

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

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

**Machines électriques tournantes –
Partie 4: Méthodes pour la détermination, à partir d'essais, des grandeurs des
machines synchrones**



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2008 IEC, Geneva, Switzerland

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

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

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

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

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

About the IEC

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

About IEC publications

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

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

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 It also gives information on projects, withdrawn and replaced publications.

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

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

- Electropedia: www.electropedia.org

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

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

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

Email: csc@iec.ch

Tel.: +41 22 919 02 11

Fax: +41 22 919 03 00

A propos de la CEI

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

A propos des publications CEI

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

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

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

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

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

- Electropedia: www.electropedia.org

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

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

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

Email: csc@iec.ch

Tél.: +41 22 919 02 11

Fax: +41 22 919 03 00

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

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

**Machines électriques tournantes –
Partie 4: Méthodes pour la détermination, à partir d'essais, des grandeurs des
machines synchrones**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX

XC

CONTENTS

FOREWORD.....	7
1 Scope.....	9
2 Normative references	9
3 Terms and definitions	9
4 Symbols and units	14
5 Overview of tests.....	15
6 Test procedures	18
6.1 General.....	18
6.1.1 Instrumentation requirements	18
6.1.2 Excitation system requirements	18
6.1.3 Test conditions	18
6.1.4 Per unit base quantities	19
6.1.5 Conventions and assumptions	19
6.1.6 Consideration of magnetic saturation.....	20
6.2 Direct measurements of excitation current at rated load.....	21
6.3 Direct-current winding resistance measurements.....	21
6.4 No-load saturation test	22
6.4.1 Test procedure	22
6.4.2 No-load saturation characteristic determination	23
6.5 Sustained three-phase short-circuit test.....	23
6.5.1 Test procedure	23
6.5.2 Three-phase sustained short-circuit characteristic	24
6.6 Motor no-load test	24
6.7 Phase shifting test.....	24
6.8 Over-excitation test at zero power factor	25
6.9 Negative excitation test	25
6.10 On-load test measuring the load angle	25
6.11 Low slip test.....	25
6.12 Sudden three-phase short-circuit test	26
6.13 Voltage recovery test.....	27
6.14 Suddenly applied short-circuit test following disconnection from line	27
6.15 Direct current decay test in the armature winding at standstill test.....	27
6.16 Suddenly applied excitation test with armature winding open-circuited	28
6.17 Applied voltage test with the rotor in direct and quadrature axis positions	29
6.18 Applied voltage test with the rotor in arbitrary position.....	29
6.19 Single phase voltage test applied to the three phases	30
6.20 Line-to-line sustained short-circuit test	30
6.21 Sudden line-to-line short-circuit.....	31
6.22 Line-to-line and to neutral sustained short-circuit test.....	31
6.23 Negative-phase sequence test	32
6.24 Field current decay test, with the armature winding open-circuited	32
6.24.1 Test at rated speed	32
6.24.2 Test at standstill	32
6.25 Field current decay test at rated speed with the armature-winding short-circuited	32
6.26 Suddenly applied excitation with armature winding short-circuited	33

6.27	Field current decay test at standstill with two phases of armature winding short-circuited	33
6.28	Applied voltage test with rotor removed	33
6.29	No-load retardation test	34
6.30	Suspended rotor oscillation test	34
6.31	Locked rotor test	35
6.32	Over-excitation test at zero power factor and variable armature voltage	35
6.33	Asynchronous operation during the low-voltage test	35
6.34	Applied variable frequency voltage test at standstill	36
7	Determination of quantities	38
7.1	Graphic procedures and analysis of oscillographic records	38
7.1.1	No-load saturation and three-phase, sustained short-circuit curves	38
7.1.2	Sudden three-phase short-circuit test	38
7.1.3	Voltage recovery test	41
7.1.4	Direct current decay in the armature winding at standstill	41
7.1.5	Suddenly applied excitation test with armature winding open-circuited	43
7.2	Direct-axis synchronous reactance	44
7.2.1	From no-load saturation and three-phase sustained short-circuit test	44
7.2.2	From motor no-load test	44
7.2.3	From phase shifting test	44
7.2.4	From on-load test measuring the load angle	44
7.3	Direct-axis transient reactance	45
7.3.1	From sudden three-phase short-circuit test	45
7.3.2	From voltage recovery test	45
7.3.3	From d.c. decay test in the armature winding at standstill	45
7.3.4	Calculation from test values	45
7.4	Direct-axis sub-transient reactance	45
7.4.1	From sudden three-phase short-circuit test	45
7.4.2	From voltage recovery test	46
7.4.3	From applied voltage test with the rotor in direct and quadrature axis	46
7.4.4	From applied voltage test with the rotor in arbitrary position	46
7.5	Quadrature-axis synchronous reactance	47
7.5.1	From negative excitation test	47
7.5.2	From low slip test	47
7.5.3	From phase shifting test	48
7.5.4	From on-load test measuring the load angle	49
7.6	Quadrature-axis transient reactance	49
7.6.1	From direct current decay test in the armature winding at standstill	49
7.6.2	Calculation from test values	49
7.7	Quadrature-axis sub-transient reactance	49
7.7.1	From applied voltage test with the rotor in direct and quadrature position	49
7.7.2	From applied voltage test with the rotor in arbitrary position	50
7.8	Zero-sequence reactance	50
7.8.1	From single-phase voltage application to the three phases	50
7.8.2	From line-to-line and to neutral sustained short-circuit test	50
7.9	Negative-sequence reactance	51
7.9.1	From line-to-line sustained short-circuit test	51
7.9.2	From negative-phase sequence test	51

7.9.3	Calculation from test values.....	52
7.9.4	From sudden line-to-line short-circuit test.....	52
7.9.5	From direct-current decay test at standstill	52
7.10	Armature leakage reactance.....	52
7.11	Potier reactance	53
7.12	Zero-sequence resistance	54
7.12.1	From single-phase voltage test applied to the three phases.....	54
7.12.2	From line-to-line and to neutral sustained short-circuit test.....	54
7.13	Positive-sequence armature winding resistance	54
7.14	Negative-sequence resistance.....	54
7.14.1	From line-to-line sustained short-circuit test	54
7.14.2	From negative-phase sequence test	55
7.15	Armature and excitation winding resistance.....	55
7.16	Direct-axis transient short-circuit time constant	56
7.16.1	From sudden three-phase short-circuit test.....	56
7.16.2	From field current decay at rated speed with armature winding short-circuited	56
7.16.3	From direct current decay test at standstill	56
7.16.4	From suddenly applied excitation with armature winding short-circuited	56
7.16.5	From field current decay test at standstill with two phases of armature winding short-circuited.....	56
7.17	Direct-axis transient open-circuit time constant	56
7.17.1	From field current decay at rated speed with armature winding open	56
7.17.2	From field current decay test at standstill with armature winding open	56
7.17.3	From voltage recovery test.....	56
7.17.4	From direct-current decay test at standstill	57
7.17.5	From suddenly applied excitation with armature winding open-circuited	57
7.18	Direct-axis sub-transient short-circuit time constant.....	57
7.19	Direct-axis sub-transient open-circuit time constant.....	57
7.19.1	From voltage recovery test	57
7.19.2	From direct-current decay test at standstill	57
7.20	Quadrature-axis transient short-circuit time constant.....	57
7.20.1	Calculation from test values.....	57
7.20.2	From direct-current decay test at standstill	57
7.21	Quadrature-axis transient open-circuit time constant	57
7.21.1	Determination from direct-current decay test at standstill.....	57
7.22	Quadrature-axis sub-transient short-circuit time constant	57
7.22.1	Calculation from test values.....	57
7.22.2	Determination from direct-current decay test at standstill.....	58
7.23	Quadrature-axis sub-transient open-circuit time constant	58
7.23.1	From direct-current decay test at standstill	58
7.24	Armature short-circuit time constant	58
7.24.1	From sudden three-phase short-circuit test.....	58
7.24.2	Calculation from test values.....	58
7.25	Rated acceleration time and stored energy constant.....	58
7.25.1	From suspended rotor oscillation test	58
7.25.2	From no-load retardation test	59

7.26	Rated excitation current	59
7.26.1	From direct measurement	59
7.26.2	Potier diagram	60
7.26.3	ASA diagram	61
7.26.4	Swedish diagram	62
7.27	Excitation current referred to rated armature sustained short-circuit current	63
7.27.1	From over-excitation test at zero power factor	63
7.27.2	From sustained three-phase short-circuit test	64
7.28	Frequency response characteristics	64
7.28.1	General	64
7.28.2	From asynchronous operation at reduced voltage	64
7.28.3	From applied variable frequency voltage test at standstill	65
7.28.4	From direct current decay test in the armature winding at standstill	66
7.29	Short-circuit ratio	67
7.30	Rated voltage regulation	67
7.30.1	From direct measurement	67
7.30.2	From no-load saturation characteristic and known field current at rated load	67
7.31	Initial starting impedance of synchronous motors	67
Annex A (informative)	Testing cross-reference	69
Annex B (informative)	Calculation scheme for frequency response characteristics	72
Annex C (informative)	Conventional electrical machine model	74
Figure 1	– Schematic for d.c. decay test at standstill	28
Figure 2	– Circuit diagram for line-to-line short-circuit test	30
Figure 3	– Circuit diagram for line-to-line and to neutral sustained short-circuit test	31
Figure 4	– Search coil installation with rotor removed	34
Figure 5	– Power and current versus slip (example)	36
Figure 6	– Schematic for variable frequency test at standstill	36
Figure 7	– Recorded quantities from variable frequency test at standstill (example)	37
Figure 8	– Combined saturation and short-circuit curves	38
Figure 9	– Transient and sub-transient component of short-circuit current	39
Figure 10	– Determination of transient component of short-circuit current	40
Figure 11	– Graphical determination of aperiodic component	40
Figure 12	– Transient and sub-transient component of recovery voltage	41
Figure 13	– Semi-logarithmic plot of decay currents	42
Figure 14	– Suddenly applied excitation with armature winding open-circuited	43
Figure 15	– No-load e.m.f. and excitation current for one pole-pitch slip	47
Figure 16	– Current envelope from low-slip test	48
Figure 17	– Determination of Potier reactance	53
Figure 18	– Potier's diagram	60
Figure 19	– ASA diagram	61
Figure 20	– Swedish diagram	62
Figure 21	– Excitation current from over-excitation at zero power factor	63
Figure 22	– Frequency response characteristics at low frequencies (example)	65

Figure C.1 – Equivalent circuit model of a salient pole machine	74
---	----

Table 1 – Test methods and cross-reference table	16
--	----

Table A.1 – Test cross-reference	69
--	----

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60034-4:2008

Withd2Wm

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

ROTATING ELECTRICAL MACHINES –

Part 4: Methods for determining synchronous machine quantities from tests

FOREWORD

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

International Standard IEC 60034-4 has been prepared by IEC technical committee 2: Rotating machinery.

This third edition cancels and replaces the second edition published in 1985 and its amendment 1 (1995). This edition constitutes a technical revision. The main changes with respect to the previous edition are listed below:

- Tests described in Supplement A of the previous edition were partly removed for lack of relevance in current practise.
- Provisions were made for tests on machines with brushless excitation.
- A table of test methods indicates preferred tests, and a test cross-reference is provided.
- The conventional two-axes salient-pole machine model description was added in an Annex.

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

FDIS	Report on voting
2/1488/FDIS	2/1495/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.

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

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

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

ROTATING ELECTRICAL MACHINES –

Part 4: Methods for determining synchronous machine quantities from tests

1 Scope

This part of IEC 60034 applies to three-phase synchronous machines of 1 kVA rating and larger with rated frequency of not greater than 500 Hz and not less than 10 Hz.

Most of the methods are intended to be used for machines having an excitation winding with slip-rings and brushes for their supply. Synchronous machines with brushless excitation require special effort for some of the tests. For machines with permanent magnet excitation, there is a limited applicability of the described tests, and special precautions have to be taken against irreversible demagnetization.

Excluded are axial-field machines and special synchronous machines such as inductor type machines and transversal flux machines.

It is not intended that this standard be interpreted as requiring any or all of the tests described therein on any given machine. The particular tests to be carried out shall be subject to agreement between manufacturer and customer.

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 60034-1:2004, *Rotating electrical machines – Part 1: Rating and performance*

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

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

IEC 60051 (all parts), *Direct acting indicating analogue electrical measuring instruments and their accessories*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the following terms and definitions apply.

3.1

initial starting impedance, synchronous motors

quotient of the applied armature voltage and the sustained average armature current, the machine being at standstill

3.2

direct-axis synchronous reactance

the quotient of the sustained value of that fundamental a.c. component of armature voltage, which is produced by the total direct-axis primary flux due to direct-axis armature current, and the value of the fundamental a.c. component of this current, the machine running at rated speed

[IEV 411-50-07]

3.3

direct-axis transient reactance

the quotient of the initial value of a sudden change in that fundamental a.c. component of armature voltage, which is produced by the total direct-axis primary flux, and the value of the simultaneous change in fundamental a.c. component of direct-axis armature current, the machine running at rated speed and the high decrement components during the first cycles being excluded

[IEV 411-50-09]

3.4

direct-axis sub-transient reactance

the quotient of the initial value of a sudden change in that fundamental a.c. component of armature voltage, which is produced by the total direct-axis armature flux, and the value of the simultaneous change in fundamental a.c. component of direct-axis armature current, the machine running at rated speed

[IEV 411-50-11]

3.5

quadrature-axis synchronous reactance

the quotient of the sustained value of that fundamental a.c. component of armature voltage, which is produced by the total quadrature-axis primary flux due to quadrature-axis armature current, and the value of the fundamental a.c. component of this current, the machine running at rated speed

[IEV 411-50-08]

3.6

quadrature-axis transient reactance

the quotient of the initial value of a sudden change in that fundamental a.c. component of armature voltage, which is produced by the total quadrature-axis armature winding flux, and the value of the simultaneous change in fundamental a.c. component of quadrature-axis armature current, the machine running at rated speed and the high decrement components during the first cycles being excluded

[IEV 411-50-10]

3.7

quadrature-axis sub-transient reactance

the quotient of the initial value of a sudden change in that fundamental a.c. component of armature voltage, which is produced by the total quadrature-axis primary flux and the value of the simultaneous change in fundamental a.c. component of quadrature-axis armature current, the machine running at rated speed

[IEV 411-50-12]

3.8

positive sequence reactance

the quotient of the reactive fundamental component of the positive sequence armature voltage, due to the sinusoidal positive sequence armature current at rated frequency, by the value of that component of current, the machine running at rated speed

[IEV 411-50-14]

3.9**negative sequence reactance**

the quotient of the reactive fundamental component of negative sequence armature voltage, due to the sinusoidal negative sequence armature current at rated frequency, by the value of that component of current, the machine running at rated speed

[IEV 411-50-15]

3.10**zero sequence reactance**

the quotient of the reactive fundamental component of zero sequence armature voltage, due to the presence of fundamental zero sequence armature current at rated frequency, by the value of that component of current, the machine running at rated speed

[IEV 411-50-16]

3.11**Potier reactance**

a reactance taking into account the leakage of the field winding, on load and in the over-excited region, which is used in place of the armature leakage reactance to calculate the excitation on load by means of the Potier method

[IEV 411-50-13]

3.12**armature-leakage reactance**

quotient of the reactive fundamental component of armature voltage due to the leakage flux of armature winding and the fundamental component of armature current, the machine running at rated speed

3.13**armature resistance**

resistance measured by direct current between terminals of the armature winding, assigned to a certain winding temperature, expressed as per phase value

3.14**excitation winding resistance**

resistance measured by direct current between terminals of the excitation winding, assigned to a certain winding temperature

3.15**positive sequence resistance**

the quotient of the in-phase component of positive sequence armature voltage corresponding to losses in the armature winding and stray load losses due to the sinusoidal positive sequence armature current, by the value of that component of current, the machine running at rated speed

[IEV 411-50-18]

3.16**negative sequence resistance**

the quotient of the in-phase fundamental component of negative sequence armature voltage, due to the sinusoidal negative sequence armature current at rated frequency, by the value of that component of current, the machine running at rated speed

[IEV 411-50-19]

3.17**zero sequence resistance**

the quotient of the in-phase fundamental component of zero sequence armature voltage, due to the fundamental zero sequence armature current of rated frequency, by the value of that component of current, the machine running at rated speed

[IEV 411-50-20]

3.18

short-circuit ratio

the ratio of the field current for rated armature voltage on open-circuit to the field current for rated armature current on sustained symmetrical short-circuit, both with the machine running at rated speed

[IEV 411-50-21]

3.19

direct-axis transient open-circuit time constant

the time required, following a sudden change in operating conditions, for the slowly changing component of the open-circuit armature voltage, which is due to direct-axis flux, to decrease to $1/e$, that is 0,368 of its initial value, the machine running at rated speed

[IEV 411-48-27]

3.20

direct-axis transient short-circuit time constant

the time required, following a sudden change in operating conditions, for the slowly changing component of direct-axis short-circuit armature current to decrease to $1/e$, that is 0,368 of its initial value, the machine running at rated speed

[IEV 411-48-28]

3.21

direct-axis sub-transient open-circuit time constant

the time required, following a sudden change in operating conditions, for the rapidly changing component present during the first few cycles of the open-circuit armature winding voltage which is due to direct-axis flux, to decrease to $1/e$, that is 0,368 of its initial value, the machine running at rated speed

[IEV 411-48-29]

3.22

direct-axis sub-transient short-circuit time constant

the time required, following a sudden change in operating conditions, for the rapidly changing component, present during the first few cycles in the direct-axis short-circuit armature current, to decrease to $1/e$, that is 0,368 of its initial value, the machine running at rated speed

[IEV 411-48-30]

3.23

quadrature-axis transient open-circuit time constant

the time required, following a sudden change in operating conditions, for the slowly changing component of the open-circuit armature winding voltage which is due to quadrature-axis flux, to decrease to $1/e$, that is 0,368 of its initial value, the machine running at rated speed

[IEV 411-48-32]

3.24

quadrature-axis transient short-circuit time constant

the time required, following a sudden change in operating conditions, for the slowly changing component of quadrature-axis short-circuit armature winding current, to decrease to $1/e$, that is 0,368 of its initial value, the machine running at rated speed

[IEV 411-48-33]

3.25**quadrature-axis sub-transient open-circuit time constant**

the time required, following a sudden change in operating conditions, for the rapidly changing component of the open-circuit armature winding voltage which is due to quadrature-axis flux, to decrease to $1/e$, that is 0,368 of its initial value, the machine running at rated speed

[IEV 411-48-34]

3.26**direct-axis open-circuit equivalent damper circuit time constant**

time required for the induced current component in the equivalent damper circuit to decrease to $1/e \approx 0,368$ of its initial value following a sudden change in operating conditions with open-circuited armature winding and the excitation winding being also open, the machine running at rated speed

3.27**direct-axis short-circuit equivalent damper winding time constant**

time required for the induced current component of the equivalent damper winding to decrease to $1/e \approx 0,368$ of its initial value following a sudden change in operating conditions with short-circuited armature winding the excitation winding being open, and the machine running at rated speed

3.28**quadrature-axis sub-transient short-circuit time constant**

the time required, following a sudden change in operating conditions, for the rapidly changing component present during the first few cycles in the quadrature-axis short-circuit armature winding current, to decrease to $1/e$, that is 0,368 of its initial value, the machine running at rated speed

[IEV 411-48-35]

3.29**short-circuit time constant of armature windings**

the time required, following a sudden change in operating conditions, for the d.c. component present in the short-circuit armature winding current, to decrease to $1/e$, that is 0,368 of its initial value, the machine running at rated speed

[IEV 411-48-31]

3.30**unit acceleration time**

the time which would be required to bring the rotating parts of a machine from rest to rated speed if the accelerating torque were constant and equal to the quotient of rated active power by rated angular velocity

[IEV 411-48-15]

3.31**stored energy constant**

quotient of the kinetic energy stored in the rotor when running at rated speed and of the rated apparent power

3.32**rated excitation current**

current in the excitation winding when the machine operates at rated voltage, current, power-factor and speed

3.33**excitation current, corresponding to the rated armature short-circuit current**

current in the excitation winding when the machine operates at rated speed and sustained rated armature current, the armature (primary) winding being short-circuited

3.34

rated voltage regulation

change in the terminal voltage when rated operation is replaced by no-load operation with open-circuit armature and with unchanged speed and excitation current

3.35

frequency response characteristics

a set of characteristic curves or analytical expressions relating complex admittance or its reciprocal complex impedance (or components thereof) to slip at rated supplied frequency unless otherwise stated

3.36

frequency response characteristic of direct-axis reactance

complex quotient expressed as a slip function of the sustained complex value (vector) of that fundamental component of armature voltage which is produced by the d-axis armature current, and the vector of the fundamental component of this current, the machine running at a given slip, with the excitation winding short-circuited

NOTE The term for the complex representation of a sinusoidal quantity of one single frequency is phasor or, alternatively, vector which is the term used in this standard.

3.37

frequency response characteristic of quadrature-axis reactance

complex quotient expressed as a slip function of the sustained vector of that fundamental component of armature voltage which is produced by the q-axis armature flux due to q-axis armature current and the vector of the fundamental component of this current, the machine running at a given slip, with the excitation winding short-circuited

3.38

frequency response characteristic of excitation factor

complex quotient of the sustained vector of the armature voltage, produced by the current in the excitation winding at frequency $s \cdot f$, and the complex value of the voltage applied to the excitation winding, the machine running at a rated speed

NOTE There are several methods of deriving the frequency response characteristics (3.36 to 3.38) (or in the case of 3.36 and 3.37 their reciprocal values), see for instance 7.28.2 to 7.28.4. Characteristics may be obtained with the excitation winding closed through a specified impedance.

4 Symbols and units

f	Frequency
f_N	Rated frequency
$G(js)$	Complex frequency response characteristic of excitation factor
H	Stored energy constant
I, i	Current
I_N	Rated current
I_{fk}	Excitation current, for rated armature short-circuit current
I_{fN}	Rated excitation current
K_c	Short-circuit ratio
$R_{(0)}$	Zero-sequence resistance
$R_{(1)}$	Positive-sequence armature winding resistance
$R_{(2)}$	Negative-sequence resistance
R_a	Armature direct-current resistance
R_f	Excitation winding direct-current resistance
s	Slip
S_N	Rated apparent power

U, u	Voltage
U_N	Rated voltage
$X_{(0)}$	Zero-sequence reactance
$X_{(1)}$	Positive-sequence reactance
$X_{(2)}$	Negative-sequence reactance
X_d	Direct-axis synchronous reactance
X'_d	Direct-axis transient reactance
X''_d	Direct-axis sub-transient reactance
X_p	Potier reactance
X_q	Quadrature-axis synchronous reactance
X'_q	Quadrature-axis transient reactance
X''_q	Quadrature-axis sub-transient reactance
X_σ	Armature-leakage reactance
$X_d(j\omega)$	Complex frequency response characteristic of direct-axis reactance
$X_q(j\omega)$	Complex frequency response characteristic of quadrature-axis reactance
Z	Impedance
Z_N	Rated impedance
ΔU_N	Rated voltage regulation
δ	Load angle
τ_a	Armature short-circuit time constant
τ_{kd}	Direct-axis short-circuit equivalent damper winding time constant
τ_{kdo}	Direct-axis open-circuit equivalent damper circuit time constant
τ'_d	Direct-axis transient short-circuit time constant
τ'_{do}	Direct-axis transient open-circuit time constant
τ'_q	Quadrature-axis transient short-circuit time constant
τ'_{qo}	Quadrature-axis transient open-circuit time constant
τ''_d	Direct-axis sub-transient short-circuit time constant
τ''_{do}	Direct-axis sub-transient open-circuit time constant
τ''_q	Quadrature-axis sub-transient short-circuit time constant
τ''_{qo}	Quadrature-axis sub-transient open-circuit time constant
τ_J	Unit acceleration time

5 Overview of tests

Table 1 gives a cross-reference table of the tests to determine synchronous machine quantities and indicates preferred methods.

