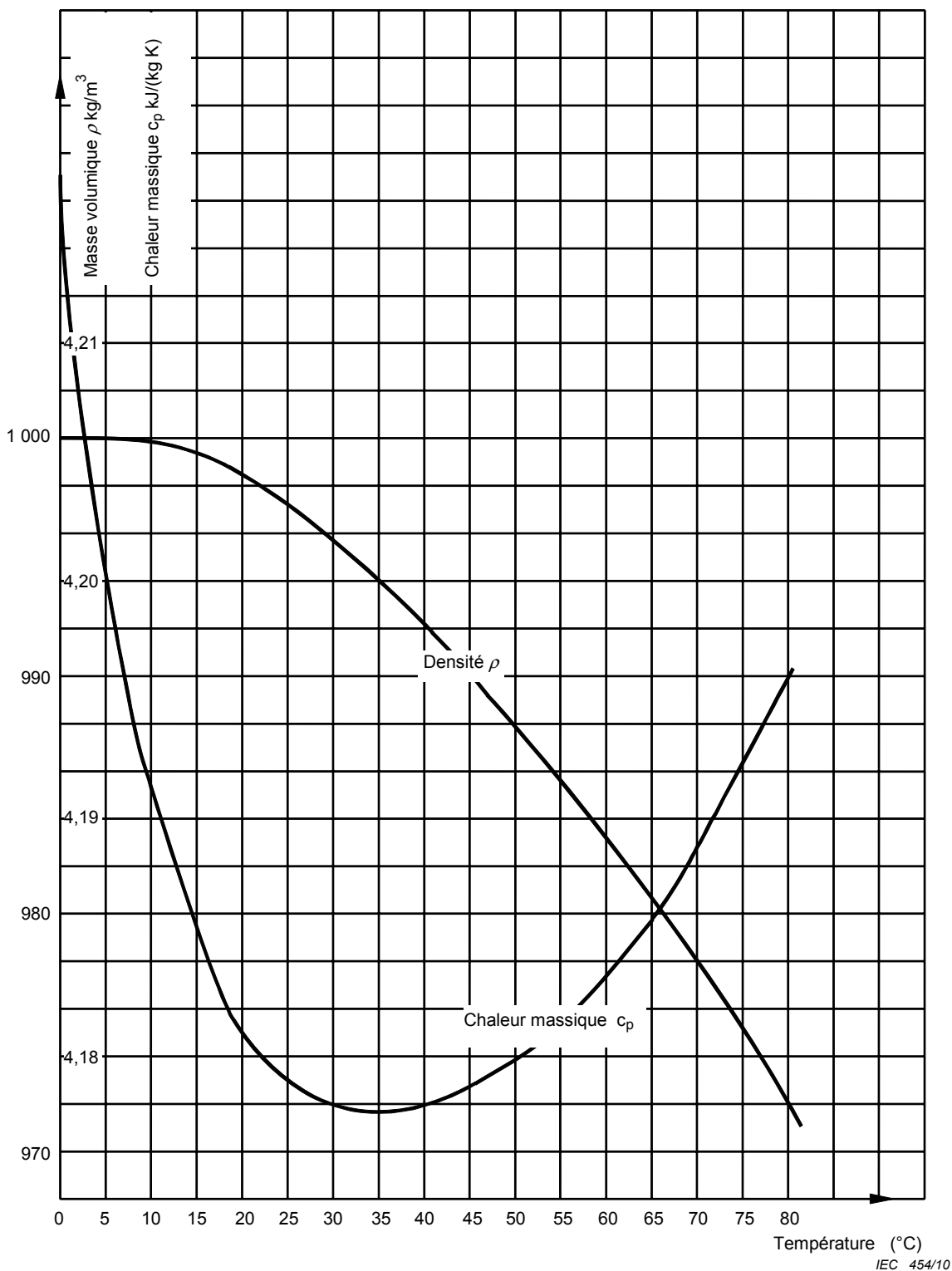


Figure 7 – Caractéristiques de l'eau pure en fonction de la température

Lorsqu'il y a un doute quelconque en ce qui concerne la précision des facteurs utilisés pour c_p et ρ , en particulier si l'eau de refroidissement contient des sels, il est nécessaire de mesurer c_p et ρ .

La mesure de température comprend la différence de températures due aux pertes dans les refroidisseurs et la tuyauterie associée entre les points de mesure, que l'on suppose être de

1 K pour une chute de pression de 4,2 MN/m². Les pertes correspondant à la chute de pression doivent être soustraites des pertes totales.

NOTE Les pertes dans les paliers peuvent être mesurées en utilisant de l'huile comme fluide de refroidissement, mais il y a moins d'incertitude si l'on effectue la mesure du côté eau d'un échangeur thermique huile-eau, car les caractéristiques thermiques de l'eau sont mieux connues.

7.3.4.3 Pertes dans la surface de référence $P_{irs,2}$

Ces pertes représentent une petite partie des pertes totales et sont constituées:

- des pertes, dissipées dans les fondations et dans l'arbre par conduction; (habituellement négligeables et très difficiles à mesurer),
- des pertes dissipées à travers la «surface de référence» par conduction, convection, rayonnement, fuite, etc.

Il convient de minimiser les pertes $P_{irs,2}$ par une isolation appropriée de la surface de référence ou de certaines parties de la machine. Cette procédure est adaptée à des emplacements où il est difficile de supprimer le courant d'air externe ou de maintenir des conditions de température ambiante relativement constantes.

Dans la pratique, en effectuant les essais de telle manière que les pertes $P_{irs,2}$ soient inférieures à 2,5 % des pertes P_{irs} mesurées à pleine charge et inférieures à 5 % des pertes P_{irs} déterminées par la méthode de mesure des pertes séparées, seules les pertes dissipées à la surface de la machine doivent être prises en considération. On peut obtenir ces pertes $P_{irs,2}$ d'après la formule:

NOTE $P_{irs,2}$ peuvent être négatives, lorsque la chaleur s'écoule dans la surface de référence et dans ce cas, elle doit être soustraite.

$$P_{irs,2} = h \times A \times \Delta\theta$$

où:

- $\Delta\theta$ est la différence de température entre la température moyenne de la surface de référence et la température de l'air ambiant;
- A est l'aire de la surface de référence;
- h est le coefficient de transfert thermique pour les pertes dissipées depuis les surfaces en contact avec l'air comme suit:

Pour une convection par air forcé:

- pour les surfaces externes:

$$h = 11 + 3 v [W/(m^2 \cdot K)],$$

où v est la vitesse de l'air ambiant en m/s,

- pour les surfaces entièrement situées à l'intérieur de la surface externe de la machine:

$$h = 5 + 3 v [W/(m^2 \cdot K)],$$

où v est la vitesse de l'air de refroidissement en m/s.

Pour la convection naturelle:

Les pertes dissipées par la surface sont comprises entre 10 W et 20 W/(m² • K). Un nombre raisonnable étant de 15 W/(m² • K), lorsqu'on a pris la précaution d'éliminer les courants d'air sur les surfaces de transfert.

7.3.4.4 Pertes externes, P_{ers}

Les pertes P_{ers} (évaluées séparément) sont principalement constituées:

- des pertes dans le rhéostat situé dans le circuit d'excitation principal, dans la régulation de tension, dans les circuits shunt et d'excitation, indépendants de l'excitatrice,
 - des pertes dans l'excitatrice et les bagues lorsque leurs circuits de refroidissement sont indépendants de ceux de la machine principale,
 - des pertes par frottement dans les paliers, lorsqu'ils sont entièrement ou partiellement à l'extérieur de la surface de référence.
-

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

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

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