Table 1 – Test methods and cross-reference table

Quantity	Clause	Test description	Test	Preference/ uncertainty
Reactances				
Direct-axis synchronous reactance X_d	7.2.1	No-load saturation, sustained three-phase short-circuit	6.4 and 6.5	Preferred (unsaturated)
	7.2.2	Motor no-load	6.6	Preferred (saturated)
	7.2.3	Phase shifting	6.7	
	7.2.4	On-load measuring the load angle	6.10	
Direct-axis transient reactance X'_d	7.3.1	Sudden three-phase short-circuit	6.12	Preferred
	7.3.2	Voltage recovery	6.13	
	7.3.3	DC decay in the armature winding at standstill	6.15	
	7.3.4	Calculation from test values	-	
Direct-axis sub-transient reactance X''_d	7.4.1	Sudden three-phase short-circuit	6.12	Preferred
	7.4.2	Voltage recovery	6.13	
	7.4.3	Applied voltage test with rotor in direct and quadrature axis	6.17	
	7.4.4	Applied voltage with the rotor in arbitrary position	6.18	
Quadrature axis synchronous reactance X_q	7.5.1	Negative excitation	6.9	Preferred (unsaturated)
	7.5.2	Low slip	6.11	
	7.5.3	Phase shifting	6.7	
	7.5.4	On-load measuring the load angle	6.10	
Quadrature-axis transient reactance X'_q	7.6.1	DC decay test at standstill	6.15	
	7.6.2	Calculation from test values	-	
Quadrature-axis sub-transient reactance X''_q	7.7.1	Applied voltage test with rotor in direct and quadrature axis	6.17	Preferred
	7.7.2	Applied voltage with the rotor in arbitrary position	6.18	
Zero-sequence reactance $X_{(0)}$	7.8.1	Single-phase voltage application to the three phases	6.19	Preferred
	7.8.2	Line-to-line and to neutral sustained short-circuit	6.22	
Negative-sequence reactance $X_{(2)}$	7.9.1	Line-to-line sustained short-circuit	6.20	Preferred
	7.9.2	Negative-phase sequence	6.23	
	7.9.3	Calculation from test values	-	
	7.9.4	Sudden line-to-line short-circuit	6.21	
	7.9.5	DC decay in the armature winding at standstill	6.15	
Armature leakage reactance X_σ	7.10	Rotor removed	6.28	
Potier reactance X_p	7.11	No-load saturation, sustained three-phase short-circuit	6.4 and 6.5	
Resistances				
Zero-sequence resistance $R_{(0)}$	7.12.1	Single-phase voltage application to the three phases	6.19	Preferred
	7.12.2	Line-to-line and to neutral sustained short-circuit	6.22	
Positive-sequence armature winding resistance $R_{(1)}$	7.13	Calculation from test values	-	
Negative-sequence resistance $R_{(2)}$	7.14.1	Line-to-line sustained short-circuit	6.20	Preferred
	7.14.2	Negative-phase sequence	6.23	
Armature resistance R_a	7.15	Ammeter-voltmeter or bridge	6.3	
Excitation winding resistance R_f	7.15	Ammeter-voltmeter or bridge	6.3	

Table 1 (continued)

Quantity	Clause	Test description	Test	Preference/ uncertainty
Time Constants				
Direct-axis transient short-circuit time constant τ'_d	7.16.1 7.16.2 7.16.3 7.16.4 7.16.5	Sudden three-phase short-circuit Field current decay at rated speed with armature winding short-circuited DC decay in the armature winding at standstill Suddenly applied excitation with short-circuited armature Field current decay at standstill with two phases of armature winding short-circuited	6.12 6.25 6.15 6.26 6.27	Preferred
Direct-axis transient open-circuit time constant τ'_{do}	7.17.1 7.17.2 7.17.3 7.17.4 7.17.5	Field current decay, with the armature winding open-circuited, at rated speed Field current decay, with the armature winding open-circuited, at standstill Voltage recovery DC decay in the armature winding at standstill Suddenly applied excitation with open-circuited armature	6.24.1 6.24.2 6.13 6.15 6.16	Preferred
Direct-axis sub-transient short-circuit time constant τ''_d	7.18	Sudden three-phase short-circuit	6.12	
Direct-axis sub-transient open-circuit time constant τ''_{do}	7.19.1 7.19.2	Voltage recovery DC decay in the armature winding at standstill	6.13 6.15	Preferred
Quadrature-axis transient short-circuit time constant τ'_q	7.20.1 7.20.2	Calculation from test values DC decay in the armature winding at standstill	- 6.15	Preferred
Quadrature-axis transient open-circuit time constant τ'_{qo}	7.21.1	DC decay in the armature winding at standstill	6.15	
Quadrature-axis sub-transient short-circuit time constant τ''_q	7.22.1 7.22.2	Calculation from test values DC decay in the armature winding at standstill	- 6.15	Preferred
Quadrature-axis sub-transient open-circuit time constant τ''_{qo}	7.23.1	DC decay in the armature winding at standstill	6.15	
Armature short-circuit time constant τ_a	7.24.1 7.24.2	Sudden three-phase short-circuit Calculation from test values	6.12 -	Preferred
Other quantities				
Unit acceleration time τ_J , stored energy constant H	7.25.1	Suspended rotor oscillation	6.30	-
	7.25.2	No-load retardation	6.29	Preferred
Rated excitation current i_{fN}	7.26.1 7.26.2 7.26.3 7.26.4	Direct measurement Potier diagram ASA diagram Swedish diagram	6.2 - - -	Preferred
Excitation current, rated armature short-circuit current i_{fk}	7.27.1 7.27.2	Over-excitation at zero power-factor and variable armature (primary) winding voltage Sustained three-phase short-circuit test	6.32 6.5	Preferred
Frequency response characteristics	7.28.2 7.28.3 7.28.4	Asynchronous operation at reduced voltage Applied variable frequency voltage at standstill DC decay in the armature winding at standstill	6.33 6.34 6.15	Preferred
Short-circuit ratio K_c	7.29	No-load saturation, Sustained three-phase short-circuit	6.4 6.5	
Rated voltage regulation ΔU_N	7.30.1 7.30.2	Direct measurement By diagram from no-load saturation characteristic and known i_{fN}	6.2 6.4.2	Preferred
Initial starting impedance of synchronous motors Z_{st}	7.31	Locked rotor	6.31	

6 Test procedures

6.1 General

6.1.1 Instrumentation requirements

Indicating measuring instruments and their accessories, such as measuring transformers, shunts and bridges used during tests, unless otherwise stated, shall have an accuracy class of at least 0,5 according to IEC 60051. The instruments used for determining d.c. resistances shall have an accuracy class of at least 0,2.

The accuracy class for the oscillographic measuring and other recording equipment should be chosen with due regard to the rating of the machine to be tested.

The speed of rotation may be determined either by means of a stroboscopic method or by using tachometers (mechanical or electrical) or by means of a frequency meter when the machine is running synchronously with any other machine or running on its own.

6.1.2 Excitation system requirements

In case of a synchronous machine provided with a brushless exciter, the excitation winding is connected via a rotating converter, mostly a diode rectifier, to the exciter armature winding without slip-rings. As a result some tests either requiring measurement of excitation current, feeding the field winding from a separate source or its short-circuiting may not be conducted without special arrangements (for example, mounting temporary slip-rings on the shaft).

6.1.3 Test conditions

Tests for determining synchronous machine quantities shall be conducted on a complete machine with all devices for automatic regulation being switched off unless specifically required by the test procedure. Devices which have no impact on the values of the parameters need not be installed.

Unless otherwise stated, the tests shall be conducted at the rated speed of rotation.

NOTE Test methods with the rotor at standstill may give results different from those received on a rotating machine, for example when damper winding quantities are dependent upon centrifugal forces.

Winding temperatures are measured when

- the quantities to be determined by the test depend on temperature, or
- safety considerations require monitoring the temperature during tests.

In cases where transient temperatures might exceed the safe values, it is recommended that the tests be started only after the machine has been run at no-load with normal cooling or has been at rest for a period to ensure low starting temperature, and the temperatures should be carefully monitored or pre-determined so that the test may be discontinued before the temperature becomes excessive.

During the test, the machine winding connection, as a rule, should be as for normal working.

The determination of all quantities is made with star connection of the armature winding (unless special connections such as open delta are specified). When the armature winding is actually delta connected, the values of the quantities, obtained in accordance with this standard, shall correspond to an equivalent star-connected winding.

6.1.4 Per unit base quantities

All equations are given either in physical values using SI units, or in per unit referred to specified basic values. Generally, these basic values are rated voltage (U_N), and rated apparent power (S_N), with derived basic current

$$I_N = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_N}$$

and basic impedance

$$Z_N = \frac{U_N^2}{S_N} = \frac{S_N}{3I_N^2}$$

Intermediate calculations may be performed in physical values with subsequent conversion to the quantity in per unit value. It is recommended to express time in seconds. In the calculations of characteristics, and when drawing diagrams, excitation current corresponding to the rated voltage on the no-load curve is taken as the basic value of the excitation current. When the diagrams and characteristics are drawn, the currents and voltages may be designated in physical values.

If a machine has several rated values, those taken for the basic values shall be stated.

Unless otherwise stated, the above-mentioned system is accepted in this standard. Small letters designate the quantities in per unit values, and capital letters designate physical quantities.

In the formulae given in this standard for determining synchronous reactances, the positive sequence armature resistance, unless otherwise stated, is considered to be negligible. When the positive sequence armature resistance constitutes more than 0,2 of the measured reactance, the formulae shall be considered as approximate.

6.1.5 Conventions and assumptions

The definitions of the majority of quantities and their experimental methods of determination, as given in this standard, correspond to the widely accepted two-axis theory of synchronous machines with approximate representation of all circuits additional to the field-winding, and stationary circuits relative to it, by two equivalent circuits, one along the direct axis and the other along the quadrature axis, neglecting armature resistance or taking it into consideration only approximately.

As a consequence of this approximate machine representation, three reactances (synchronous, transient and sub-transient) and two time constants (transient and sub-transient) are considered in this standard for transient phenomena studies along the direct axis, two reactances (synchronous and sub-transient) and one time constant (sub-transient) along the quadrature axis, and the armature short-circuit time constant.

These time constants are based on the assumption of an exponential decrease of the particular components of quantities involved (currents, voltages, etc.). If the plot of the measured component under consideration does not decrease as a pure exponential, as in the case, for example, of a solid rotor machine, the time constant should normally be interpreted as the time required for the component to decrease to $1/e \approx 0,368$ of its initial value. Exponential decay curves corresponding to these time constants shall be considered as equivalent curves replacing the actual measured ones.

NOTE 1 Frequently the conventional representation by means of three reactances and two time-constants is not satisfactory to describe the machine sufficiently, and higher order parameters should be added to the model. This

is the case with turbo type machines, where the model may be amended by parameters X_d''', τ_d''' . Their determination may be performed as outlined in this document (see Annex B).

NOTE 2 This document provides methods to determine the quadrature axis transient parameters $X_q', \tau_q', \tau_{qo}'$ (see 6.15), though they are frequently not considered in conventional calculations when $X_q' = X_q$ is assumed.

6.1.6 Consideration of magnetic saturation

Synchronous machine quantities vary with saturation of the magnetic circuits. In practical calculations, both saturated and unsaturated values are used.

In this standard, unless otherwise stated, the “saturated value” of reactances and resistances will be taken as the rated (armature) voltage value of the quantity, and their “unsaturated value” will be taken as the rated (armature) current value, except synchronous reactances, the unsaturated values of which will be taken as the low voltage values of the quantities, the saturated as the rated voltage values of the machine on load. The saturated values of the quantities will depend on the mode of operation.

The rated (armature) voltage value of a quantity (except synchronous reactance) corresponds to the magnetic condition of the machine during sudden short-circuit of the armature winding from no-load rated voltage operation, the machine running at rated speed.

The rated (armature) current value of a quantity corresponds to the condition in which the fundamental a.c. component of armature current which determines this particular quantity is equal to the rated current.

The no-load saturation and sustained three-phase short-circuit tests are usually used for unsaturated values of X_d . The motor at no-load and the phase-shifting tests permit the unsaturated and saturated values of X_d to be determined. The saturated quantities determined by these tests can however not be referred to the specific mode of operation of the machine and may be used only for comparison of the values obtained for different machines by the same tests.

The negative excitation and low slip tests are used for unsaturated values. The phase shifting test permits the unsaturated and saturated values of X_q to be determined.

The method of sudden three-phase short-circuit is preferred. It permits saturated and unsaturated values of X_d to be determined.

If the calculation method is used, the values of τ_{do}' and τ_d' obtained from the field current decay tests at rated speed (see 6.24 and 6.25) are preferred.

The sudden three-phase short-circuit test as well as the field current decay tests at rated speed (for determining τ_{do}' and τ_d') may be performed on a brushless machine if the machine is excited from its own or a separate exciter via temporary slip-rings mounted on the rotor, the exciter being separately excited. The voltage recovery test may be performed without slip-rings if the machine is excited from its own exciter, the latter being separately excited. Otherwise, the value of X_d' in a brushless machine is determined by calculation from the test values of τ_{do}' and τ_d' obtained from the field current decay tests at standstill with the armature winding open-circuited (time constant τ_{do}' , see 6.24) and with two phases of armature winding short-circuited (time constant τ_d' , see 6.27).

The sudden three-phase short-circuit method is preferred. It permits saturated and unsaturated values of X_d'' to be determined.

The applied-voltage methods are practically equivalent and may be used for the unsaturated values of X''_d and X''_q , but are usually not practicable for the saturated value because of the large current required and possible overheating of the windings and solid parts.

If a sudden short-circuit test is performed for determining X'_d , then τ'_d should be determined from the same test. In all other cases, preference is given to the field current decay method at rated speed with the armature winding short-circuited.

If the time constant τ_a is less than one fundamental period, its value is determined from the decrease of the aperiodic (d.c.) component of the current in the armature winding; if τ_a exceeds one period, the method of measurement of the decrease of the periodic component in the excitation winding current is preferred.

NOTE For synchronous compensators, the rated active power (output) is replaced by the rated apparent power.

All the above-mentioned methods are practically equivalent. The application of one or another method depends on the design and the apparent power of the machine under test.

6.2 Direct measurements of excitation current at rated load

I_{fN} is the excitation winding current when the machine operates at rated values of voltage, current, power-factor and speed.

The graphical methods are used when the zero-power factor loading of the tested machine is performed. When determining the rated excitation current by the direct measurement during operation under rated conditions, the machine under test should be excited from its own automatic regulation system because the excitation current when the machine is excited from automatic system may differ from that when the machine is separately excited (especially in machines with static excitation system).

NOTE In brushless machines direct measurement of the excitation current may be performed using temporary slip-rings.

6.3 Direct-current winding resistance measurements

Any d.c. supply (battery, generator, etc.) of required output rating with stable voltage may be used for measuring d.c. resistance by the voltmeter and ammeter method (recommended) or by the bridge method.

The resistance shall be measured directly at the winding terminals with the rotor at rest.

The single bridge method is not permissible for measuring resistances less than 1 Ω .

Armature winding resistance shall be measured for each phase separately. If, for some reason, phase resistance cannot be measured directly, the measurements are to be made between each pair of the line terminals of the armature winding.

In measuring the d.c. resistance of the armature or of the excitation winding by

- the bridge method, it is necessary to take at least three readings, each time disturbing the bridge balance. The resistance should be measured on the slip-rings or winding terminals so that the resistance of the brushes and their contacts are not included;
- the voltmeter and ammeter method, it is recommended to take three to five readings at various steady values of the current.

The current value during the d.c. resistance measurements should be such that the winding temperature rise during the test is not more than 1 K, assuming adiabatic heating. To calculate adiabatic heating use formula:

$$\Delta\theta = \frac{j^2}{c} \quad \text{K/s}$$

where

j is the current density during test, in amperes per mm²;

c is a constant, equal to 200 for copper and 86 for aluminium.

If the winding heating is unknown, the current should be not more than 0,1 of the rated winding current and should be supplied for not longer than 1 min.

The time of the measurements should be such that, at the instant of taking the measurements, the instrument readings are steady, i.e. transients have disappeared both in the instruments themselves and in the circuits the resistances of which are being measured.

The winding temperature during the measurements should be determined by means of built-in or embedded temperature detectors where fitted.

Thermometers and thermocouples used for contact measuring the winding temperature should have been in place for not less than 15 min and should be protected from any outside influence.

The identification numbers of the instruments should be recorded, in order to use the same instruments when performing the heat test.

6.4 No-load saturation test

6.4.1 Test procedure

The no-load saturation test is conducted:

- a) driving the test machine as a generator by some prime-mover; or
- b) running the machine under test as a motor without shaft load from a source of alternating symmetrical three-phase voltage (for symmetry of voltage, see 7.2 of IEC 60034-1:2004); or
- c) during retardation of the machine under test.

When making the no-load test, excitation changes should be made in gradual steps from high to low voltage using evenly distributed points; if possible, from the voltage value corresponding to the excitation at rated load, but not below 1,3 of the rated voltage of the machine under test, down to 0,2 of its rated voltage, unless the residual voltage is higher.

Measure the residual voltage of the generator when the excitation current is decreased to zero.

It is preferred to conduct test a) with a d.c. calibrated prime-mover, as it also permits the no-load losses to be determined during the test.

When using test b), it is also necessary to measure armature current. At each voltage step, readings shall be recorded for minimum armature current that corresponds to unity power-factor.

When using test c), the rate of deceleration should not exceed 0,04 of the rated speed per second. However, when the machine under test has a rate of deceleration above 0,02 rated speed per second, excitation from a separate source is required in order to have more stable excitation during the test. Before disconnecting from the line, the machine is excited to the highest required value, but not below 1,3 of the rated voltage of the machine. The excitation is lowered in steps and at each step, readings of speed (frequency) are taken simultaneously

with constant excitation current. The retardation test shall be repeated to obtain all the steps required.

Record simultaneously:

- excitation current;
- line voltage;
- frequency (or speed);
- for test b), minimum armature current that corresponds to unity power-factor;
- for test c), armature voltage.

6.4.2 No-load saturation characteristic determination

Plot the armature open-circuit winding voltage at the terminals (ordinate) versus the excitation current (abscissa) at rated speed (frequency) as shown in Figure 8. If, due to high residual voltage, the no-load characteristic intersects the axis above the origin, a correction shall be made. To this end, the straight portion of the no-load curve, which is usually called the air-gap line, is projected to the point of intersection with the abscissa axis. The length on the abscissa axis cut by this projected curve represents the correction value that shall be added to all the measured values of the excitation current.

When the test frequency differs from the rated value, all the measured voltage values shall be referred to the rated frequency.

6.5 Sustained three-phase short-circuit test

6.5.1 Test procedure

The sustained three-phase short-circuit test is conducted by

- a) driving the test machine as a generator by some prime-mover; or
- b) a retardation of the test machine; or
- c) driving the test machine as a motor.

When using tests a) or b), the short-circuit should be made as close to the machine terminals as possible, applying the excitation current after closing the short-circuit. Take one of the readings at a current close to the rated armature current.

It is preferred to conduct test a) with a d.c. calibrated prime-mover, as it also permits the short-circuit losses to be determined during the test.

Record simultaneously excitation current and armature line current.

NOTE 1 The speed of rotation (or frequency) may differ from the rated value but should not fall below 0,2 of rated value.

When using test b), the rate of deceleration should not exceed 0,10 of rated speed per second. If the machine under test has a rate of deceleration exceeding 0,04 of rated speed per second, excitation from a separate source is required.

When using test c), the machine is operated as a synchronous motor at a fixed voltage, preferably about 1/3 normal voltage, but at the lowest value for which stable operation can be obtained. The armature current is varied by control of the field current. The armature current should be varied in about six steps between 125 % and 25 % of rated current and should include one or two points at very low current.

NOTE 2 The maximum test current value, traditionally set at 125 %, should be obtained from the manufacturer as stator cooling may not permit operation in excess of 100 % rated current without damage.

For each point taken in descending order (for more uniform stator coil temperatures), record armature current, armature voltage and field current.

6.5.2 Three-phase sustained short-circuit characteristic

The relationship between the armature short-circuited winding current and the excitation current is drawn from the data of the three-phase sustained short-circuit test (6.5.1).

Plot the armature line current measured at the terminals (ordinate) versus the excitation current (abscissa) at rated speed (frequency) as shown in Figure 8.

6.6 Motor no-load test

The test is conducted as in 6.4.1 b), i.e. with the machine under test operating as a motor, with no-load on the shaft, but with zero excitation-winding current.

To obtain the unsaturated value of the reactance X_d , the value of the terminal voltage of the machine should not exceed 50 % to 70 % of the rated value.

Record simultaneously:

- armature current;
- line voltage;
- frequency (or speed);

6.7 Phase shifting test

This test is conducted in accordance with either one of the following methods:

- a) by driving the test machine with an ordinary synchronous motor and connecting the armature winding of the machine under test to a low-voltage supply of the same frequency as used for the synchronous motor by means of a phase shifter;
- b) by driving the machine under test with a synchronous motor provided with excitation windings both in the direct and the quadrature axis, the armature winding of the driven machine being connected to a symmetrical low-voltage supply of the same frequency as used for the synchronous motor.

The current in the test machine varies depending on the position of the pole axis between a minimum value corresponding to X_d and a maximum value corresponding to X_q .

Changing from one position to another either by operating the phase shifter (method a)) or by varying excitation in both axes of the synchronous motor (method b)), the maximum and minimum values of the armature current and the corresponding values of the voltage applied to the terminals of the machine are measured.

During measurements the excitation winding shall be open-circuited. However, to avoid possible damage, the excitation winding should be short-circuited (or closed through a discharge resistance) when measurements are not taken.

When using method a), the phase shifter shall be able to shift the armature applied voltage by not less than 180 electrical degrees.

When using method b), the power of the driving motor depends upon the voltage applied to the armature winding of the machine under test which develops a torque when moving from one position to another.

To determine unsaturated values of reactances X_d and X_q , the value of the applied voltage should not exceed 0,5 p.u. of the rated value.

Record:

- $U_{\max}$ at $I_{\max}$
- $U_{\min}$ at $I_{\min}$

6.8 Over-excitation test at zero power-factor

The over-excitation test at zero power-factor is conducted with the machine operating as a generator or as a motor. The active power should be equal to zero when the machine operates as a generator. When the machine operates as a motor, the load on the shaft shall be zero.

During the test, the excitation current is determined corresponding to values of voltage and armature current preferably differing by not more than $\pm 0,15$ per unit from the rated values, at zero power-factor with over-excitation.

The over-excitation test at zero power-factor and rated values of voltage and armature current is preferred.

6.9 Negative excitation test

The test is conducted with the machine operating under no-load in parallel with the grid. The excitation current is steadily reduced to zero, its polarity reversed, and it is then increased up to the moment when the machine slips one pole pitch.

NOTE This test is not suitable for permanent magnet machines, as it requires readings with either excitation winding open-circuited or at zero excitation current.

Record: voltage, armature current and excitation current up to the moment when the machine begins to slip.

6.10 On-load test measuring the load angle

The test is conducted with the machine operating in parallel with the grid. The loading of the machine shall be not less than 0,5 of the rated active load at rated power-factor.

Record: armature current and voltage, active power or directly measured $\cos \varphi$, field current and load angle.

NOTE Load angle δ is the internal angle between the vectors of terminal voltage and e.m.f., the latter indicating the q-direction.

6.11 Low slip test

During the low slip test, subnormal symmetrical three-phase voltage ($0,01 U_N$ to $0,2 U_N$) is applied to the armature terminals of the machine under test. The voltage should be such that the machine does not pull in. The excitation winding shall be open-circuited, the rotor driven by a prime-mover at a slip less than 0,01 and for solid rotor machines much less than that value so that the currents induced in the damper circuits during synchronous operation will have negligible influence on the measurements.

During switching on and off of the supply, the excitation winding shall be closed (short-circuited or through a discharge resistance) to avoid possible damage. Armature current and voltage and the slip-ring voltage and slip are measured by indicating instruments or recorded by oscilloscope. If the residual voltage measured before the test is larger than 0,3 of the supply test voltage, the rotor should be demagnetised. Demagnetising might be done, for example, by connecting the field winding to a low-frequency source with current about 0,5 of the no-load rated voltage excitation current of the tested machine and gradually decreasing its amplitude and frequency (the latter if possible).

NOTE This test is not suitable for permanent magnet machines, as it requires readings with either excitation winding open-circuited or at zero excitation current.

6.12 Sudden three-phase short-circuit test

This test is conducted at rated speed. Apply a short-circuit to the armature winding when operating at the desired voltage at no-load. Excitation of the machine is generally, accomplished from its own separately-excited exciter.

NOTE 1 If its own exciter cannot be used, then a separate exciter and, in case of a brushless machine, temporary slip rings may be used, but its rated current value should be at least twice the no-load field current of the machine under test, and its armature resistance should be not greater than that of the main machine exciter. This exciter should be separately excited.

Short-circuit the three phases simultaneously. The phase contacts should close within 15 electrical degrees of each other. This value may be exceeded on test when the armature d.c. component is not of importance. Use either non-inductive shunts, air-cored transformers or suitable current transformers to measure the short-circuit current. The latter should be used in dealing with a.c. current components only, and should be chosen so that the initial value of the sub-transient component of the short-circuit current is on the straight portion of the transformer characteristic.

NOTE 2 For machines with rated frequencies less than 60 Hz, d.c. shunts may be used.

Recording should continue for a time interval not less than $3\tau_d$ after short-circuiting. The steady state values should also be recorded (by restarting the oscillogram) following the establishment of steady conditions. Shorter oscillographic records may be taken if it is known from tests on similar machines that the current value decays exponentially.

The air-cored transformer is connected to the oscilloscope through an integrating amplifier. When it is required to determine the maximum aperiodic and periodic values of short-circuit current components only, an integrating galvanometer may be used.

The total resistance of the measuring instruments and their leads connected into the secondary circuit of current transformers should not exceed the rated values accepted for the given type of transformers.

To obtain quantities corresponding to the unsaturated state of the machine, the test is performed at several armature voltages of (0,1 to 0,4) rated value. The quantities are obtained for each test and plotted against the initial values of a.c. transient or sub-transient armature currents. From this relationship, the required quantities are obtained at the rated armature current value.

To obtain quantities corresponding to the saturated state of the machine, the test is performed with rated voltage at the terminals of the machine before short-circuiting the armature winding.

When the sudden short-circuit test cannot be performed at rated armature voltage, it is recommended that the tests should be conducted at several armature voltages (e.g. 30 %, 50 % and 70 % of rated armature voltage), and the quantities determined for each test. They are then plotted against open-circuit voltage before short-circuiting and the approximate rated armature voltage quantity is found by the extrapolation method.

Record immediately before the short-circuiting:

- terminal voltage;
- excitation current;
- excitation winding temperature.

Record oscillograms of the armature current in each phase and excitation current during the short-circuiting period. Data from oscillograms are analysed according to 7.1.2.

6.13 Voltage recovery test

Operate the test machine at rated speed, the armature winding short-circuited by a circuit-breaker, and excitation current set at a value corresponding to the linear portion of the no-load saturation curve, which as a rule is not higher than 0,7 of rated open-circuit armature voltage.

The sustained short-circuit shall be switched off practically simultaneously in all three phases, with the currents being interrupted within angles $\theta \leq 0,5 \cdot \tau''_d$ (with τ''_d designated in electric degrees) but not later than 180 electrical degrees. Oscillographic records (initial part at high speed) of one line-to-line voltage recovery and one armature current are required.

NOTE This test may be performed in a brushless machine if it is equipped with temporary slip-rings (excitation from separate exciter) or if the machine may be excited from its own exciter, the latter being separately excited.

Record immediately before disconnecting short-circuit:

- terminal voltage;
- excitation current;
- excitation winding temperature.

Record oscillograms of the armature current in each phase and excitation current after switching off the short-circuit.

Data from oscillograms are analysed according to 7.1.3.

6.14 Suddenly applied short-circuit test following disconnection from line

The sudden three-phase short-circuit test may be conducted during retardation of the machine under test, provided its rate of deceleration is not more than 0,05 rated speed per second. Before disconnecting from the line, the machine running on no-load is excited up to the current value for which the power factor is unity, or to a lower value of current. The excitation current and voltage are measured and recorded.

As soon as possible after disconnection, but not later than 1 s, the machine is short-circuited practically simultaneously. General requirements for the equipment, measuring devices, excitation and determination of quantities are similar to those stated in 6.12.

For salient pole machines the current may be increased up to the rated value, if the vibration of the machine does not exceed permissible values. For non-salient pole machines the armature current is usually limited to 0,5 of the rated value.

6.15 Direct current decay test in the armature winding at standstill test

The d.c. decay in the armature winding test is performed at standstill. DC voltage is applied to the armature winding (two terminals with the third one open, or two phases in parallel with the third in series with them) through a resistance (see Figure 1). When contactor K is closed, the winding is short-circuited and the current in the armature winding decays. The whole process of current decay is recorded.

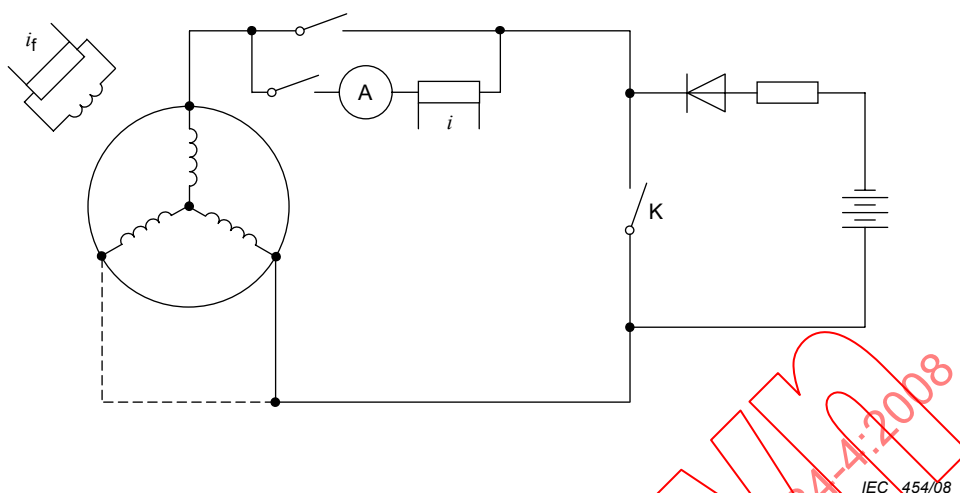


Figure 1 – Schematic for d.c. decay test at standstill

The resistance of contactor K shall be appreciably lower than the armature winding resistance. The resistance connected in series with the voltage source shall have its value so chosen that closing the contactor does not affect the source current value appreciably (the current value shall not change by more than a few per cent).

The test is performed with the rotor placed along the direct and then the quadrature axis after preliminary magnetization of the machine magnetic system by passing a d.c. current through the armature (primary) winding that will produce saturation. Following this, gradual demagnetization is carried out down to the test current value, and short-circuited or disconnected after closing contactor K.

Recording of the decay current should be carried out in such a way that the curves are available with different time-base, approximately in the ratio 10:1:0,1, for

- the initial portion of the decay;
- the initial portion and the middle portion of the curve;
- the whole decay curve.

NOTE The test may also be carried out once, using equipment with three oscilloscope channels.

In conducting the test with the rotor position along the d-axis, with the excitation winding short-circuited, the current in it is also recorded by the same oscilloscope. There should be no effective additional resistance in the excitation winding circuit.

In conducting the test with the rotor in the q-axis position, the excitation winding is open-circuited and the induced voltage in it is also recorded by the same oscilloscope. The same applies to the test with the rotor position along the d-axis, with the excitation winding open-circuited.

After the test, the d.c. resistance of the excitation winding circuit and the excitation winding itself are measured.

Data from oscillograms are analysed according to 7.1.4.

6.16 Suddenly applied excitation test with armature winding open-circuited

The suddenly applied excitation test with armature winding open-circuited is performed on a machine running at rated speed with the excitation winding initially open-circuited. Excitation

of the machine is provided, preferably, from its own exciter which shall be separately excited. If its own exciter cannot be used, then a separate exciter may be used but its rated current value shall be at least twice the no-load excitation current of the tested machine and its armature resistance not greater than that of the main machine exciter. This separate exciter shall also be separately excited.

The exciter voltage is set at a value corresponding to the linear portion of the no-load saturation curve, which as a rule is not higher than 0,7 times the rated open-circuit armature voltage. The excitation winding of the machine under test is suddenly connected to the exciter. Recorded are one line armature voltage, excitation current and, for control, exciter voltage.

The test is considered satisfactory if the exciter voltage remains substantially constant during the test.

Data from oscillograms are analysed according to 7.1.5.

6.17 Applied voltage test with the rotor in direct and quadrature axis positions

AC voltage, at rated frequency, is applied to any two line terminals of the armature winding.

The excitation winding is short-circuited with means to measure its current. The duration of the voltage application should be limited to avoid serious overheating.

NOTE In brushless machines, the excitation winding should be disconnected from the rotating rectifier and short-circuited.

The rotor is slowly rotated to find the angular positions corresponding to the maximum and practically zero values of the excitation winding current. The first position corresponds to the direct-axis, the second to the quadrature-axis. Supply voltage, armature-winding current and the power input are measured with the rotor stationary in these positions. Excitation winding current is needed for the purposes of evaluating the rotor position (direct-axis or quadrature-axis), therefore the measuring instruments need not necessarily be of high precision.

The quantities determined from this test may, depending upon the value of the armature current, include saturation of the damper winding leakage paths. The quantities determined at rated current with relative saturation of the damper winding paths are referred to the unsaturated ones.

As a rule, the saturated values cannot be determined from this test because of the large current required and possible overheating of the windings and solid parts.

If tests cannot be performed at rated armature current, the determination of quantities referred to the unsaturated state of the machine shall be done from several tests with different armature currents (0,2 to 0,7 I_N).

The quantities are plotted against the armature current, and the required values are found by extrapolation.

For machines with closed or semi-closed armature slots and closed damper winding slots, the supply voltage shall be not lower than 0,2 of the rated value.

6.18 Applied voltage test with the rotor in arbitrary position

To conduct the test, a.c. voltage is applied in turn to each pair of the armature winding line terminals of the stationary machine under test.

The excitation winding shall be short-circuited and its current measured. It is necessary that the rotor position remains the same for all three applications of test voltage.

NOTE In brushless machines, the excitation winding should be disconnected from the rectifier and short-circuited.

If necessary, the rotor should be braked. The duration of the voltage application should be limited so as to avoid serious overheating of solid parts.

The applied voltage, current and power input to the armature, and the excitation winding current are measured when applying a.c. supply voltage to each pair of the terminals. Requirements for obtaining quantities referred to the unsaturated or saturated state of the machine are similar to those in 6.17.

6.19 Single phase voltage test applied to the three phases

To conduct the test, a single-phase voltage is applied across the terminals of the three phases connected in series or in parallel, with the machine driven at or near rated speed. The connection shall be arranged so that the current flows in each phase in the same sense as defined by zero sequence. The excitation winding is short-circuited.

Record voltage U , current I and active power P .

6.20 Line-to-line sustained short-circuit test

To conduct the line-to-line sustained short-circuit test, any two line terminals are short-circuited (see Figure 2) and the machine is driven at rated speed by some prime-mover.

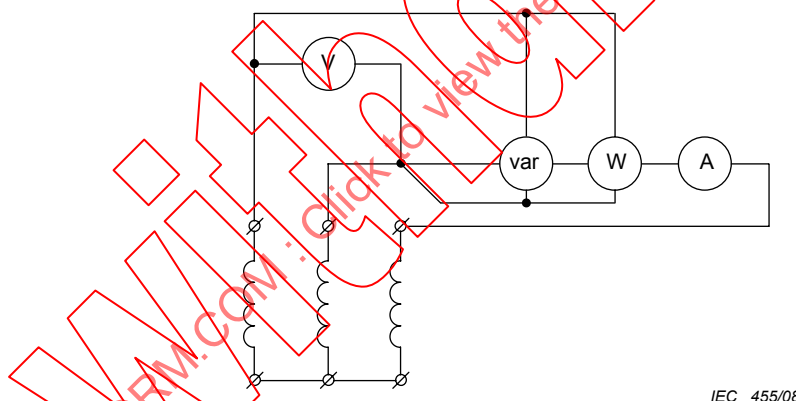


Figure 2 – Circuit diagram for line-to-line short-circuit test

The short-circuit current I_{k2} , excitation current and the voltage between the open line terminals and one of the short-circuited terminals are measured U_{k2} .

To increase the accuracy of the measurements in the presence of voltage or current harmonics, it is recommended to measure active power P and reactive power Q .

The measurements are taken at several values of the short-circuit current.

To avoid serious overheating of solid parts the duration of the line-to-line sustained short-circuit at current above $0,3 I_N$ should be limited to the time required for taking the readings of the instruments.

6.21 Sudden line-to-line short-circuit

The sudden line-to-line short-circuit test for determining negative phase-sequence reactance and negative phase-sequence resistance is conducted at rated speed. Before applying the short-circuit, the machine shall operate with open-circuited armature winding.

The requirements for the excitation system and choice of measuring instruments shall be in accordance with those stated in 6.12.

The terminal voltage of the machine, the excitation current and the rotor temperature are measured immediately before short-circuiting.

To determine negative-sequence reactance, oscillograms are taken of the armature winding voltage at the terminals to be short-circuited, armature current in the same phases and the current in the excitation circuit. Recording and method of analysis of the oscillograms shall be in accordance with 6.12.

To obtain $X_{(2)}$ corresponding to the unsaturated state of the machine, i.e. rated current conditions, the test is performed at several line-to-line voltages similar to the sudden three-phase short-circuit test described in 6.12, and the required value is obtained from the plotted results.

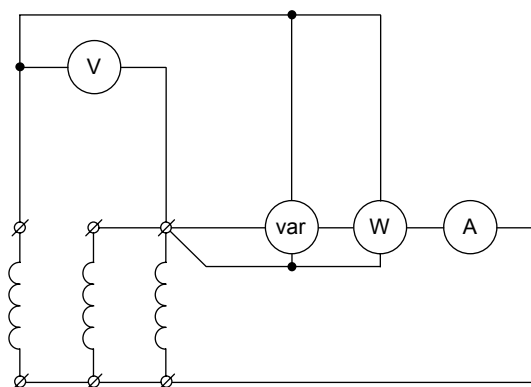
To obtain $X_{(2)}$ corresponding to the saturated state of the machine, the voltage at the terminals of the machine before line-to-line short-circuiting of the armature (primary) winding should be equal to the rated value.

If the test cannot be performed at rated voltage, it may be conducted at several decreased values of armature voltages as in 6.12, and $X_{(2)}$ determined for each test. These values are then plotted against open-circuit voltage before short-circuiting and an approximate value corresponding to the rated voltage shall be found by extrapolation.

The short-circuit test shall be performed in such a way that the aperiodic component is practically maximum, i.e. the actual short-circuit occurs within 30° of the time of voltage zero crossing.

6.22 Line-to-line and to neutral sustained short-circuit test

To conduct the line-to-line and to neutral sustained short-circuit test the armature winding is star connected, two line terminals are short-circuited to neutral, the machine is driven at rated speed and is excited (see Figure 3).



IEC 456/08

Figure 3 – Circuit diagram for line-to-line and to neutral sustained short-circuit test

Measurements are taken of the voltage U_0 from the open terminal to neutral and the current I_0 in the connection from the short-circuited terminals to neutral.

To take into account the influence of harmonics, measurements are taken of active and reactive power.

The measurements are taken at several values of the neutral current. The current values and the duration of the test are limited by rotor overheating or vibration.

6.23 Negative-phase sequence test

The test is conducted with reduced symmetrical voltage of $0,02 U_N$ to $0,2 U_N$ applied to the machine driven at rated speed, connected to an external supply with negative-phase sequence, i.e. operating as an electromagnetic brake with the slip equal to 2.

The excitation winding shall be short-circuited.

If the residual voltage of the machine under test exceeds 30 % of the supply voltage, the rotor should be demagnetized before testing the machine. The voltage and current in all three phases and the supply power are measured during the test.

6.24 Field current decay test, with the armature winding open-circuited

6.24.1 Test at rated speed

Using a prime-mover drive the machine at rated speed, excited to rated voltage, and then suddenly short-circuit the excitation winding. Excitation winding supply source may require disconnecting within 0,02 s of its application.

NOTE When testing machines, a current limiting resistor may be connected in series with its excitation winding to limit the d.c. supply short-circuit current.

Take an oscillogram of the armature winding voltage, the excitation winding current and the slip-ring voltage. The latter serves for precise determination of the instant of the starting of field current decay (zero time) and the determination of the initial voltage value at this moment.

The difference between the transient voltage obtained from the oscillogram and the residual voltage of the machine is plotted against time on a semi-log scale.

6.24.2 Test at standstill

With the machine at standstill; the armature winding open-circuited; the excitation winding fed from a separate d.c. source; then suddenly short-circuit the excitation winding. The excitation winding supply source may require disconnecting within 0,02 s of its application.

NOTE When testing machines, a current limiting resistor may be connected in series with its excitation winding to limit the d.c. supply short-circuit current.

An oscillogram is taken of the excitation winding current, and plotted against time on a semi-log scale.

6.25 Field current decay test at rated speed with the armature winding short-circuited

To conduct the field winding decay test with the armature winding short-circuited, use a prime mover to drive the machine at rated speed and with rated armature current flowing, then suddenly short-circuit the excitation winding.

An oscillogram is taken of any line current and of the excitation current or slip-ring voltage.

The difference between the transient current obtained from the oscillogram and the current due to the residual voltage is plotted against time on a semi-log scale.

NOTE The short-circuit current should be sustained only temporarily to avoid damage due to heating.

6.26 Suddenly applied excitation with armature winding short-circuited

The suddenly applied excitation test with armature winding short-circuited is performed on a machine running at rated speed with the excitation winding initially open-circuited. The requirements for the excitation source are as stated in 6.16. Excitation of the machine is provided from its own exciter that shall be separately excited, or provided from another source.

The exciter voltage is set at a value corresponding to the rated short-circuit current of the machine under test. The excitation winding of the machine under test is suddenly connected to the exciter. An oscillographic recording of armature winding current, excitation current and exciter voltage is made. The test is considered satisfactory if the exciter voltage remains substantially constant during the test.

6.27 Field current decay test at standstill with two phases of armature winding short-circuited

The field current decay test with two phases of the armature winding short-circuited is conducted at standstill with the rotor in direct axis position with respect to the magnetic axis of short-circuited armature winding phases, and suddenly short-circuiting the excitation winding.

NOTE A current limiting resistor may be connected in series with the excitation winding to limit the d.c. supply short-circuit current.

This test will determine the time-constant τ_d in the brushless machines when the test at rated speed may not be performed.

An oscillogram is taken of the excitation winding current, and plotted against time on a semi-log scale.

6.28 Applied voltage test with rotor removed

This test is performed applying three-phase rated frequency symmetrical voltage to the armature winding, the rotor being removed.

A search coil is placed over the teeth or at a diameter slightly less than the bore diameter in order to exclude cross-slot flux leakages. The length of the coil is equal to the full armature core length, the width of the coil is equal to the pole pitch. The end parts are stretched by bracing wires towards the machine axis along the radii in the planes of the end armature core teeth to remove them from the influence of the leakage fluxes around the armature end winding (see Figure 4).

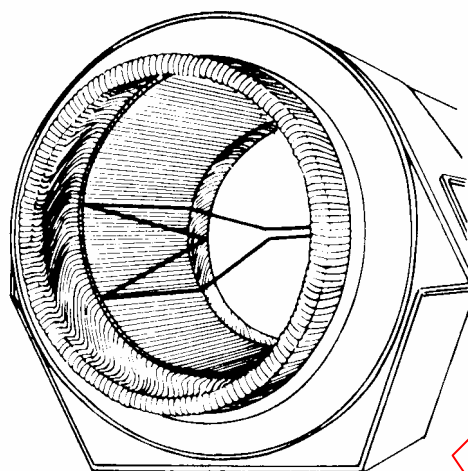


Figure 4 – Search coil installation with rotor removed

If the armature has a fractional number of slots per pole and phase, the width of the coil is made equal to the largest whole number of slots comprising the pole pitch.

The armature winding is connected to the voltage source and applied voltage U , armature winding magnetizing current I , input power P and voltage of the search coil U_c are measured. The search coil voltage measurement shall be done with a high internal resistance voltmeter.

6.29 No-load retardation test

The no-load retardation test is conducted when there is no additional flywheel mass on the shaft of the machine under test. The machine is excited from a separate source and the excitation remains unchanged during the test.

The machine under test is brought up to over-speed by increasing the supply frequency or by means of a prime-mover provided with a clutch; then the supply is disconnected.

This test consists of measuring the retardation time Δt when the machine is slowing down between two pre-determined speeds with difference $\Delta \omega$, say, from 1,10 to 0,90 per unit or from 1,05 to 0,95 per unit.

6.30 Suspended rotor oscillation test

To perform this test, the rotor is suspended on one filament or two parallel filaments in such a way as to have its shaft in a vertical position. Turning the rotor produces oscillations about the shaft axis. The time required to make several oscillations is recorded and an average time of one cycle of oscillation is calculated.

With one filament suspension, the test is performed twice, with the rotor itself and the rotor together with a flywheel or a pulley, acting as a flywheel of known inertia.

The unidirectional displacement angle for one-filament suspension should be not more than 45° , and for two-filament suspension not more than 10° .

6.31 Locked rotor test

The test is performed with the rotor locked and rated frequency three-phase voltage applied to the armature winding, the excitation winding being short-circuited or closed through a starting resistance as required.

The test shall be made with rated voltage applied to the armature winding unless excessive heating of damper winding and armature winding prevents such a test from being made.

In this case, a series of tests with reduced voltage may be performed so that rated voltage quantities may be determined by extrapolation. Due to the saturation effect, the value of reduced voltage applied should be high enough so that the point of rated voltage may be accurately extrapolated. Usually, the armature current during the test should be more than twice the rated current value.

The duration of the voltage application is limited by the time required to take the readings and by heating the rotor parts and should be kept below 10 s.

Record:

- armature voltage and current in all three phases;
- power input (desirable).

6.32 Over-excitation test at zero power factor and variable armature voltage

The test is conducted with the machine operating either generating or motoring. The active power when the machine operates as a generator should be equal to zero. The load on the shaft when the machine operates as a motor shall be zero.

During the test, armature winding current is kept constant and equal to the rated value, armature voltage is varied from at least rated value down to the lowest value at which the machine remains stable. For reasonable accuracy, it is recommended that armature voltage should be decreased below 0,5 times the rated value.

Care should be taken that no excessive heating of the excitation winding occurs.

6.33 Asynchronous operation during the low-voltage test

The test is performed with a reduced symmetrical voltage ($0,01 U_N$ to $0,2 U_N$) at rated frequency applied to the machine under test, from an external source.

The excitation winding is short-circuited. If the residual voltage of the machine exceeds 0,3 of the applied voltage, the rotor should be demagnetized before testing the machine. Line-to-line voltage, line current and the input power are measured and recorded during the test. In making calculations, average values of these quantities during the full swing period are considered.

The speed of rotation of the machine is changed by steps; at each speed step, voltage is applied to the armature winding for a time necessary to take instrument readings and make records. In the range of small slips (below 0,05) it becomes difficult to maintain constant speed of rotation within the required precision. In this case, the test with oscillographic recording may be performed with slow retardation (not more than 0,04 times the rated speed per second for small machines; for large machines it will be much smaller due to inherent characteristics of the set).

Average values for the power and current are plotted against slip (see Figure 5).

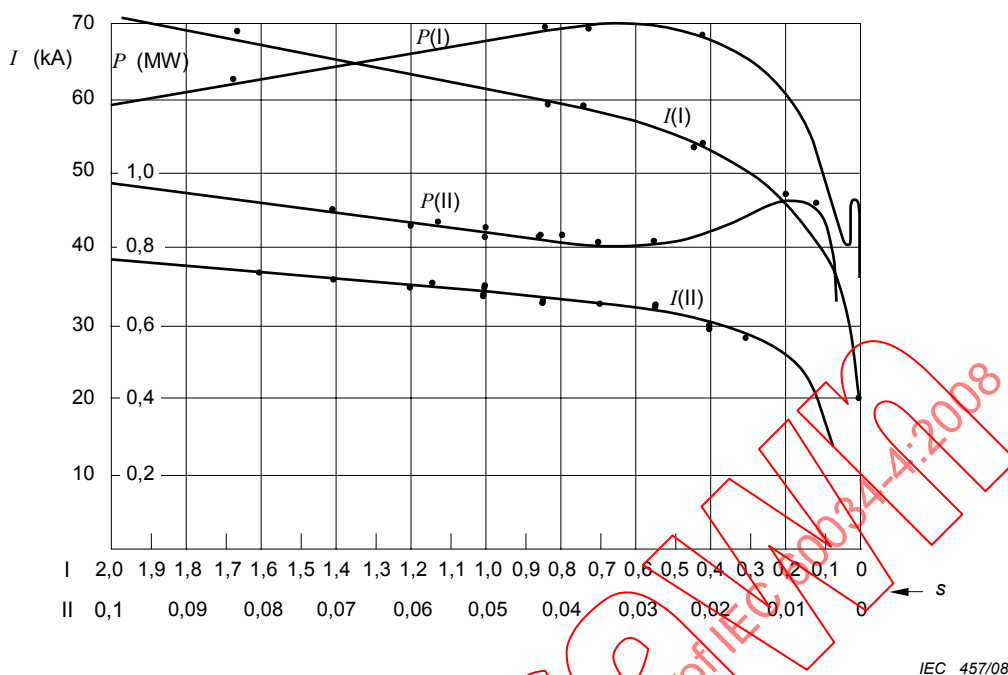
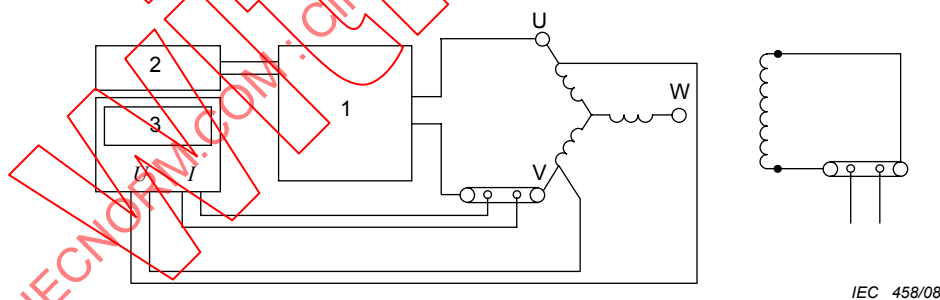


Figure 5 – Power and current versus slip (example)

6.34 Applied variable frequency voltage test at standstill

To perform this test, voltage at various frequencies is applied to a pair of line terminals of the armature winding. The machine is at standstill. The armature winding is supplied from a single-phase, variable frequency power amplifier. The connection is in star, with either feeding terminals U and V, the third terminal W open or short-circuited with terminal V. The excitation winding is short-circuited. Figure 6 shows a schematic of the principal connections.



Key

- 1 Power amplifier
- 2 Oscillator
- 3 Oscilloscope

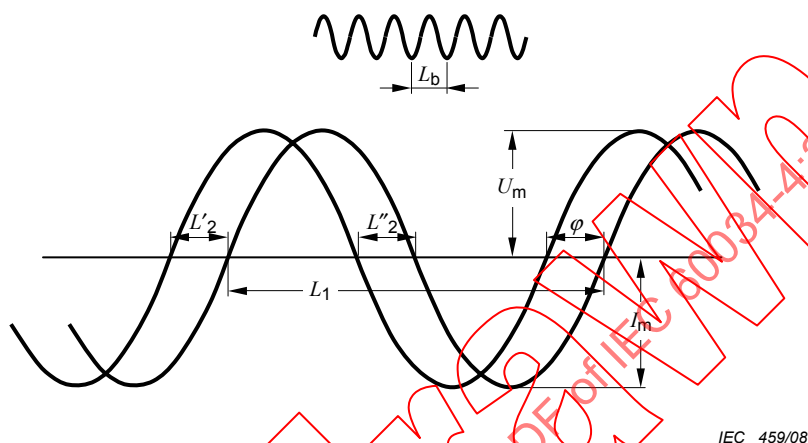
Figure 6 – Schematic for variable frequency test at standstill

During the test, the rotor is oriented once in such a position as to have maximum current induced in the excitation winding (direct axis), and once to have minimum (practically zero) induced current (quadrature axis).

Supply voltage, armature winding current and phase angle between them are measured and recorded; for determination from an oscilloscope, see Figure 7. Excitation winding current is

recorded only for the purpose of the rotor position evaluation. The phase angle may also be measured by some other method with adequate precision.

Certain precautions shall be taken during the test. It may be performed either at comparatively high currents (0,3 to 0,5 of the rated armature value) or at small armature currents (0,05 to 0,1 of the rated value) and additional magnetic flux produced by d.c. current in the same armature winding superimposed on low-frequency current in such a way that the peak value of a.c. current is below the value of direct current. At all frequencies, the values of alternating and direct current should be about the same.



Key

$$s = f_t / f_N = (f_b L_b) / (f_N L_1) \quad ; \quad \varphi = 2\pi \cdot (L'_2 + L''_2) / (2L_1)$$

where

L_b = calibrating frequency period; L_1 = test frequency period;

f_b = calibrating frequency; f_t = test frequency; f_N = rated frequency

Figure 7 – Recorded quantities from variable frequency test at standstill (example)

At frequencies of 5 Hz and below, the difference between impedances and resistances becomes small and the phase angle between voltage and current decreases, which introduces additional inaccuracies in measuring the angle on the oscillogram.

The inaccuracies may be considerably reduced if the armature circuit resistance voltage drop is compensated during the test. In an analogue method to do so, the voltage drop in the armature resistance is compensated using an operation amplifier and an auxiliary resistance. During the test, its temperature should be stable.

The voltage drop in the shunt and the auxiliary resistance, proportional to the measuring current, is subtracted from the voltage at the armature winding terminals with the help of the amplifier. By changing resistance at the input of the amplifier, its output voltage is adjusted to zero value, while d.c. flows in the armature winding, thus compensating armature resistance. To reduce the error due to heating of the winding during the test, the compensation ability shall be checked several times with d.c. in the armature winding each time adjusting the output voltage of the amplifier to zero.

- When the latter part of this plot is a straight line (corresponding to an exponential), then this line extrapolated to zero time gives the initial value $\Delta i_k'(0)$ of the transient component of short-circuit current (see Figure 9).
- When the latter part of this plot is a curve, the amplitude of the current i_A is measured (see Figure 10) at a time OA' , where OA' is taken as 0,2 s or the time at which sub-transient effects become negligible. The time OB' is measured at the time at which the

current is $i_B = 1/e \cdot i_A$. The time constant τ'_d is taken as $(OB' - OA')$ seconds. The straight line through the values of current i_B and i_A is assumed to represent the equivalent value of $\Delta i'_k$ and, when it is extrapolated to zero time, it gives the initial value $\Delta i'_k(0)$ of the transient component of short-circuit current.

The sub-transient short-circuit current component is defined as the difference between the curve $(\Delta i'_k + \Delta i''_k)$ and the straight line representing the value of $\Delta i'_k$. The variation of the sub-transient current component with time is also plotted on the semi-log scale.

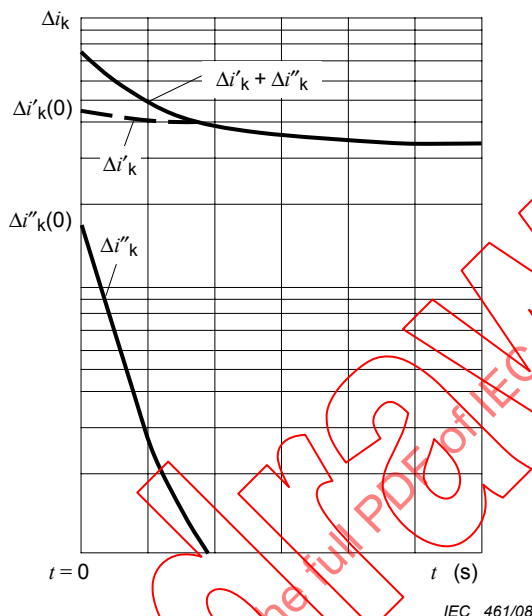


Figure 9 – Transient and sub-transient component of short-circuit current

The aperiodic current components of all the phases are plotted against time on semi-log scale. Extrapolation of these curves to zero time gives the initial values of the corresponding currents.

To find the greatest possible value of the aperiodic component, the initial values of the aperiodic components of separate phases obtained by extrapolation are laid off as vectors along three radial lines 60° apart, radiating from one origin, the largest of the three vectors being laid off on the middle line. Perpendiculars are drawn through the end of each vector. The vector drawn from the origin to the centre of the triangle formed by the intersections of these perpendiculars represents the largest possible aperiodic component equal to the initial value of the amplitude of the periodic component (see Figure 11).

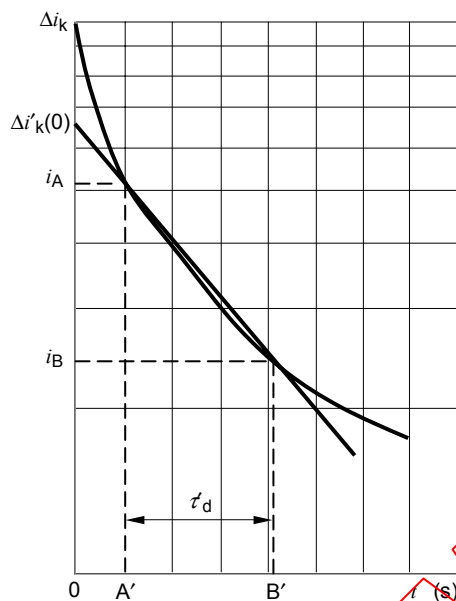


Figure 10 – Determination of transient component of short-circuit current

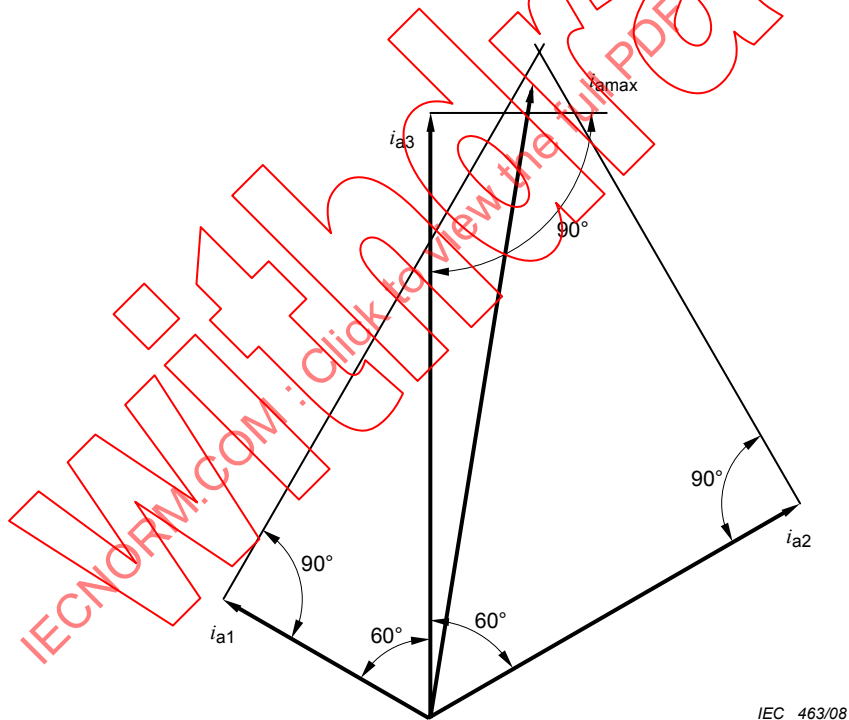


Figure 11 – Graphical determination of aperiodic component

The largest possible value of the aperiodic component of the current may be determined analytically (in per unit or physical values) by the formula:

$$i_{a \max} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{i_{a1}^2 + i_{a2}^2 - i_{a1} i_{a2}}$$

where

i_{a1} is the highest absolute initial value (regardless of sign) of the aperiodic component of the current found from the test;

i_{a2} is the absolute initial value of the aperiodic current component in either of the two other phases.

The curve of the periodic component of the excitation current against time is determined from the excitation current oscillogram and is plotted on a semi-log scale. Extrapolation of the curve to zero time gives the initial value of the periodic current component.

NOTE If in brushless machines the excitation current cannot be recorded, the armature short-circuit time constant should be determined from the armature aperiodic current component decay.

7.1.3 Voltage recovery test

From the oscillogram (see 6.13) the difference between the sustained voltage and the voltage determined by the envelope of recovery voltage is plotted on a semi-log scale against time, and then extrapolated to the instant of the switching off the short-circuit (curve 1, Figure 12). The extrapolation of the straight portion of curve 1 to the ordinate gives the initial value of the transient voltage component $\Delta u'(0)$.

The difference between the voltage determined by curve 1 and the transient voltage component $\Delta u'$ gives the sub-transient voltage $\Delta u''$ for the corresponding instants.

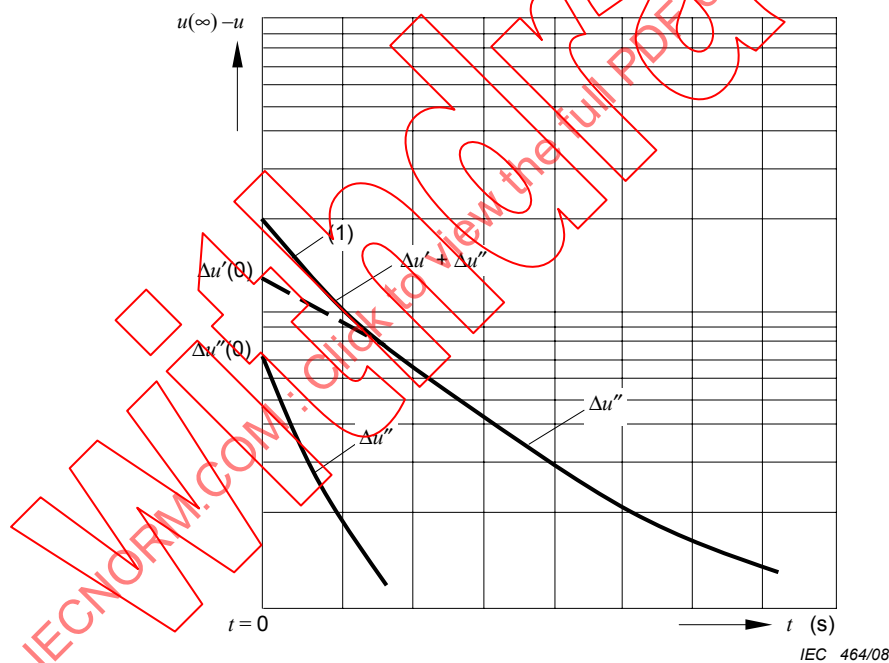


Figure 12 – Transient and sub-transient component of recovery voltage

7.1.4 Direct current decay in the armature winding at standstill

The test (see 6.15) may be made with the rotor in direct or quadrature axis position. The value of the current decay in the armature winding is considered as the ratio of the current at any instant $i(t)$ and the initial current $i(0)$.

Similarly, for the test with the rotor in direct axis position, the decaying induced current in the excitation winding is considered as the ratio of decaying induced current and the initial induced current. These values of decaying currents are plotted against time.

From a semi-logarithmic plot of the decay currents, transient and sub-transient initial values and their time constants are found. To do so, a straight line is drawn through the points of

extremity (Figure 13 a). The intersection of this straight line with the ordinate axis gives the initial amplitude of the first exponential (i_{10}). Its time constant (τ_1) is the highest and is found as the time necessary for i_{10} to decrease to $1/e \approx 0,368$ of its initial value.

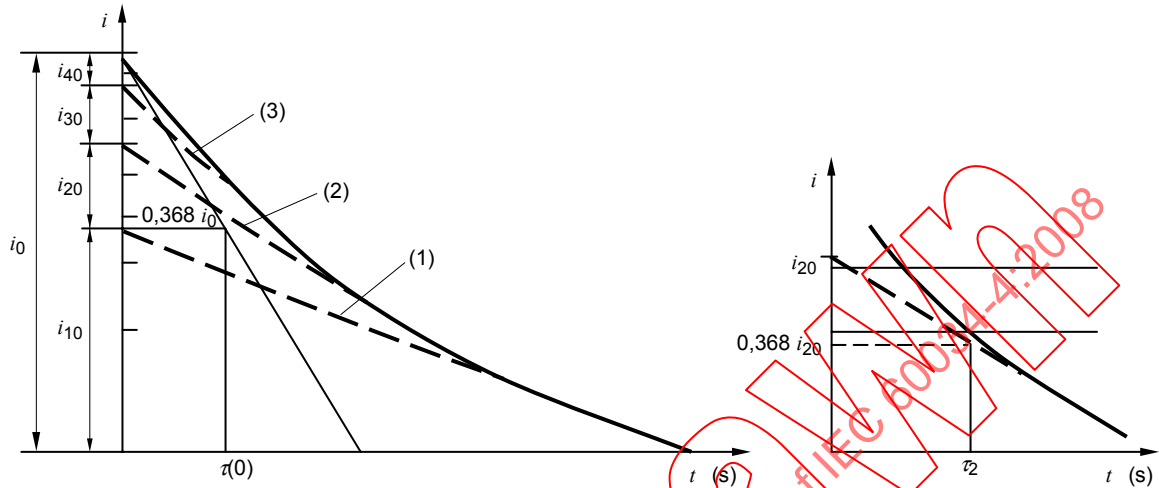


Figure 13a

Figure 13b

IEC 466/08

IEC 466/08

Figure 13 – Semi-logarithmic plot of decay currents

The difference between the initial curve and the first exponential is again plotted on a semi-logarithmic graph, and the amplitude i_{20} and the time constant of the second exponential τ_2 are determined (Figure 13 b).

Analysis of the curve is continued in this manner until that point where non-linearity of the decaying curve cannot be observed.

The analysis of the decaying armature winding current and of the induced excitation winding current from the same test should be done simultaneously, having in mind equality of time constants τ_k and τ_{kf} for solid rotors. By doing so, a higher accuracy in frequency response characteristics is obtained. While analysing the test curve of the armature winding current decay, it is recommended to draw a sum of exponentials as close as possible to the test curve, so as to have:

$$\sum_k \frac{i_{ko}}{\tau_k} = \frac{i_0}{\tau(0)}$$

where

$\tau(0)$ is the equivalent time constant of the decaying armature current curve at the initial moment. This time constant $\tau(0)$ is obtained from a plot of the initial portion of the current decay curve on a semi-logarithmic graph by drawing the tangent to it at zero time (Figure 13a). The initial time constant $\tau(0)$ will be found along this tangent line as the time necessary for the initial value of the current to decrease to its $1/e \approx 0,368$ value.

NOTE Sufficient accuracy in analysing the test curve into exponentials may be obtained using a suitable computer program.

Direct axis time constants of synchronous machines are determined using known roots a_{kd} , a'_{kd} of characteristic equations $D_d(p) = 0$ and $D'_d(p) = 0$ (see Annex B) as:

$$\tau'_d = \frac{1}{\omega\alpha'_{1d}}; \quad \tau''_d = \frac{1}{\omega\alpha'_{2d}}; \quad \tau'''_d = \frac{1}{\omega\alpha'_{3d}}; \dots$$

$$\tau'_{do} = \frac{1}{\omega\alpha_{1d}}; \quad \tau''_{do} = \frac{1}{\omega\alpha_{2d}}; \quad \tau'''_{do} = \frac{1}{\omega\alpha_{3d}}; \dots$$

where:

$$\omega = 2\pi f.$$

Similarly, quadrature axis time constants are determined using known roots a_{kq} , a'_{kq} of equations $D_q(p) = 0$ and $D'_q(p) = 0$ (see Annex B) as.

$$\tau'_q = \frac{1}{\omega\alpha'_{1q}}; \quad \tau''_q = \frac{1}{\omega\alpha'_{2q}}; \quad \tau'''_q = \frac{1}{\omega\alpha'_{3q}}$$

$$\tau'_{qo} = \frac{1}{\omega\alpha_{1q}}; \quad \tau''_{qo} = \frac{1}{\omega\alpha_{2q}}; \quad \tau'''_{qo} = \frac{1}{\omega\alpha_{3q}}; \dots$$

7.1.5 Suddenly applied excitation test with armature winding open-circuited

The difference between the sustained armature voltage and the voltage determined by the envelope of the rising armature voltage is plotted on a semi-logarithmic scale against time, and then extrapolated to the instant of the exciter connection switch closure (see Figure 14). The extrapolation of the straight portion of this curve to the ordinate axis gives the initial value of the transient component $\Delta u'(0)$.

NOTE For large machines, the residual voltage may usually be neglected.

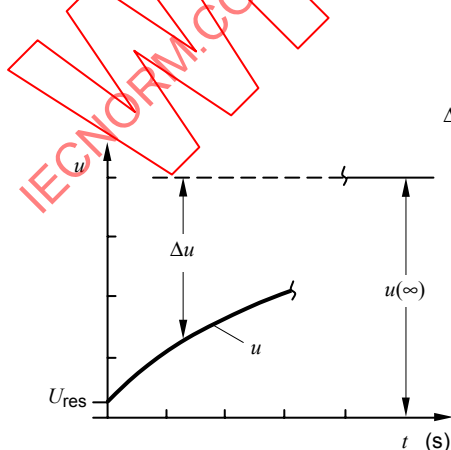


Figure 14a

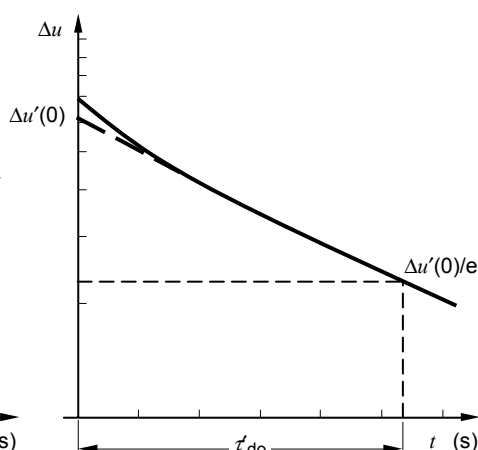


Figure 14b

Figure 14 – Suddenly applied excitation with armature winding open-circuited

7.2 Direct-axis synchronous reactance

7.2.1 From no-load saturation and three-phase sustained short-circuit test

The unsaturated value of X_d is determined from curves plotted according to 7.1.1 (see Figure 8):

$$X_d = \frac{U_N}{\sqrt{3} I_{BC}} \left[x_d = \frac{AC}{BC} = \frac{OH}{OC} = \frac{i_{fk}}{i_{fg}} \right]$$

where

AC represents the no-load voltage taken from the air-gap line at some excitation current;
BC represents the sustained short-circuit current value taken from the short-circuit characteristic at the same excitation current.

7.2.2 From motor no-load test

An unsaturated value of X_d is determined from (see Figure 8)

$$X_d = \frac{U}{\sqrt{3} I} ; \left[x_d = \frac{u}{i} \right]$$

where terminal voltage U and armature-winding current I are from 6.6.

7.2.3 From phase shifting test

A value of X_d is determined from

$$X_d = \left(\frac{U}{\sqrt{3} I} \right)_{\max} ; \left[x_d = \left(\frac{u}{i} \right)_{\max} \right]$$

where values are from 6.7

7.2.4 From on-load test measuring the load angle

The determination of X_d by the method of load angle measurement (see 6.10) is made using the formula:

$$X_d = \frac{E_0 / \cos \delta - U}{\sqrt{3} I (\cos \varphi \tan \delta + \sin \varphi)} ; \left[x_d = \frac{e_0 / \cos \delta - u}{i (\cos \varphi \tan \delta + \sin \varphi)} \right]$$

where:

E_0 is the synchronous internal voltage corresponding to excitation current for the actual load. To determine E_0 , the no-load saturation curve (see 6.4) is plotted on a diagram and, similar to Figure 8, a straight line is drawn from the origin through the point of rated voltage. E_0 is the ordinate value on this straight line corresponding to the actual excitation current on the abscissa.

U, I are armature voltage and current;

φ is the phase angle, determined by the two wattmeter method or by calculating $\cos \varphi = P / (\sqrt{3} UI)$;

δ is the load angle measured by the stroboscopic method or any other accurate method.

NOTE 1 The formula is based on the two-axes machine model, neglecting the armature resistance.

NOTE 2 In the formula, the angle values have a magnitude and a sign:

Load angle δ is positive in generator operation and negative in motor operation. Phase angle φ is in the generator reference system, i.e. $\varphi = 0$ ($\cos\varphi = 1$) for the generator and $\varphi = \pi$ ($\cos\varphi = -1$) for motor operation, at zero reactive load.

7.3 Direct-axis transient reactance

7.3.1 From sudden three-phase short-circuit test

A value of X'_d is determined from

$$X'_d = \frac{U(0)}{\sqrt{3}} \frac{1}{[I(\infty) + \Delta I'_k(0)]} ; \quad \left[x'_d = \frac{u(0)}{i(\infty) + \Delta i'_k(0)} \right]$$

where:

$U(0)$ is the no-load voltage, measured immediately before the short-circuit (see 6.12);

$I(\infty)$, $\Delta I'_k(0)$ are determined according to 7.1.2.

7.3.2 From voltage recovery test

A value of X'_d (unsaturated) is determined from

$$X'_d = \frac{U(\infty) - \Delta U'(0)}{\sqrt{3} I_k} ; \quad \left[x'_d = \frac{u(\infty) - \Delta u'(0)}{i_k} \right]$$

where input values are from test data (6.13) as analysed according to 7.1.3.

7.3.3 From d.c. decay test in the armature winding at standstill

Calculate:

$$x'_d = \frac{1}{\frac{1}{x_d} + C_{1d}}$$

where C_{1d} is as in Annex B. Calculation of x_d is indicated in 7.1.4.

7.3.4 Calculation from test values

The quantities x'_d , x_d , τ'_{do} and τ'_d are related with each other by the following formula:

$$x_d \cdot \tau'_d = x'_d \cdot \tau'_{do}$$

This relation is used for determination of x'_d from known values of x_d , τ'_d and τ'_{do} .

7.4 Direct-axis sub-transient reactance

7.4.1 From sudden three-phase short-circuit test

Sub-transient reactance X''_d , as determined from the sudden short-circuit test, is the ratio of the no-load voltage, measured immediately before the short-circuit, to the initial value of the periodic component of the short-circuit current, obtained from the analysis of the oscillogram (according to 7.1.2, Figure 9):

$$X_d'' = \frac{U(0)}{\sqrt{3}} \frac{1}{[I(\infty) + \Delta I_k'(0) + \Delta I_k''(0)]} ; \quad \left[x_d'' = \frac{u(0)}{i(\infty) + \Delta i_k'(0) + \Delta i_k''(0)} \right]$$

7.4.2 From voltage recovery test

Sub-transient reactance X_d'' is determined from the voltage recovery test as the ratio of the difference between the sustained voltage $u(\infty)$ and the sum of the initial values of transient $\Delta u'(0)$ and sub-transient $\Delta u''(0)$ voltage components of the armature current (i_k) measured immediately before the disconnection of the short-circuit.

$$X_d'' = \frac{U(\infty) - [\Delta U'(0) + \Delta U''(0)]}{\sqrt{3} I_k} ; \quad \left[x_d'' = \frac{u(\infty) - [\Delta u'(0) + \Delta u''(0)]}{i_k} \right]$$

where input values are from test data (see 6.13) as analysed according to 7.1.3.

7.4.3 From applied voltage test with the rotor in direct and quadrature axis

Sub-transient reactance X_d'' from the applied voltage test is determined using the formula:

$$X_d'' = \sqrt{Z_d''^2 - R_d''^2}$$

where $Z_d'' = \frac{U}{2I} ; R_d'' = \frac{P}{2I^2} ; \left[x_d'' = \sqrt{z_d''^2 - r_d''^2} ; z_d'' = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{u}{i} ; r_d'' = \frac{3}{2} \cdot \frac{p}{i^2} \right]$

The values of voltage U , current I and input power P , measured for the rotor position which gives the maximum excitation winding current, are according to 6.17.

7.4.4 From applied voltage test with the rotor in arbitrary position

Sub-transient reactance X_d'' from the applied voltage test (according to 6.18) with the rotor in any arbitrary position is determined as follows:

The direct-axis sub-transient reactance is calculated (in per unit or physical quantities) from the formula:

$$x_d'' = x_{av} \pm \Delta x$$

$$\text{where } x_{av} = \frac{x_{12} + x_{23} + x_{31}}{3} ; \quad \Delta x = \frac{2}{3} \sqrt{x_{12}(x_{12} - x_{23}) + x_{23}(x_{23} - x_{31}) + x_{31}(x_{31} - x_{12})}$$

The reactances x_{12} , x_{23} and x_{31} between each pair of the line terminals of the armature-winding are calculated from the formulae given in 7.4.3 (replacing subscript “d” by subscripts 12, 23 and 31 according to the terminals between which voltage is applied).

The sign before Δx is plus (+), if the maximum of the three measured values of the excitation circuit current corresponds to the largest measured armature reactance; and minus (–), if the maximum of the three measured current values of the excitation circuit corresponds to the smallest measured reactance between a pair of the armature winding line terminals.

7.5 Quadrature-axis synchronous reactance

7.5.1 From negative excitation test

The determination of X_q from the negative excitation test 6.9 is according to the formula:

$$x_q = (x_d) \cdot \frac{u_r}{u_r + (e)}$$

where

(e) is the no-load e.m.f. determined for excitation current i_{fr} at which the machine slips one pole pitch; determined from the straightened no-load saturation characteristic drawn through the point corresponding to the voltage at the moment of slipping one pole pitch (see Figure 15);

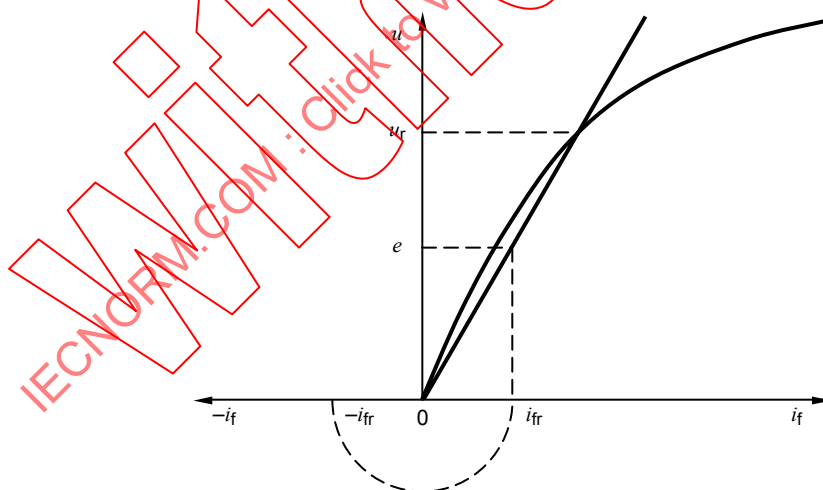
u_r is the voltage at the moment of slipping the pole pitch;

(x_d) is the direct-axis synchronous reactance determined from the same straightened no-load saturation characteristic.

If during the test, the armature current i_r at which the machine slips one pole pitch is measured, x_q is determined using the formula:

$$X_q = \frac{U_r}{\sqrt{3} I_r} \cdot \left[x_q = \frac{u_r}{i_r} \right]$$

The value of x_q obtained from this test may, depending upon the value of u_r , include saturation. To obtain an unsaturated value, the applied voltage usually shall be reduced to 0,6 of rated value or lower.



IEC 469/08

Figure 15 – No-load e.m.f. and excitation current for one pole-pitch slip

7.5.2 From low slip test

To determine X_q from the low slip test (see 6.11), armature current and voltage are measured at maximum excitation winding voltage U_{fo} , and X_q is calculated using the formula:

$$X_q = \frac{U_{\min}}{\sqrt{3} I_{\max}} ; \quad \left[x_q = \frac{u_{\min}}{i_{\max}} \right]$$

NOTE If $I_{\max}$ does not coincide with $U_{\min}$, use in calculations $I_{\max}$ as a base and its corresponding voltage.

If, during the test, the residual voltage of the machine U_{res} is within 0,1 to 0,3 of the supply test voltage, the value of the current is determined using the formula:

$$I_{\max} = \sqrt{I_{\text{av}}^2 - \left(\frac{U_{\text{res}}}{\sqrt{3}X_d} \right)^2} ; \quad \left[i_{\max} = \sqrt{i_{\text{av}}^2 - \left(\frac{u_{\text{res}}}{x_d} \right)^2} \right]$$

where I_{av} is the half sum of two consecutive maxima of the current envelope curve (see Figure 16).

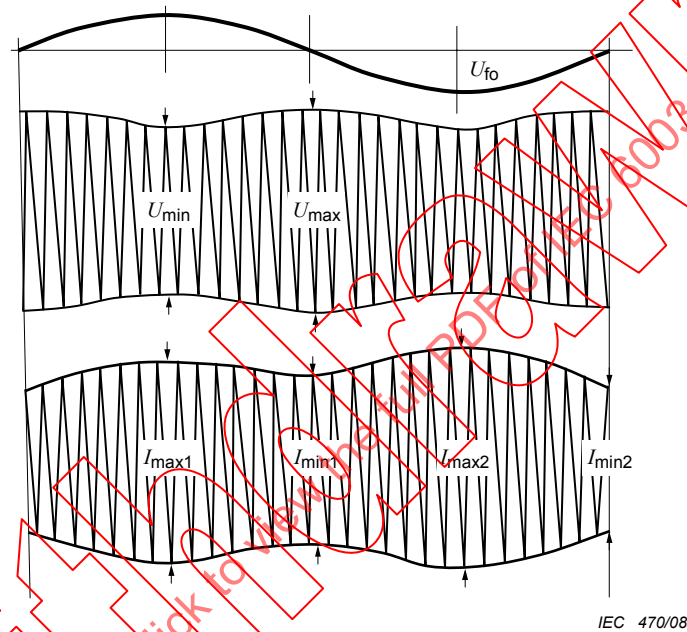


Figure 16 – Current envelope from low-slip test

A check of the measured value may be made by calculating X_d from the same test, using the results of the voltage and current measurements at the time when the voltage of the open-circuit excitation winding is equal to zero, and comparing it with its real value.

$$X_d = \frac{U_{\max}}{\sqrt{3} I_{\min}} ; \quad \left[x_d = \frac{u_{\max}}{i_{\min}} \right]$$

With a residual voltage less than 0,3 of the supply test voltage, the half sum of two consecutive minima of the envelope curve represents $I_{\min}$.

The results of X_q determined from the low slip test may be considered correct only if the value of X_d obtained from this test practically agrees with its value obtained from one of the tests given in 7.2. Otherwise, the test is repeated at several low values of the slip, followed by extrapolation of X_q values to zero slip. The value of quadrature-axis synchronous reactance obtained from this test practically corresponds to the unsaturated value.

7.5.3 From phase shifting test

A value of X_q is determined from

$$X_q = \frac{U_{\min}}{\sqrt{3} I_{\max}} ; \quad \left[x_q = \frac{u_{\min}}{i_{\max}} \right]$$

where:

$U_{\min}$ and $I_{\max}$ are determined as in 6.7.

7.5.4 From on-load test measuring the load angle

The determination of X_q by the method of load angle measurement (see 6.10) is made using the formula:

$$X_q = \frac{U \tan \delta}{\sqrt{3} I (\cos \varphi - \sin \varphi \tan \delta)} ; \quad \left[x_q = \frac{u \tan \delta}{i (\cos \varphi - \sin \varphi \tan \delta)} \right]$$

where:

U, I are armature voltage and current;

φ is the phase angle, determined by the two wattmeter method or by calculating $\cos \varphi = P / (\sqrt{3} UI)$;

δ is the load angle, measured by the stroboscopic method or any other accurate method.

NOTE 1 The formula is based on the two-axes machine model, neglecting the armature resistance.

NOTE 2 Angle values in the formula to be inserted with a magnitude and a sign:

Load angle δ is positive in generator operation and negative in motor operation. Phase angle φ is in the generator reference system, i.e. $\varphi = 0$ ($\cos \varphi = 1$) for the generator and $\varphi = \pi$ ($\cos \varphi = -1$) for motor operation, at zero reactive load.

7.6 Quadrature-axis transient reactance

7.6.1 From direct current decay test in the armature winding at standstill

Calculate

$$x'_q = \frac{1}{\frac{1}{x_q} + C_{1q}}$$

where C_{1q} is as in Annex B. Calculation of x_q is indicated in 7.1.4.

7.6.2 Calculation from test values

The quantities x'_q , x_q , τ'_{q0} and τ'_q are related to each other by the following formula:

$$x_q \cdot \tau'_q = x'_q \cdot \tau'_{q0}$$

This relation is used for the determination of x'_q from the known values of x_q , τ'_q and τ'_{q0} .

7.7 Quadrature-axis sub-transient reactance

7.7.1 From applied voltage test with the rotor in direct and quadrature position

Sub-transient reactance X''_q from the applied voltage test is determined as in 7.4.3, but replacing index d by index q.

$$X_q'' = \sqrt{Z_q''^2 - R_q''^2}$$

$$\text{where: } Z_q'' = \frac{U}{2I} ; R_q'' = \frac{P}{2I^2} ; \left[x_q'' = \sqrt{z_q''^2 - r_q''^2} ; z_q'' = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{u}{i} ; r_q'' = \frac{3}{2} \cdot \frac{p}{i^2} \right]$$

The values of the voltage U , current I and power input P are measured for the rotor position which gives the minimum excitation winding current according to 6.17.

7.7.2 From applied voltage test with the rotor in arbitrary position

Sub-transient reactance X_q'' from the stationary impedance test with the rotor in arbitrary position is determined similarly to the method described in 7.4.4, but using values according to 6.18.

The sign before Δx is determined from the following relations: plus (+), if the minimum of the three measured current values of the excitation circuit corresponds to the largest measured reactance between a pair of armature winding line terminals; minus (–), if the minimum of the three measured current values of the excitation circuit corresponds to the smallest measured armature reactance.

7.8 Zero-sequence reactance

7.8.1 From single-phase voltage application to the three phases

The zero sequence reactance and resistance are determined from single-phase voltage test applied to the three phases (see 6.19) by

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} ; \left[x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2} \right]$$

where, dependent on the connection of the three phases:

- for series connection $Z_0 = \frac{U}{3I} ; R_0 = \frac{P}{3I^2} ; \left[z_0 = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{u}{i} ; r_0 = \frac{p}{i^2} \right] ; \text{ and}$
- for parallel connection $Z_0 = \frac{3U}{I} ; R_0 = \frac{3P}{I^2} ; \left[z_0 = 3\sqrt{3} \cdot \frac{u}{i} ; r_0 = \frac{9p}{i^2} \right]$

7.8.2 From line-to-line and to neutral sustained short-circuit test

The zero sequence reactance X_0 from the line-to-line and to neutral sustained short-circuit test (see 6.22) is determined using:

$$X_0 = \frac{U_0}{I_0} ; \left[x_0 = \frac{3u_0}{i_0} \right]$$

when voltage or current harmonics may be ignored, or

$$X_0 = \frac{U_0^2}{Q} \cdot \frac{Q^2}{P^2 + Q^2} ; \left[x_0 = \frac{u_0^2}{q} \cdot \frac{q^2}{p^2 + q^2} \right]$$

when the voltage or current harmonics shall be considered. In this case U , P and Q are measured values of the voltage, active and reactive power, respectively.

The zero sequence reactance is calculated for several neutral current values. Based on the test data, X_0 is plotted against neutral current.

NOTE The value of X_0 when the neutral current equals three times the rated phase current will be taken as the rated current value.

7.9 Negative-sequence reactance

7.9.1 From line-to-line sustained short-circuit test

Negative sequence reactance $X_{(2)}$ from the line-to-line sustained short-circuit test is determined using:

$$X_{(2)} = \frac{P}{\sqrt{3}I_{k2}^2} ; \left[x_{(2)} = \sqrt{3} \frac{p}{i_{k2}^2} \right]$$

when voltage or current harmonics may be ignored, or

$$X_{(2)} = \frac{U^2}{P} \cdot \frac{P^2}{P^2 + Q^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} ; \left[x_{(2)} = \frac{u^2}{p} \cdot \frac{p^2}{p^2 + q^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \right]$$

when the voltage or current harmonics shall be considered.

Negative sequence reactance is determined for each measured short-circuit current value. On the basis of the test data $X_{(2)}$ is plotted against current.

NOTE 1 Different values might be obtained for this reactance if the fundamental component of a current, which also contains harmonics, is used. The correct value of X_2 , however, is the one determined with sinusoidal current.

NOTE 2 The value of $X_{(2)}$ when the current equals $\sqrt{3}$ times the rated phase current will be taken as the rated current value.

7.9.2 From negative-phase sequence test

Negative sequence reactance and resistance from the negative-phase sequence test of 6.23 are determined by the formulae:

$$X_{(2)} = \sqrt{Z_{(2)}^2 - R_{(2)}^2} ; Z_{(2)} = \frac{U}{\sqrt{3} I} ; R_{(2)} = \frac{P}{3I^2}$$

$$\left[x_{(2)} = \sqrt{z_{(2)}^2 - r_{(2)}^2} ; z_{(2)} = \frac{u}{i} ; r_{(2)} = \frac{p}{i^2} \right];$$

where

P is the input power;

I is the average measured current;

U is the average measured voltage applied.

Negative sequence reactance and resistance are determined for each measured supply voltage. On the basis of the test data X_2 and R_2 are plotted against current.

7.9.3 Calculation from test values

Negative sequence reactance $X_{(2)}$ from known test values of X''_d (see 7.4) and X''_q (see 7.6) is calculated by the formula:

$$x_{(2)} = \frac{x''_d + x''_q}{2}$$

NOTE Experience shows that for salient pole machines $x''_q/x''_d \approx 1 \dots 1,3$ for complete damper windings, connected between poles; $x''_q/x''_d \approx 1,8 \dots 3$ for damper windings only in the d-axis with laminated poles; $x''_q/x''_d \approx 1,5 \dots 1,8$ for solid steel pole shoes. For cylindrical, solid steel rotor machines it is found that $x''_q/x''_d \approx 1$.

7.9.4 From sudden line-to-line short-circuit test

Negative-sequence reactance from the sudden line-to-line short-circuit test is determined using the formula:

$$X_{(2)} = \frac{U}{I''} - X''_d ; \quad \left[x_{(2)} = \frac{\sqrt{3} u}{i''} - x''_d \right]$$

where

U is the open-circuit line-to-line armature voltage, measured immediately before short-circuiting;

I'' is the initial fundamental periodic component of the line-to-line short-circuit armature current, obtained from the oscillogram as a sum of $I(\infty) + \Delta I''_k(0) + \Delta I''_k(0)$, each one of these current components (see 6.21) being determined in accordance with 6.21;

X''_d is the direct-axis sub-transient reactance as determined from a sudden three-phase short-circuit test in accordance with 7.4.1. The saturated or unsaturated value of X''_d should be taken to match the corresponding required value of $X_{(2)}$.

7.9.5 From direct-current decay test at standstill

The negative sequence reactance, knowing the frequency response characteristics $x_d(js)$ and $x_q(js)$, is determined as an imaginary part:

$$x_{(2)} = \text{Im} \left\{ \frac{j}{2 \left[\frac{1}{x_d(js)_{s=2}} + \frac{1}{x_q(js)_{s=2}} \right]} \right\}$$

7.10 Armature leakage reactance

The armature-leakage reactance may be determined by the method of applying symmetrical three-phase voltage to the armature winding with rotor removed. Its determination requires some of the winding parameters to be known.

Leakage reactance X_σ from the applied voltage test with rotor removed (see 6.28) is calculated by the following formula:

$$X_\sigma = X_a - X_b ;$$

The total leakage reactance X_a with the rotor removed is determined by

$$X_a = \sqrt{Z^2 - R^2} \quad , \quad Z = \frac{U}{\sqrt{3}I} \quad , \quad R = \frac{P}{3I^2}$$

The reactance X_b due to flux across the armature active surface created by the armature winding in the space which is normally occupied by the rotor is calculated (search coil placed according to 6.28):

- for integral slot windings $X_b = \frac{U_c}{I} \frac{N k_w}{N_c}$;

- for fractional slot windings
$$X_b = \frac{U_c}{I} \frac{Nk_w}{N_c \sin\left(\frac{q' \pi}{3q}\right)}$$

where

U_G is the search coil voltage;

I is the armature current:

N is the number of series-connected turns per circuit of a phase of the armature winding;

N_c is the number of search coil turns;

k_w is the armature winding factor;

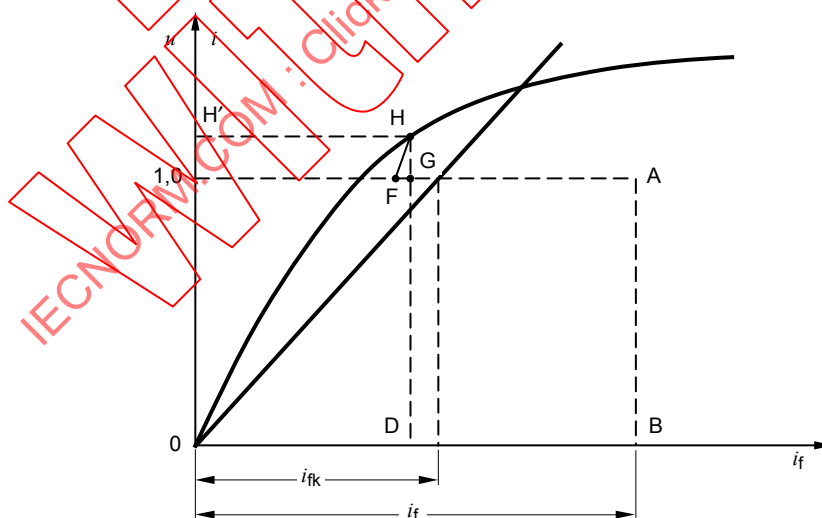
q is the number of slots per pole pitch and phase (integral or fractional);

q' is the largest whole number of slots comprising the pole pitch.

NOTE The literature provides also a formula for the calculation of X_b from machine design parameters; however the test method is preferred.

7.11 Potier reactance

The Potier reactance is determined graphically according to Figure 17.



IEC 471/08

Figure 17 – Determination of Potier reactance

The no-load saturation and three-phase sustained short-circuit characteristics are plotted as in 7.1.1. The excitation current i_f from the test (see 6.32), measured at rated armature current and zero power-factor at overexcitation is laid off as OB. Point A is the intersection of the rated voltage and the excitation current. To the left from point A, parallel to the abscissa, a length AF equal to the excitation current i_{fk} for the rated armature sustained short-circuit

current is laid off. A line parallel to the initial lower portion of the no-load characteristic is drawn through the point F up to the intersection with the upper part of the no-load characteristic (point H). The length of perpendicular from point H to point G (intersection with AF line) represents the voltage drop on reactance X_p at rated armature current. Note that in per unit values x_p equals HG.

7.12 Zero-sequence resistance

7.12.1 From single-phase voltage test applied to the three phases

Zero-sequence resistance $R_{(0)}$ is determined from the test (see 6.19) together with $Z_{(0)}$ and $X_{(0)}$ according to 7.8.1.

7.12.2 From line-to-line and to neutral sustained short-circuit test

Zero-sequence resistance $R_{(0)}$ from the line-to-line and to neutral short-circuit test is determined by the following formula for several neutral current values:

$$R_{(0)} = \frac{U_0^2}{P} \cdot \frac{P^2}{P^2 + Q^2} ; \quad \left[r_{(0)} = \frac{u_0^2}{p} \cdot \frac{p^2}{p^2 + q^2} \right]$$

On the basis of the test data, $R_{(0)}$ is plotted against neutral current.

NOTE 1 A number of levels of excitation is needed to get several values of neutral current.

NOTE 2 The value of $R_{(0)}$, when the neutral current equals three times the rated phase current, will be taken as the rated current value.

7.13 Positive-sequence armature winding resistance

Positive-sequence resistance $R_{(1)}$ is determined from the known losses, consisting of $P_{cu} = 3I_a^2 R_a$ and additional load losses (stray losses) P_{LL} in the armature winding measured at rated current in accordance with IEC 60034-2-1, using:

$$R_{(1)} = \frac{P_{cu} + P_{LL}}{3I_N^2} ; \quad \left[r_{(1)} = p_{cu} + p_{LL} \right]$$

This value of $R_{(1)}$ corresponds to the winding temperature at which the loss measurements were conducted.

7.14 Negative-sequence resistance

7.14.1 From line-to-line sustained short-circuit test

Negative-sequence resistance $R_{(2)}$ from the line-to-line sustained short-circuit test is determined using:

$$R_{(2)} = \frac{U^2}{Q} \cdot \frac{Q^2}{P^2 + Q^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} ; \quad \left[r_{(2)} = \frac{u^2}{q} \cdot \frac{q^2}{p^2 + q^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \right]$$

Negative sequence resistance is determined for each measured short-circuit armature current. On the basis of the test data, $R_{(2)}$ is plotted against current.

NOTE 1 A different value might be obtained for this resistance if the fundamental component of a current, which also contains harmonics, is used.

NOTE 2 The value of $R_{(2)}$, when the current equals $\sqrt{3}$ times the rated phase current, will be taken as the rated current value.

7.14.2 From negative-phase sequence test

Negative sequence reactance and resistance are determined from the negative-phase sequence test by the formulae:

$$X_{(2)} = \sqrt{Z_{(2)}^2 - R_{(2)}^2} ; \quad Z_{(2)} = \frac{U}{\sqrt{3} I} ; \quad R_{(2)} = \frac{P}{3I^2}$$

$$\left[x_{(2)} = \sqrt{z_{(2)}^2 - r_{(2)}^2} ; \quad z_{(2)} = \frac{u}{i} ; \quad r_{(2)} = \frac{p}{i^2} \right];$$

where

P is the input power;

I is the average measured current;

U is the average measured voltage applied.

Negative sequence reactance and resistance are determined for each measured supply voltage. On the basis of the test data $X_{(2)}$ and $R_{(2)}$ are plotted against current.

7.15 Armature and excitation winding resistance

When using the volt-ampere method (see 6.3), the winding resistance is calculated from the formula:

$$R_a = \frac{U}{I} ; \quad \left[r_a = 3 \cdot \frac{u}{i} \right]$$

where

U is the voltage applied to the winding;

I is the winding current.

The average value is taken for the resistance. In determining the average value, resistances which differ by more than $\pm 0,01$ from the average per unit value should be disregarded.

When resistance measurements are made between each pair of the line terminals of the armature winding, the resistance R_1 of phase 1 is calculated from the formula (in physical quantities):

– for star-connected winding:

$$R_1 = \frac{R_{12} + R_{31} - R_{23}}{2}$$

– for delta-connected winding:

$$R_1 = \frac{2R_{12} \cdot R_{23}}{R_{12} + R_{23} - R_{31}} - \frac{R_{12} + R_{23} - R_{31}}{2}$$

where R_{12} , R_{23} and R_{31} are the resistances measured between terminals 1-2, 2-3 and 3-1.

The average value is taken for the resistance. In determining the average value, resistances which differ by more than $\pm 0,01$ per unit value from the average should be disregarded.

7.16 Direct-axis transient short-circuit time constant

7.16.1 From sudden three-phase short-circuit test

Direct-axis transient short-circuit time constant τ'_d , as determined from the sudden three-phase short-circuit test, is the time required for the transient armature current component to decrease to $1/e \approx 0,368$ of its initial value (see 7.1.2).

7.16.2 From field current decay at rated speed with armature winding short-circuited

Direct-axis transient short-circuit time constant is determined from the field current decay test (6.25) at rated speed with the armature winding short-circuited as the time required for the current difference to decrease to $1/e \approx 0,368$ of its initial value.

7.16.3 From direct current decay test at standstill

Direct axis time constants are determined using known roots of characteristic equations $D_d(p) = 0$ and $D'_d(p) = 0$ according to 7.1.4:

If a sudden short-circuit test is performed for determining X'_d , then τ'_d shall be determined from the same test. In all other cases preference is given to the field current decay method at rated speed with the armature winding short-circuited.

The sudden three-phase short-circuit and field current decay tests at rated speed may be performed in a brushless machine if the latter is equipped with temporary slip-rings or if it may be excited from its own exciter, the exciter being separately excited. Otherwise, the value of τ'_d is determined from the field current decay test at standstill.

7.16.4 From suddenly applied excitation with armature winding short-circuited

The direct-axis transient short-circuit time constant is determined by suddenly applying excitation with armature winding short-circuited (see 6.26) as the time required for the transient armature current component $\Delta I'_d(0)$ to decrease to $1/e \approx 0,368$ of its initial value.

7.16.5 From field current decay test at standstill with two phases of armature winding short-circuited

The direct-axis transient short-circuit time constant is determined by suddenly applying excitation at standstill with two phases of the armature winding short-circuited (see 6.27) as the time required for the transient field current component $\Delta I'_f(0)$ to decrease to $1/e \approx 0,368$ of its initial value.

7.17 Direct-axis transient open-circuit time constant

7.17.1 From field current decay at rated speed with armature winding open

The direct-axis transient open-circuit time constant is determined from 6.24.1 as the time required for the voltage difference to decrease to $1/e \approx 0,368$ of its initial value.

7.17.2 From field current decay test at standstill with armature winding open

The direct-axis transient open-circuit time constant is determined from 6.24.2 as the time required for the field current to decrease to $1/e \approx 0,368$ of its initial value.

7.17.3 From voltage recovery test

The direct-axis transient open-circuit time constant is determined from 6.13 as the time required for the voltage difference to decrease to $1/e \approx 0,368$ of its initial value.

7.17.4 From direct-current decay test at standstill

Direct axis time constants of synchronous machines are determined using known roots of characteristic equations $D_d(p) = 0$ and $D'_d(p) = 0$ according to 7.1.4.

7.17.5 From suddenly applied excitation with armature winding open-circuited

The direct-axis transient open-circuit time constant from the suddenly applied excitation test with open-circuit armature winding is determined as the time required for the transient voltage component $\Delta U(0)$ to decrease to $1/e \approx 0,368$ of its initial value.

7.18 Direct-axis sub-transient short-circuit time constant

τ''_d , as determined from the sudden three-phase short-circuit test, is the time required for the sub-transient armature current component to decrease to $1/e \approx 0,368$ of its initial value (see 7.1.2).

7.19 Direct-axis sub-transient open-circuit time constant

7.19.1 From voltage recovery test

The direct-axis open-circuit sub-transient time constant as determined from the voltage recovery test is the time required for the sub-transient component $\Delta U''$ determined in accordance with 7.1.3, to decrease to $1/e \approx 0,368$ of its initial value.

7.19.2 From direct-current decay test at standstill

Direct axis time constants are determined using known roots of the characteristic equations $D_d(p) = 0$ and $D'_d(p) = 0$ according to 7.1.4.

7.20 Quadrature-axis transient short-circuit time constant

7.20.1 Calculation from test values

Quadrature-axis transient short-circuit time constant is determined by calculation from the test values x_q , x'_q and τ'_{q0} using the following formula:

$$\tau'_q = \tau'_{q0} \frac{x'_q}{x_q}$$

7.20.2 From direct-current decay test at standstill

Quadrature axis time constants are similarly determined as in 7.19.2 using the roots of characteristic equations $D_q(p) = 0$ and $D'_q(p) = 0$ according to 7.1.4.

7.21 Quadrature-axis transient open-circuit time constant

7.21.1 Determination from direct-current decay test at standstill

Quadrature axis time constants are determined using known roots of the characteristic equations $D_q(p) = 0$ and $D'_q(p) = 0$ according to 7.1.4.

7.22 Quadrature-axis sub-transient short-circuit time constant

7.22.1 Calculation from test values

Quadrature-axis sub-transient short-circuit time constant is determined by calculation from the test values x'_q (see 7.6.1), x''_q (see 7.7) and τ''_{q0} (see 7.23.1) using the following formula:

$$\tau_q'' = \tau_{qo}'' \frac{x_q''}{x_q}$$

7.22.2 Determination from direct-current decay test at standstill

Quadrature axis time constants are determined using the roots of characteristic equations $D_q(p) = 0$ and $D_q'(p) = 0$ according to 7.1.4.

7.23 Quadrature-axis sub-transient open-circuit time constant

7.23.1 From direct-current decay test at standstill

Quadrature axis time constants are similarly determined using the roots of characteristic equations $D_q(p) = 0$ and $D_q'(p) = 0$ according to 7.1.4.

7.24 Armature short-circuit time constant

7.24.1 From sudden three-phase short-circuit test

Armature short-circuit time constant τ_a is determined as the time required for the excitation current periodic component to decrease to $1/e \approx 0,368$ of its initial current.

NOTE In a brushless machine excited from its own exciter without using temporary slip-rings the time constant cannot be determined from the decrease of the excitation current periodic component.

In an alternative method, the time constant is determined from decrease of the aperiodic armature current components in each phase as the average time required for these components to decrease to $1/e \approx 0,368$ of their initial value. Any phase whose initial aperiodic component is less than 0,4 of the initial maximum resolved value should be disregarded in determining the armature short circuit time constant.

Determination of the armature short-circuit time constant from the decrease of the aperiodic armature current component is permissible, provided the armature current during the sudden short-circuit test is measured by non-inductive shunts.

7.24.2 Calculation from test values

Armature short-circuit time constant τ_a at rated frequency f_N from known test values of $X_{(2)}$ (see 7.9) and R_a (see 7.15) is calculated using the formula:

$$\tau_a = \frac{X_{(2)}}{2\pi f_N R_a}$$

NOTE Use a saturated value of $x_{(2)}$.

7.25 Rated acceleration time and stored energy constant

7.25.1 From suspended rotor oscillation test

The acceleration time and stored energy constant from the string suspended rotor oscillation test (see 6.30) are calculated using the formulae:

$$\tau_J = \frac{J\omega_N^2}{P_N} \cdot 10^{-3} \quad ; \quad H = \frac{J\omega_N^2}{2S_N} \cdot 10^{-3}$$

where, indicating units conventionally in use:

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

$\omega_N = \pi n_N/30$ is the rated angular speed, in rad/s;
 n_N is the rated speed of rotation, in revolutions per minute;
 P_N, S_N are in kW or kVA, respectively.

NOTE 1 τ_J and H are expressed in SI Units, i.e. in s.

The moment of inertia is calculated using:

$$J = J_p \frac{T^2}{T_p^2 - T^2},$$

when the rotor is suspended by one filament, or

$$J = \frac{T^2 \cdot a^2}{L} \cdot \frac{m \cdot g}{(4\pi)^2}$$

when it is suspended by two filaments,

where

J_p is the known moment of inertia of pulley, in kg·m²;
 T is the time of one cycle or rotor swing, in s;
 T_p is the time of one cycle of rotor swing together with pulley or flywheel, in s;
 a is the distance between the points of suspension, in m;
 L is the length of suspension, in m;
 g is the acceleration of free fall, in m/s²;
 m is the rotor mass, in kg.

NOTE 2 Methods to determine J at standstill may not be suitable for large machines.

NOTE 3 When the acceleration time is determined for a group of mechanically coupled machines, the accelerating torque is calculated for rated active power and rated angular velocity of the base synchronous machine.

7.25.2 From no-load retardation test

Acceleration time of the machine and stored energy constant from the no-load retardation test (see 6.29) are determined using the formulae:

$$\tau_J = \omega_N \frac{\Delta t}{\Delta \omega} \cdot \frac{P_{\text{mech}} + P_{\text{Fe}}}{P_N}; \quad H = \frac{\omega_N}{2} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta \omega} \cdot \frac{P_{\text{mech}} + P_{\text{Fe}}}{S_N}$$

where

P_{mech} is the mechanical losses at rated speed, in kW;
 P_{Fe} is the core losses at rated speed and corresponding value of test voltage, in kW;
 ω_N is the rated angular speed, in rad/s.

7.26 Rated excitation current

7.26.1 From direct measurement

Rated excitation current I_{fN} is the current in the excitation winding when the machine operates at rated voltage, current, power-factor and speed.

The rated excitation current is determined by direct measurement during operation under rated conditions (see 6.2).

7.26.2 Potier diagram

To determine the rated excitation current by Potier's diagram, use is made of the no-load saturation characteristic (see 6.4.2), sustained short-circuit characteristic (see 6.5.2) and Potier reactance X_p .

With the rated armature current vector i_N laid off along the abscissa as the base, the measured power-factor angle φ_N (which is considered to be positive for an overexcited generator) is used to draw the rated voltage vector u_N (see Figure 18).

The vector of the voltage drop ($x_p i_N$) in the Potier reactance at the rated armature current is drawn from the end of the voltage vector as a perpendicular to the armature current vector. The voltage drop in the armature winding resistance is usually neglected. If necessary, it may be taken into account by drawing the vector of positive phase sequence voltage drop in the positive phase sequence armature winding resistance from the end of the voltage vector parallel to the current vector.

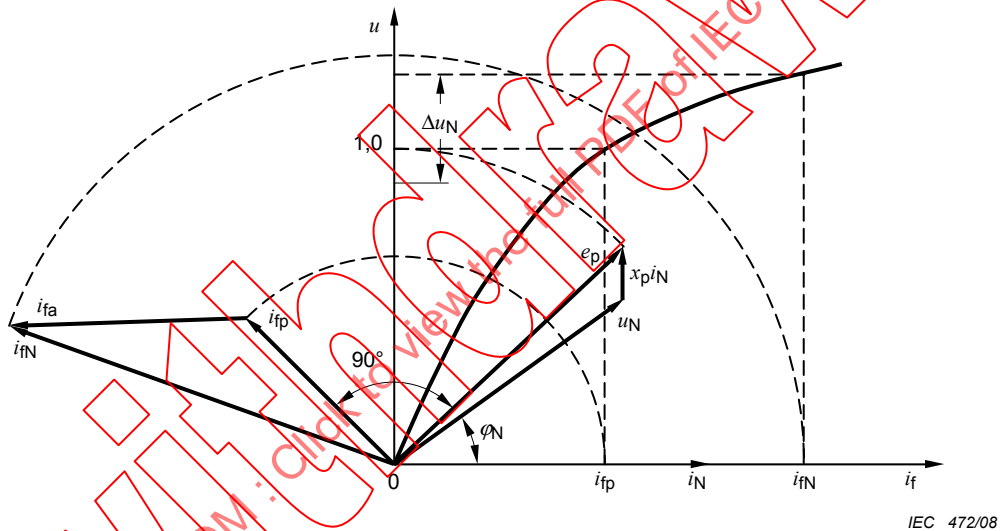


Figure 18 – Potier's diagram

This vector should be laid off on the diagram (see Figure 18) in the direction of the armature current vector for generators and in the opposite direction for motors.

The vector sum of the rated voltage and the voltage drop in the reactance X_p gives e.m.f. vector e_p ; excitation current, i_{fp} , corresponding to this e.m.f. is determined from the no-load curve and is laid off from the origin at 90° to the e.m.f. vector.

The excitation current component compensating armature reaction at rated armature current i_{fa} is determined as the difference between the excitation current corresponding to the rated armature current on the sustained three-phase short-circuit characteristic, and the excitation current corresponding to the voltage drop in X_p due to armature rated current on the no-load saturation characteristic (see Figure 17). Vector i_{fa} is laid off from the end of the vector i_{fp} parallel to the armature current vector. The rated excitation current i_{fn} is the vector sum of i_{fp} and i_{fa} .

If the value of the excitation current obtained from the Potier diagram (as well as from ASA and Swedish diagrams) is used only to estimate the rated value of excitation current, the Potier reactance X_p if unknown may be replaced in the construction of Figure 18 for machines

with rated frequency below 100 Hz by (ax_a) , where x_a is the armature reactance measured without rotor, and a is a factor taken equal to 1,0 for salient pole machines and 0,6 (0,65) for non-salient pole machines (unless more precise figures are available from previous experience on machines of similar construction). If the value of the excitation current obtained from the Potier diagram (as well as from ASA and Swedish diagrams) is used to determine the temperature rise of the excitation winding from the zero power factor loading test, the Potier reactance should be determined from no-load and sustained three-phase characteristics and the excitation current corresponding to the rated voltage and rated armature current at zero power-factor.

The test with rotor removed (6.28) is conducted with three-phase voltage at rated frequency applied to terminals of the armature winding. The applied voltage is so chosen that the armature current is near the rated value. During the test, measurements are made of the terminal voltage U , line current I and supplied active power P .

7.26.3 ASA diagram

To determine the rated excitation current of the machine by the ASA vector diagram (see Figure 19), use is made of the no-load saturation characteristic (see 6.4.2), the sustained three-phase short-circuit characteristic (see 6.5.2) and the Potier reactance.

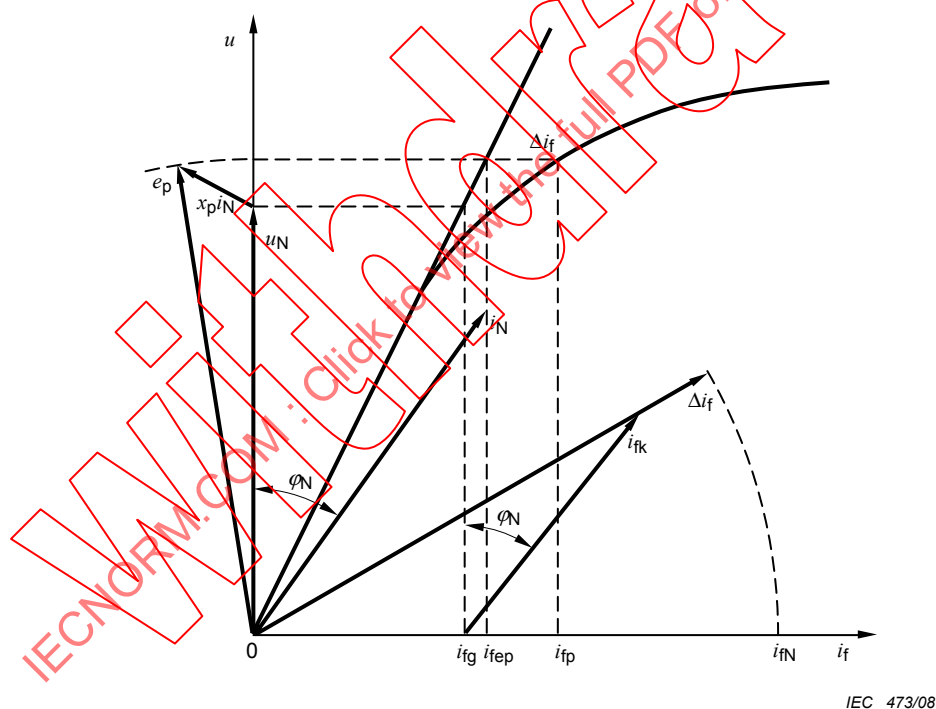


Figure 19 – ASA diagram

The determination of e.m.f. e_p is made in accordance with 7.1.1. The excitation current for the air-gap line at the rated armature voltage i_{fg} is determined from the no-load saturation characteristic. The vector current i_{fg} is laid off from the origin along the abscissa axis. From its end, at the rated power-factor angle φ_N (which is considered to be positive for an overexcited generator) to the right of the vertical, the vector of excitation current i_{fk} corresponding to rated armature current on the sustained three-phase short-circuit characteristic (see 7.1.1) is laid off.

The vector current corresponding to the difference Δi_f between the excitation currents of the no-load saturation characteristic i_{f0} and on the air-gap line i_{fep} , both for the voltage e_p (see

Figure 19) is laid off along the geometrical vector sum of the excitation currents. The sum of the three vectors corresponds to the rated excitation current.

The rated excitation current may also be determined using the following equation (in per unit or physical values):

$$i_{fN} = \Delta i_f + \sqrt{(i_{fg} + i_{fk} \sin \varphi_N)^2 + (i_{fk} \cos \varphi_N)^2}$$

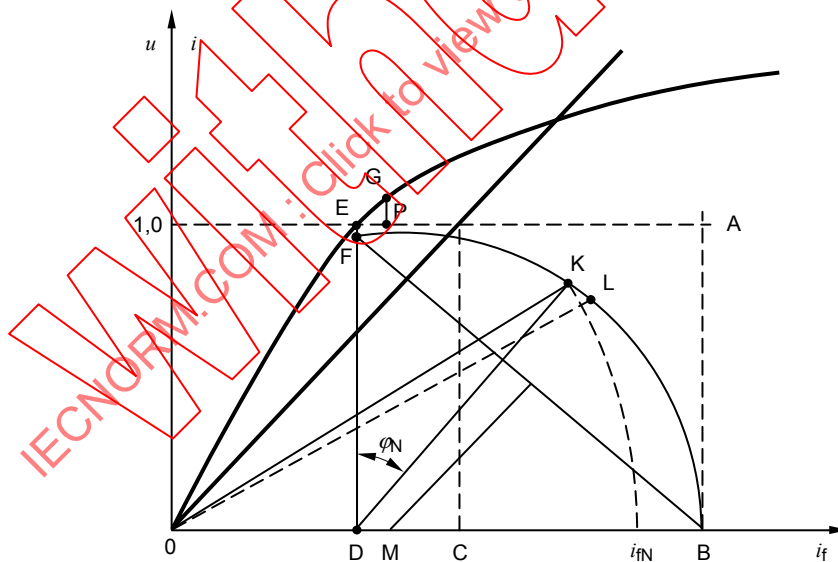
If the Potier reactance is unknown and the ASA diagram is used to estimate the rated value of the excitation current only (without zero-power loading test) then the Potier reactance may be replaced in the construction of Figure 19 by a_{x_a} (see 7.26.2).

7.26.4 Swedish diagram

To determine rated excitation current of the machine by the Swedish diagram, use is made of the no-load saturation characteristic (see 6.4.2), the sustained three-phase short-circuit characteristic (see 6.5.2) and the excitation current corresponding to the rated voltage and armature current at zero power-factor (overexcited) (see 6.8).

Three values of the excitation current are laid off on the abscissa axis (see Figure 20):

- OD corresponding to the rated voltage on the no-load curve;
- OB corresponding to the rated voltage and armature current at zero power-factor;
- OC corresponding to the rated armature current on the sustained short-circuit characteristic.



IEC 474/08

Figure 20 – Swedish diagram

From point D a perpendicular to the abscissa axis is drawn on which the length FD equal to 1,05 OC is laid off. Points F and B are connected by a straight line and a perpendicular is drawn from the centre of this line down to the intersection with the abscissa axis in point M. From point M, as a centre, a circular arc is drawn through points F and B.

From point D at the power-factor angle φ_N (which is considered to be positive for an overexcited generator) to FD, a line is drawn to intersect with the arc FB at point K. The length OK corresponds to the rated excitation current of the machine.

If necessary, the voltage drop in the armature resistance may be accounted for as follows:

The length KL is laid off along the arc FKB. This length is equal to the excitation current component EP required to increase the no-load voltage by the value of PG, representing the voltage drop in the positive sequence armature resistance at rated current. The length OL represents the required excitation current.

When the machine operates as a motor, the voltage drop in the positive sequence armature resistance is laid off downward from the point E, and point L is laid off to the left from point K.

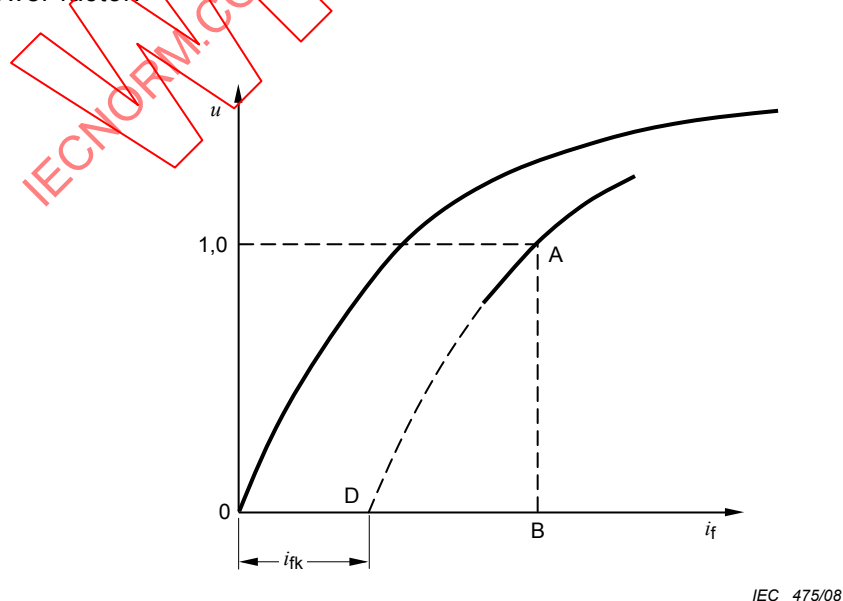
If the excitation current at rated voltage and current and zero power-factor is lacking, the following method may be used for its determination while using the Swedish diagram. Along the ordinate axis the voltage drop in ax_a (see 7.26.2) at rated armature current is added to the rated armature voltage (point H', see Figure 17).

A line parallel to the abscissa axis is drawn from point H' to intersect with the no-load characteristic in point H. From that point, a perpendicular is drawn to the intersection with the abscissa-axis (point D – see Figure 17). To the right of point D, vector i_{fa} (length DB) is added along the abscissa. The excitation current equal to the length OB is the required current to be used in drawing the Swedish diagram.

7.27 Excitation current referred to rated armature sustained short-circuit current

7.27.1 From over-excitation test at zero power factor

From the tests 6.32 performed at rated armature current i_N the experimental points are plotted on a diagram voltage over field current, see Figure 21. A curve is drawn forming the upper portion of the zero power-factor curve. On the same diagram the no-load saturation curve (see 7.1.1) is also drawn. Then the zero power factor curve is extrapolated parallel to the no-load curve until it intersects with the abscissa. The length OD represents the excitation current corresponding to the rated armature sustained short-circuit current i_{fk} . On the zero power factor curve point A corresponds to rated voltage. The length OB on the abscissa is then equal to the excitation current for rated voltage and rated current at over-excitation and zero power factor.



IEC 475/08

Figure 21 – Excitation current from over-excitation test at zero power factor

7.27.2 From sustained three-phase short-circuit test

From test 6.5, the short-circuit curve is drawn as shown in Figure 8 to determine the excitation current at rated armature short-circuit current.

7.28 Frequency response characteristics

7.28.1 General

Frequency response characteristics are specialized transfer functions of Park's synchronous machine equations. These transfer functions may be used in transient phenomena studies of synchronous machines. They are of special importance for solid rotor machines.

For a machine at standstill, the transfer functions may be expressed as follows:

$$u_d(p) = [r + p x_d(p)] \cdot i_d(p) + G(p) \cdot i_f(p)$$

$$u_q(p) = [r + p x_q(p)] \cdot i_q(p)$$

where

p is the Laplace operator;

$i_d(p)$, $i_q(p)$, $i_f(p)$ are d- and q-axis armature current components and field current;

$x_d(p)$, $x_q(p)$ are d- and q-axis reactance operators;

$G(p)$ is the transfer operator.

NOTE The definition of the Laplace transform of a function $f(t)$ is: $F(p) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-pt} dt$.

The frequency response characteristics $\frac{1}{x(js)}$ and $G(js)$ are complex expressions for $p=js$.

7.28.2 From asynchronous operation at reduced voltage

Impedances, resistances and reactances for each speed step (slip) are calculated using the following formulae (see 6.33):

$$Z(s) = \frac{U_{av}}{\sqrt{3} I_{av}} ; \quad \left[z(s) = \frac{u_{av}}{i_{av}} \right]$$

$$R(s) = \frac{P_{av}}{3 I_{av}^2} ; \quad \left[r(s) = \frac{p_{av}}{i_{av}^2} \right]$$

$$X(s) = \sqrt{Z^2(s) - R^2(s)} ; \quad \left[x(s) = \sqrt{z^2(s) - r^2(s)} \right]$$

Then the values obtained are plotted against slip to obtain the frequency response characteristics at low frequencies.

NOTE 1 Due to low applied voltages, core losses are neglected and the reactances obtained are unsaturated.

NOTE 2 The reactances obtained correspond approximately to the unsaturated half sum of sub-transient reactances at standstill and to the half sum of synchronous reactances at zero slip.

Values of average impedance for each slip are plotted as in Figure 22. It is helpful to have plotted on the same diagram values of power factor against slip.

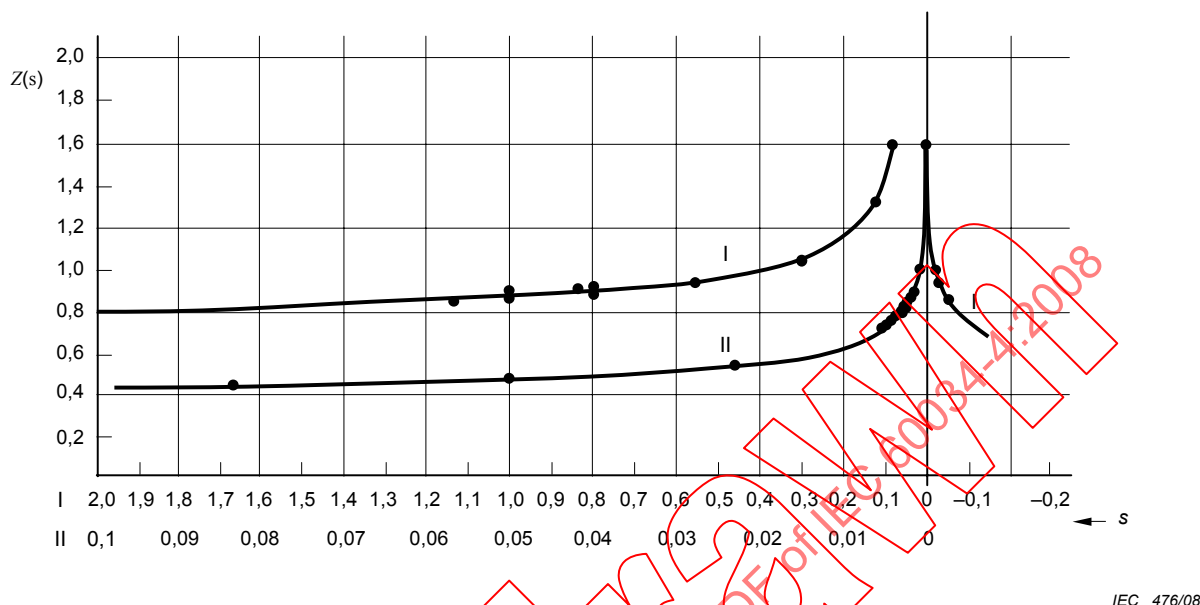


Figure 22 – Frequency response characteristics at low frequencies (example)

7.28.3 From applied variable frequency voltage test at standstill

Quantities for each frequency are obtained separately for the direct- and the quadrature-axis. The formulae correspond for the d- and q-axes, so that the following illustrates calculations for one axis only. Having obtained from the oscillogram U and I for the particular test frequency f_t and their phase difference (see 6.34), the impedance of the circuit at standstill is determined from

$$Z_{\text{stat}}(js) = \frac{U(js)}{I(js)} K_{\text{con}}$$

where

Z_{stat} is the steady state impedance of the machine determined for each frequency of applied voltage along the q- and d-axes;

U is the applied voltage at frequency f_t , expressed as slip $s = f_t / f_N$;

I is the measured current;

K_{con} is a factor depending upon connections of the armature winding. If voltage is applied to the terminals with the third one open, then $K_{\text{con}} = 1/2$; if two phases being connected in parallel are in series with the third one $K_{\text{con}} = 2/3$.

For the machine rotating at slip s with applied rated frequency voltage, its impedance is determined using the following formula:

$$Z(js) = \frac{Z_{\text{stat}}(js) - R_{ls}}{s} + R_l$$

where

$Z_{\text{stat}}(js)$ is as above;

R_{1s} is the a.c. armature winding resistance at applied voltage and frequency. It may be determined from the test with rotor removed at a frequency corresponding to s , or may be calculated as:

$$R_{1s} \approx R_s \left[1 + (R_l - R_a) \left(\frac{f}{f_n} \right)^2 \right]$$

NOTE For slip values of 0,25 and less, $R_{1s} \approx R_a$, with an error within 5 %.

Admittances of the machine may be determined as inverse value of $Z(js)$:

$$Y(js) = \frac{1}{Z(js)}$$

Using angle φ between voltage and current as obtained from the oscillogram or by means of some suitable device, the values of reactances and resistances referred to a rotating machine with a certain slip may be calculated as follows:

$$X(js) = \text{Im} [Z_{\text{stat}}(js)] \frac{|Z_{\text{stat}}(js)| \sin \varphi}{s}$$

$$R(js) = \text{Re} [Z_{\text{stat}}(js)] + R_l = \frac{|Z_{\text{stat}}(js)| \cos \varphi - P_{1s}}{s} + R_l$$

Values obtained from this test are unsaturated quantities.

The frequency response characteristic of the machine is represented by curves of the obtained quantities as functions of slip for each of the axes.

Quantities of synchronous machines (reactances, resistances and time constants) may be obtained, using frequency response characteristics. Reactances and resistances at unity slip are approximately equal to sub-transient values. Reactances and resistances extrapolated to zero slip represent synchronous values.

7.28.4 From direct current decay test in the armature winding at standstill

In the following, the characteristics are expressed in per unit values. Use the values obtained from test 6.15 according to 7.1.4:

$i(t)$ is the ratio of armature winding test current (or the difference of the test curve and sustained value) and the initial value of this current;

$i_f(t)$ is the field winding decaying current in per unit value;

i_0 is the initial value of armature winding current along the d- or q-axis in per unit value;

r is the phase armature winding circuit resistance in per unit value: $r = r_a + K_{\text{con}} \Delta r$

where

r_a is the d.c. armature winding resistance in per unit value;

Δr is the additional (external) armature circuit resistance in per unit value;

K_{con} is the armature winding connection factor depending on the connection of the armature winding. If the voltage is applied to two terminals with the third one open, $K_{\text{con}}=1/2$; if two phases connected in parallel are in series with the the third one $K_{\text{con}}=2/3$.

For practical calculation of the frequency response functions, see Annex B.

A check of the quantities X_d , X''_d , X_q and X''_q shall be made with the values obtained by the recommended methods given in this standard, and the frequency response characteristics correspondingly corrected. If the divergence is more than 10 %, the d.c. decay shall be repeated so as to obtain closer identity with actual frequency response characteristics.

7.29 Short-circuit ratio

Short-circuit ratio K_c is determined from the no-load saturation and three-phase sustained short-circuit characteristics as a quotient of the excitation current corresponding to the rated voltage on the no-load saturation curve and the excitation current corresponding to the rated current on the short-circuit curve (see Figure 8):

$$K_c = \frac{OD}{OH} = \frac{i_{fo}}{i_{fk}}$$

7.30 Rated voltage regulation

7.30.1 From direct measurement

The rated voltage regulation ΔU_N is determined by direct measurement (see 6.2).

7.30.2 From no-load saturation characteristic and known field current at rated load

The rated voltage regulation ΔU_N is determined graphically from the no-load characteristic (see 6.4) and the rated excitation current I_{fN} according to 7.26.

The method of direct measurement is preferred. The graphical methods are used when the zero-power factor loading of the tested machine is performed. When determining the rated excitation current by the direct measurement during operation under rated conditions, the machine on test shall be excited from its own automatic regulation system because the excitation current when the machine is excited from automatic system may differ from that when the machine is separately excited (especially in the machines with static excitation system).

7.31 Initial starting impedance of synchronous motors

The initial starting impedance may be determined from the locked rotor test (see 6.31) as:

$$Z_{st} = \frac{U}{\sqrt{3}I_{av}} \quad ; \quad \left[z_{st} = \frac{u}{i_{av}} \right]$$

where

U is the applied line-to-line voltage;

I_{av} is the average of three-line steady state currents measured during the test.

If the test is performed at several reduced voltages, then the value of the initial starting impedance is determined for each voltage and the rated voltage value may be determined by extrapolation of the initial starting impedance to the rated voltage value from the curve of Z_{st} plotted against the applied voltage.

If the power input is measured, the initial starting resistance and reactance are determined as:

$$R_{\text{st}} = \frac{P}{3I_{\text{av}}^2} ; \left[r_{\text{st}} = \frac{p}{i_{\text{av}}^2} \right]$$

$$X_{\text{st}} = \sqrt{Z_{\text{st}}^2 - R_{\text{st}}^2} ; \left[x_{\text{st}} = \sqrt{z_{\text{st}}^2 - r_{\text{st}}^2} \right]$$

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60034-4:2008

Withd2Wm

Annex A (informative)

Testing cross-reference

Table A.1 – Test cross-reference

Test		Quantity	
Clause	Description	Description	Clause
6.2	Direct measurement	Rated excitation current i_{fN}	7.26.1
		Rated voltage regulation ΔU_N	7.30.1
6.3	Ammeter-voltmeter or bridge	Armature resistance R_a	7.15
		Excitation winding resistance R_f	7.15
6.4.2	By diagram from no-load saturation characteristic and known i_{fN}	Rated voltage regulation ΔU_N	7.30.2
6.4 and 6.5	No-load saturation, sustained three-phase short-circuit	Direct-axis synchronous reactance X_d	7.2.1
		Potier reactance X_p	7.11
		Excitation current at rated armature short-circuit current i_{fk}	7.27.2
		Short-circuit ratio K_c	7.29
6.6	Motor no-load	Direct-axis synchronous reactance X_d	7.2.2
6.7	Phase shifting	Direct-axis synchronous reactance X_d	7.2.3
		Quadrature-axis synchronous reactance X_q	7.5.3
6.8	Over-excitation at zero power factor	Rated excitation current (Swedish diagram)	7.26.4
6.9	Negative excitation	Quadrature-axis synchronous reactance X_q	7.5.1
6.10	On-load measuring load angle	Direct-axis synchronous reactance X_d	7.2.4
		Quadrature-axis synchronous reactance X_q	7.5.4
6.11	Low slip	Quadrature-axis synchronous reactance X_q	7.5.2
6.12	Sudden three-phase short-circuit	Direct-axis transient reactance X'_d	7.3.1
		Direct-axis sub-transient reactance X''_d	7.4.1
		Direct-axis transient short-circuit time constant τ'_d	7.16.1
		Direct-axis transient short-circuit time constant τ'_d	7.16.4
		Direct-axis sub-transient short-circuit time constant τ''_d	7.18

Table A.1 (continued)

Test		Quantity	
Clause	Description	Description	Clause
		Armature short-circuit time constant τ_a	7.24.1
6.13	Voltage recovery	Direct-axis transient reactance X'_d	7.3.2
		Direct-axis sub-transient reactance X''_d	7.4.2
		Direct-axis transient open-circuit time constant τ'_{do}	7.17.3
6.13	Voltage recovery	Direct-axis sub-transient open-circuit time constant τ''_{do}	7.19.1
6.14	Suddenly applied short circuit following disconnection	Unit acceleration time τ_J , stored energy constant H	6.12
6.15	DC decay in the armature winding at standstill, calculation from test values	Direct-axis transient reactance X'_d	7.3.3
		Quadrature-axis transient reactance X'_q	7.6.1
		Negative sequence reactance $X_{(2)}$	7.9.5
		Direct-axis transient short-circuit time constant τ'_d	7.16.3
		Direct-axis transient open-circuit time constant τ'_{do}	7.17.4
		Direct-axis sub-transient open-circuit time constant τ''_{do}	7.19.2
		Quadrature-axis transient short-circuit time constant τ'_q	7.20.2
		Quadrature-axis transient open-circuit time constant τ'_{qo}	7.21.1
		Quadrature-axis sub-transient short-circuit time constant τ''_q	7.22.2
		Frequency response characteristic	7.28.4
6.16	Suddenly applied excitation with open-circuited armature	Direct-axis transient open-circuit time constant τ'_{do}	7.17.5
6.17	Applied voltage test with rotor in direct and quadrature axis	Quadrature-axis sub-transient reactance X''_q	7.7.1
		Direct-axis sub-transient reactance X''_d	7.4.3
6.18	Applied voltage with the rotor in arbitrary position	Direct-axis sub-transient reactance X''_d	7.4.4
		Quadrature-axis sub-transient reactance X''_q	7.7.2
6.19	Single-phase voltage applied to the three phases	Zero-sequence reactance $X_{(0)}$	7.8.1
		Zero-sequence resistance $R_{(0)}$	7.12.1 (7.8.1)

Table A.1 (continued)

Test		Quantity	
Clause	Description	Description	Clause
6.20	Line-to-line sustained short-circuit	Negative-sequence reactance $X_{(2)}$	7.9.1
		Negative-sequence resistance $R_{(2)}$	7.14.1
6.21	Sudden line-to-line short-circuit	Negative-sequence reactance $X_{(2)}$	7.9.4
		Negative-sequence resistance $R_{(2)}$	
6.22	Line-to-line and to neutral sustained short-circuit	Zero-sequence reactance $X_{(0)}$	7.8.2
		Zero-sequence resistance $R_{(0)}$	7.12.2
6.23	Negative-phase sequence	Negative-sequence reactance $X_{(2)}$	7.9.2
		Negative-sequence resistance $R_{(2)}$	7.14.2
6.24.1	Field current decay, with the armature winding open-circuited, at rated speed	Direct-axis transient open-circuit time constant τ'_{do}	7.17.1
6.24.2	Field current decay, with the armature winding open-circuited at standstill	Direct-axis transient open-circuit time constant τ'_{do}	7.17.2
6.25	Field current decay at rated speed with armature winding short-circuited	Direct-axis transient short-circuit time constant τ'_d	7.16.2
6.26	Suddenly applied excitation with short-circuited armature	Direct-axis transient short-circuit time constant τ'_d	7.16.4
6.27	Field current decay at standstill with two phases of armature winding short-circuited	Direct-axis transient short-circuit time constant τ'_d	7.16.3
6.28	Applied voltage, rotor removed	Armature leakage reactance X_σ	7.10
6.29	No-load retardation	Acceleration time τ_J , stored energy constant H	7.25.2
6.30	Suspended rotor oscillation	Acceleration time τ_J , stored energy constant H	7.25.1
6.31	Locked rotor	Initial starting impedance of synchronous motors Z_{st}	7.31
6.32	Over-excitation at zero power-factor and variable armature voltage	Excitation current at rated armature short-circuit current i_{fk}	7.27.1
6.33	Asynchronous operation at reduced voltage	Frequency response characteristic	7.28.2
6.34	Applied variable frequency voltage at standstill	Frequency response characteristic	7.28.3

Annex B (informative)

Calculation scheme for frequency response characteristics

Basics

A function $f(t)$ obtained from tests is approximated by a sum of exponential functions. Let $f(t)$ a short circuit current function $i_k(t)$, consisting of n components characterized by an initial value i_{k0} and an exponent α_k :

$$i_k(t) = i_{k0} \cdot e^{\alpha_k t} ; \quad k=1 \dots n$$

In the functions considered here, α_k is real, and corresponds to the time constant $\tau_k = \frac{-1}{\alpha_k}$

The relevant Laplace-transform is: $i_k(p) = \frac{i_{k0}}{p + \alpha_k}$

Current time function and Laplace transform of the current become:

$$i(t) = \sum_{k=1}^n i_k(t) ; \quad \rightarrow \quad i(p) = \sum_{k=1}^n \frac{i_{k0}}{p + \alpha_k}$$

The current function may contain a constant component; in this case $\alpha_k=0$. The Laplace transform may be expressed as polynomial function in p .

Parameter calculation

Given the currents $i(t)$ and $i_r(t)$ obtained from the procedure described in 6.15 and 7.1.4, and their representation by exponential functions, the reactance and the transfer operators are calculated as follows:

$$\frac{1}{x_d(p)} = \frac{1}{x_d''} \frac{D_d(p)}{D_d'(p)} = \frac{1}{x_d''} \frac{(\alpha_{1d} + p)(\alpha_{2d} + p) \dots (\alpha_{nd} + p)}{(\alpha'_{1d} + p)(\alpha'_{2d} + p) \dots (\alpha'_{nd} + p)}$$

$$\frac{1}{x_q(p)} = \frac{1}{x_q''} \frac{D_q(p)}{D_q'(p)} = \frac{1}{x_q''} \frac{(\alpha_{1q} + p)(\alpha_{2q} + p) \dots (\alpha_{nq} + p)}{(\alpha'_{1q} + p)(\alpha'_{2q} + p) \dots (\alpha'_{nq} + p)}$$

$$G(p) = N \frac{A(p)}{D_d(p)} = N \frac{(\gamma_1 + p)(\gamma_2 + p) \dots (\gamma_{n-1} + p)}{(\alpha_{1d} + p)(\alpha_{2d} + p) \dots (\alpha_{nd} + p)}$$

The frequency response characteristics $\frac{1}{x_d(js)}$, $\frac{1}{x_q(js)}$, and $G(js)$ follow when setting $p=js$.

The parameters are obtained from calculating the roots of the characteristic equations $D_d(p) = 0$; $D_d'(p) = 0$; $D_q(p) = 0$; $D_q'(p) = 0$ and $A(p) = 0$. They may also be determined by using the amplitude of i_{k0} and the decrement factors of the exponentials λ_k of the current decay curves according to 7.1.4.

- Roots $-a_1, -a_2, \dots, -a_n$ of $D(p) = 0$ are roots of the equation $\sum_{k=1}^n \frac{i_k \lambda_k}{p + \lambda_k} = 0$
- Roots $-a'_1, -a'_2, \dots, -a'_n$ of $D'(p) = 0$ are roots of the equation $\sum_{k=1}^n \frac{i_k}{p + \lambda_k} = 0$
- Roots $-\gamma_1, -\gamma_2, \dots, -\gamma_{n-1}$ of $A(p) = 0$ are roots of the equation $\sum_{k=1}^n \frac{i_{kf}}{p + \lambda_{kf}} = 0$

Using known values of the roots of the characteristic equations, the frequency response characteristics are calculated:

$$\frac{1}{X_d(js)} = \frac{1}{X_d} + \sum_{k=1}^n \left[\frac{C_{kd}}{1 + \left(\frac{\alpha'_{kd}}{s} \right)^2} + j \frac{C_{kd} \frac{\alpha'_{kd}}{s}}{1 + \left(\frac{\alpha'_{kd}}{s} \right)^2} \right]$$

$$\frac{1}{X_q(js)} = \frac{1}{X_q} + \sum_{l=1}^m \left[\frac{C_{lq}}{1 + \left(\frac{\alpha'_{lq}}{s} \right)^2} + j \frac{C_{lq} \frac{\alpha'_{lq}}{s}}{1 + \left(\frac{\alpha'_{lq}}{s} \right)^2} \right]$$

$$G(js) = \sum_{k=1}^n \left[\frac{A_k \alpha_{kd}}{\alpha_{kd}^2 + s^2} - j \frac{A_k s}{\alpha_{kd}^2 + s^2} \right]$$

where

$$C_{kd} = \frac{1}{X_d''} \frac{(\alpha_{1d} - \alpha'_{kd})(\alpha_{2d} - \alpha'_{kd}) \dots (\alpha_{nd} - \alpha'_{kd})}{(\alpha_{1d} - \alpha'_{kd}) \dots (\alpha'_{k-1,d} - \alpha'_{kd}) \alpha'_{kd} (\alpha'_{k+1,d} - \alpha'_{kd}) \dots (\alpha'_{nd} - \alpha'_{kd})}$$

$$C_{lq} = \frac{1}{X_q''} \frac{(\alpha_{1q} - \alpha'_{lq})(\alpha_{2q} - \alpha'_{lq}) \dots (\alpha_{mq} - \alpha'_{lq})}{(\alpha'_{1q} - \alpha'_{lq}) \dots (\alpha'_{l-1,q} - \alpha'_{lq}) \alpha'_{lq} (\alpha'_{l+1,q} - \alpha'_{lq}) \dots (\alpha'_{mq} - \alpha'_{lq})}$$

$$A_k = N \frac{(\gamma_1 - \alpha_{kd})(\gamma_{n-1} - \alpha_{kd})}{(\alpha_{1d} - \alpha_{kd}) \dots (\alpha_{k-1,d} - \alpha_{kd})(\alpha_{k+1,d} - \alpha_{kd}) \dots (\alpha_{nd} - \alpha_{kd})} \quad \text{where } N = \frac{\alpha_{1d} \alpha_{1d} \dots \alpha_{nd}}{\gamma_1 \gamma_2 \dots \gamma_{n-1}} \frac{\sum_{k=1}^{n+1} \frac{i_{kf}}{\lambda_{kf}}}{i_{od}}$$

Note that

$$X_d = r \sum_{k=1}^{n+1} \frac{i_{kd}}{\lambda_{kd}}; \quad X_q = r \sum_{l=1}^{m+1} \frac{i_{lq}}{\lambda_{lq}}; \quad X_d'' = \frac{r}{\sum_{k=1}^{n+1} i_{kd} \lambda_{kd}}; \quad X_q'' = \frac{r}{\sum_{l=1}^{m+1} i_{lq} \lambda_{lq}}, \quad \text{where } r \text{ is from 7.28.4.}$$

Annex C (informative)

Conventional electrical machine model

On the basis of Park's equations, the machine may be represented by an equivalent circuit model in d,q-components. The model in Figure C.1 is for a salient pole machine, containing one amortisseur mesh in each axis; it allows for a magnetic leakage flux coupling of field and direct axis damper windings.

NOTE 1 The model in Figure C.1 is drawn in the motor reference system.

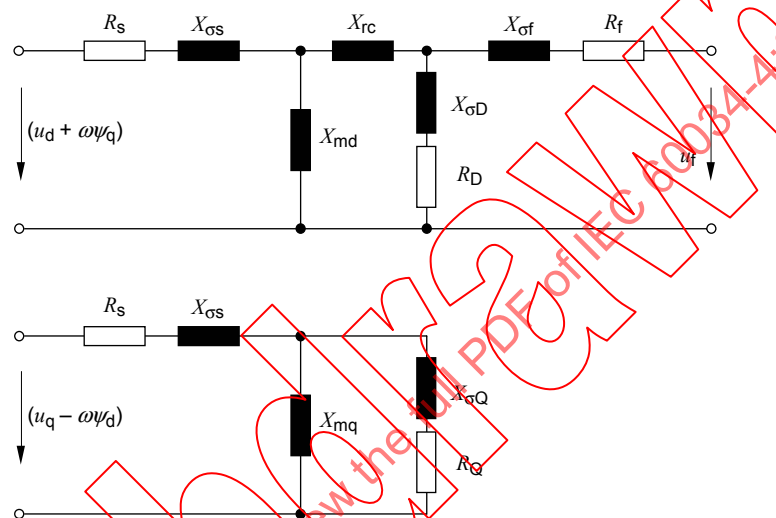


Figure C.1 – Equivalent circuit model of a salient pole machine

The definition of flux linkages is:

$$\begin{bmatrix} \omega\psi_d \\ \omega\psi_D \\ \omega\psi_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_d & X_{md} & X_{md} \\ X_{md} & X_D & X_{Df} \\ X_{md} & X_{Df} & X_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_D \\ i_f \end{bmatrix} ; \quad \begin{bmatrix} \omega\psi_Q \\ \omega\psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_q & X_{mq} \\ X_{mq} & X_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_Q \end{bmatrix}$$

where the reactance components are

$$\begin{aligned} X_d &= X_{md} + X_{\sigma s} & X_q &= X_{mq} + X_{\sigma s} \\ X_D &= X_{Df} + X_{\sigma D} = X_{md} + X_{rc} + X_{\sigma D} & X_Q &= X_{mq} + X_{\sigma Q} \\ X_f &= X_{Df} + X_{\sigma f} = X_{md} + X_{rc} + X_{\sigma f} \end{aligned}$$

NOTE 2 The coupling reactance value X_{rc} may be positive (as in turbogenerators) or negative (as in many salient-pole machines).

NOTE 3 Frequently, the machine model is simplified using $X_{rc} = 0$, resulting in larger errors of calculated rotor quantities.

Parameters obtained by the procedures described in this standard are expressed by the equivalent circuit parameters as follows:

– Reactances:

$$X'_d = X_d - \frac{X_{md}^2}{X_f} ; \quad X''_q = X_d - \frac{X_{mq}^2}{X_Q}$$

$$X''_d = X_d - \frac{X_{md}^2}{X_f} \frac{(X_f - X_{md})^2}{X_D X_f - X_{md}^2}$$

– Time constants:

$$\tau_a = \frac{1}{\omega R_s} \frac{2}{1/X'_d + 1/X''_q}$$

$$\tau_{kd0} = \frac{X_D}{\omega R_D} ; \quad \tau_{kd} = \frac{X_D - X_{md}^2 / X_d}{\omega R_D}$$

$$\tau'_{d0} = \frac{X_f}{\omega R_f} ; \quad \tau''_{d0} = \frac{X_D - X_{md}^2 / X_f}{\omega R_D} ;$$

$$\tau'_d = \frac{X'_d}{X_d} \tau'_{d0} ; \quad \tau''_d = \frac{X''_d}{X'_d} \tau''_{d0}$$

$$\tau''_{q0} = \frac{X_Q}{\omega R_Q}$$

$$\tau''_q = \frac{X''_q}{X'_q} \tau''_{q0}$$

NOTE 4 The circuit model in Figure C.1 provides no transient quadrature-axis quantities. Here, the corresponding order numbers (Annex A) are $n_d = 3$; $n_q = 2$.

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	81
1 Domaine d'application	83
2 Références normatives.....	83
3 Termes et définitions	83
4 Symboles et unités	88
5 Vue d'ensemble des essais	90
6 Méthodes d'essai.....	93
6.1 Généralités.....	93
6.1.1 Exigences relatives aux appareils de mesure	93
6.1.2 Exigences relatives au système d'excitation	93
6.1.3 Conditions d'essai	93
6.1.4 Grandeurs en valeurs réduites.....	94
6.1.5 Conventions et hypothèses.....	95
6.1.6 Examen de la saturation magnétique.....	95
6.2 Mesures directes du courant d'excitation à la charge assignée.....	97
6.3 Mesures de la résistance en courant continu d'un enroulement	97
6.4 Essai de saturation à vide	98
6.4.1 Méthode d'essai	98
6.4.2 Evaluation de la caractéristique de saturation à vide	99
6.5 Essai en court-circuit triphasé permanent.....	99
6.5.1 Méthode d'essai	99
6.5.2 Caractéristique en court-circuit triphasé permanent.....	100
6.6 Essai de moteur à vide	100
6.7 Essai à angle interne variable	100
6.8 Essai de surexcitation à facteur de puissance nul.....	101
6.9 Essai d'excitation négative	101
6.10 Essai en charge avec mesure de l'angle de charge	101
6.11 Essai à faible glissement.....	101
6.12 Essai de court-circuit triphasé brusque.....	102
6.13 Essai de rétablissement de la tension	103
6.14 Essai de court-circuit brusque après déconnexion de la ligne.....	103
6.15 Essai de décroissance d'un courant continu dans l'essai de l'enroulement d'induit à l'arrêt	104
6.16 Essai d'application brusque de l'excitation avec l'enroulement d'induit à circuit ouvert	105
6.17 Essai d'application de tension pour les positions longitudinale et transversale des pôles du rotor	105
6.18 Essai de tension appliquée avec le rotor en position arbitraire	106
6.19 Essai de tension monophasée appliquée aux trois phases	106
6.20 Essai de court-circuit permanent entre phases	106
6.21 Court-circuit brusque entre phases.....	107
6.22 Essai de court-circuit permanent entre phases et le neutre.....	108
6.23 Essai de rotation inverse	108
6.24 Essai de décroissance du courant d'excitation, avec l'enroulement d'induit en circuit ouvert.....	109
6.24.1 Essai à la vitesse assignée.....	109
6.24.2 Essai à l'arrêt	109

6.25	Essai de décroissance du courant d'excitation à la vitesse assignée avec l'enroulement d'induit court-circuité	109
6.26	Excitation appliquée de manière brusque avec l'enroulement d'induit court-circuité	109
6.27	Essai de décroissance du courant d'excitation à l'arrêt avec deux phases de l'enroulement d'induit court-circuitées	110
6.28	Essai de tension appliquée le rotor retiré étant enlevé.....	110
6.29	Essai de ralentissement à vide	111
6.30	Essai d'oscillation du rotor suspendu.....	111
6.31	Essai à rotor bloqué	111
6.32	Essai de surexcitation à facteur de puissance nul et à tension d'induit variable	112
6.33	Fonctionnement asynchrone pendant l'essai à basse tension.....	112
6.34	Essai d'application d'une fréquence variable à l'arrêt	113
7	Détermination des grandeurs.....	115
7.1	Méthodes graphiques et analyse des enregistrements oscillographiques.....	115
7.1.1	Courbes de saturation à vide et de court-circuit triphasé permanent.....	115
7.1.2	Essai de court-circuit triphasé brusque	115
7.1.3	Essai de rétablissement de la tension.....	118
7.1.4	Décroissance en courant continu dans l'enroulement d'induit à l'arrêt	118
7.1.5	Essai d'application brusque de l'excitation avec l'enroulement d'induit à circuit ouvert	120
7.2	Réactance synchrone longitudinale	121
7.2.1	A partir des valeurs de saturation à vide et de court-circuit triphasé permanent.....	121
7.2.2	A partir de l'essai de moteur à vide.....	121
7.2.3	A partir de l'essai d'angle interne variable	121
7.2.4	A partir de l'essai en charge avec mesure de l'angle de charge.....	122
7.3	Réactance transitoire longitudinale.....	122
7.3.1	A partir de l'essai de court-circuit triphasé brusque	122
7.3.2	A partir de l'essai de rétablissement de la tension	122
7.3.3	A partir de la décroissance en courant continu dans l'enroulement d'induit à l'arrêt	123
7.3.4	Calcul à partir des valeurs d'essai	123
7.4	Réactance subtransitoire longitudinale	123
7.4.1	A partir de l'essai de court-circuit triphasé brusque	123
7.4.2	A partir de l'essai de rétablissement de la tension	123
7.4.3	A partir de l'essai de tension appliquée avec rotor longitudinal et transversal	123
7.4.4	A partir de l'essai d'application de tension dans une position arbitraire du rotor	124
7.5	Réactance synchrone transversale	124
7.5.1	A partir de l'essai d'excitation négative.....	124
7.5.2	A partir de l'essai à faible glissement	125
7.5.3	A partir de l'essai d'angle interne variable	126
7.5.4	A partir de l'essai en charge avec mesure de l'angle de charge.....	126
7.6	Réactance transitoire transversale	127
7.6.1	A partir de la décroissance en courant continu dans l'enroulement d'induit à l'arrêt	127
7.6.2	Calcul à partir des valeurs d'essai	127
7.7	Réactance subtransitoire transversale.....	127

7.7.1	A partir de l'essai de tension appliquée avec rotor en position longitudinale ou transversale	127
7.7.2	A partir de l'essai d'application de tension dans une position arbitraire du rotor	128
7.8	Réactance homopolaire	128
7.8.1	A partir de l'application de tension monophasée aux trois phases.....	128
7.8.2	A partir de l'essai de court-circuit permanent entre phases et le neutre.....	128
7.9	Réactance inverse.....	129
7.9.1	A partir de l'essai de court-circuit permanent entre phases	129
7.9.2	A partir de l'essai de rotation inverse.....	129
7.9.3	Calcul à partir des valeurs d'essai	129
7.9.4	A partir de l'essai de court-circuit brusque entre phases	130
7.9.5	A partir de l'essai de décroissance en courant continu à l'arrêt.....	130
7.10	Réactance de fuite d'induit	130
7.11	Réactance de Potier.....	131
7.12	Résistance homopolaire	132
7.12.1	A partir de l'essai de tension monophasée appliquée aux trois phases	132
7.12.2	A partir de l'essai de court-circuit permanent entre phases et le neutre.....	132
7.13	Résistance de l'enroulement d'induit directe.....	132
7.14	Résistance inverse.....	132
7.14.1	A partir de l'essai de court-circuit permanent entre phases	132
7.14.2	A partir de l'essai de rotation inverse.....	133
7.15	Résistance de l'enroulement d'induit et de l'enroulement d'excitation	133
7.16	Constante de temps transitoire longitudinale en court-circuit.....	134
7.16.1	A partir de l'essai de court-circuit triphasé brusque	134
7.16.2	A partir de la décroissance du courant d'excitation à la vitesse assignée avec enroulement d'induit court-circuité.....	134
7.16.3	A partir de l'essai de décroissance en courant continu à l'arrêt.....	134
7.16.4	A partir de l'excitation appliquée de manière brusque l'induit étant court-circuité	134
7.16.5	A partir de la décroissance du courant d'excitation à l'arrêt, deux phases de l'enroulement d'induit étant court-circuitées	134
7.17	Constante de temps transitoire longitudinale à circuit ouvert	135
7.17.1	A partir de la décroissance du courant d'excitation à la vitesse assignée avec enroulement d'induit en circuit ouvert	135
7.17.2	A partir de la décroissance du courant d'excitation à l'arrêt avec enroulement d'induit en circuit ouvert	135
7.17.3	A partir de l'essai de rétablissement de la tension	135
7.17.4	A partir de la décroissance en courant continu à l'arrêt.....	135
7.17.5	A partir de l'excitation appliquée de manière brusque avec enroulement d'induit en circuit ouvert	135
7.18	Constante de temps subtransitoire longitudinale en court-circuit.....	135
7.19	Constante de temps subtransitoire longitudinale à circuit ouvert.....	135
7.19.1	A partir de l'essai de rétablissement de la tension	135
7.19.2	A partir de la décroissance en courant continu à l'arrêt.....	135
7.20	Constante de temps transitoire transversale en court-circuit.....	136
7.20.1	Calcul à partir des valeurs d'essai	136
7.20.2	A partir de la décroissance en courant continu à l'arrêt.....	136

7.21	Constante de temps transitoire transversale à circuit ouvert.....	136
7.21.1	A partir de la décroissance en courant continu à l'arrêt.....	136
7.22	Constante de temps subtransitoire transversale en court-circuit	136
7.22.1	Calcul à partir des valeurs d'essai	136
7.22.2	A partir de la décroissance en courant continu à l'arrêt.....	136
7.23	Constante de temps subtransitoire transversale à circuit ouvert	136
7.23.1	A partir de la décroissance en courant continu à l'arrêt.....	136
7.24	Constante de temps en court-circuit de l'induit	136
7.24.1	A partir du court-circuit triphasé brusque	136
7.24.2	Calcul à partir des valeurs d'essai	137
7.25	Valeur assignée des constantes de temps d'accélération et d'énergie cinétique réduite.....	137
7.25.1	A partir de l'essai d'oscillation du rotor suspendu	137
7.25.2	A partir de l'essai de ralentissement à vide.....	138
7.26	Courant assigné d'excitation	138
7.26.1	A partir de mesures directes	138
7.26.2	Diagramme de Potier.....	138
7.26.3	Diagramme ASA	140
7.26.4	Diagramme suédois.....	141
7.27	Courant d'excitation correspondant au courant d'induit assigné en court-circuit permanent.....	142
7.27.1	A partir de l'essai de surexcitation à facteur de puissance nul	142
7.27.2	A partir de l'essai de court-circuit triphasé permanent	142
7.28	Caractéristiques de réponse en fréquence.....	143
7.28.1	Généralités.....	143
7.28.2	A partir du fonctionnement asynchrone à tension réduite.....	143
7.28.3	A partir de l'essai d'application à l'arrêt d'une tension de fréquence variable	144
7.28.4	A partir de la décroissance en courant continu dans l'enroulement d'induit, la machine étant à l'arrêt.....	145
7.29	Rapport de court-circuit.....	146
7.30	Variation assignée de tension.....	146
7.30.1	A partir de mesures directes	146
7.30.2	A partir de la caractéristique de saturation à vide et du courant d'excitation connu à la charge assignée	146
7.31	Impédance de démarrage initiale des moteurs synchrones	146
Annexe A (informative)	Correspondances pour les essais.....	148
Annexe B (informative)	Système de calcul des caractéristiques de réponse en fréquence	151
Annexe C (informative)	Modèle conventionnel de machine électrique	153
Figure 1	– Schéma pour l'essai de décroissance du courant continu à l'arrêt.....	104
Figure 2	– Schéma de circuit pour l'essai de court-circuit entre phases	107
Figure 3	– Schéma de circuit pour l'essai de court-circuit permanent entre phases et le neutre	108
Figure 4	– Installation de la bobine exploratrice le rotor étant enlevé.....	110
Figure 5	– Puissance et courant en fonction du glissement (exemple).....	113
Figure 6	– Schéma pour l'essai d'application d'une fréquence variable à l'arrêt	113

Figure 7 – Grandeurs enregistrées au cours de l'essai d'application à l'arrêt d'une fréquence variable (exemple).....	114
Figure 8 – Courbes combinées de saturation et de court-circuit	115
Figure 9 – Composantes transitoire et subtransitoire du courant de court-circuit.....	116
Figure 10 – Détermination de la composante transitoire du courant de court-circuit	117
Figure 11 – Détermination graphique de la composante apériodique.....	117
Figure 12 – Composantes transitoire et subtransitoire de la tension de rétablissement	118
Figure 13 – Représentation graphique semi-logarithmique des courants décroissants	119
Figure 14 – Excitation appliquée de manière brusque avec enroulement d'induit en circuit ouvert.....	121
Figure 15 – F.é.m à vide et courant d'excitation pour glissement d'un pôle.....	125
Figure 16 – Enveloppe du courant à partir de l'essai à faible glissement.....	126
Figure 17 – Détermination de la réactance de Potier.....	131
Figure 18 – Diagramme de Potier	139
Figure 19 – Diagramme ASA.....	140
Figure 20 – Diagramme suédois	141
Figure 21 – Courant d'excitation à partir de l'essai de surexcitation à facteur de puissance nul.....	142
Figure 22 – Caractéristiques de réponse en fréquence à basses fréquences (exemple)	144
Figure C.1 – Modèle de circuit équivalent d'une machine à pôles saillants.....	153
Tableau 1 – Tableau des méthodes d'essai et des correspondances	91
Tableau A.1 – Correspondances pour les essais.....	148

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES –

**Partie 4: Méthodes pour la détermination, à partir d'essais,
des grandeurs des machines synchrones**

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

La Norme internationale CEI 60034-4 a été établie par le comité d'études 2 de la CEI: Machines tournantes.

Cette troisième édition annule et remplace la deuxième édition, publiée en 1985, et son amendement 1 (1995). Cette édition constitue une révision technique. Les principales modifications apportées par rapport à l'édition précédente sont énumérées ci-dessous:

- Les essais décrits dans le supplément A de la précédente édition ont été en partie retirés, du fait d'un manque de pertinence dans la pratique.
- Des dispositions ont été prises pour les essais sur des machines à excitation sans balais.
- Un tableau des méthodes d'essai indique les essais préférentiels, et des correspondances pour les essais sont fournies.
- La description du modèle de machine conventionnelle à deux axes à pôles saillants a été ajoutée dans une annexe.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
2/1488/FDIS	2/1495/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.

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

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

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

MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES –

Partie 4: Méthodes pour la détermination, à partir d'essais, des grandeurs des machines synchrones

1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 60034 est applicable aux machines synchrones triphasées dont la puissance assignée est supérieure ou égale à 1 kVA et dont la fréquence assignée est comprise entre 10 Hz au moins et 500 Hz au plus.

La plupart des méthodes sont destinées à être utilisées avec des machines ayant un enroulement d'excitation avec des bagues collectrices et des balais pour leur alimentation. Les machines synchrones sans balai d'excitation exigent un investissement particulier pour certains des essais. Pour les machines dont l'excitation est assurée par des aimants permanents, les essais décrits ont une applicabilité limitée et des précautions particulières doivent être prises contre une démagnétisation irréversible.

Les machines à champ axial et les machines synchrones de type particulier comme les machines de type magnéto et celles à flux transversal sont exclues.

Il ne convient pas d'interpréter la présente norme comme exigeant la réalisation d'un ou de tous les essais qu'elle décrit sur une machine quelconque. Les essais particuliers qui doivent être réalisés doivent faire l'objet d'un accord entre le constructeur et le client.

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 60034-1:2004, *Machines électriques tournantes – Partie 1: Caractéristiques assignées et caractéristiques de fonctionnement*

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

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

CEI 60051 (toutes les parties), *Appareils mesureurs électriques indicateurs analogiques à action directe et leurs accessoires*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions suivants s'appliquent.

3.1

impédance de démarrage initiale des moteurs synchrones

quotient de la tension appliquée à l'induit par le courant d'induit moyen permanent, la machine étant à l'arrêt

3.2

réactance synchrone longitudinale

quotient de la valeur, en régime établi, du terme fondamental de la composante de la tension d'induit produite par le flux longitudinal total dû au courant d'induit longitudinal, par la valeur du terme fondamental de ce courant, la machine tournant à sa vitesse assignée

[VEI 411-50-07]

3.3

réactance transitoire longitudinale

quotient de la valeur initiale d'une variation brusque du terme fondamental de la composante de la tension d'induit produite par le flux longitudinal total, par la valeur de la variation simultanée du terme fondamental de la composante du courant d'induit longitudinal, la machine tournant à sa vitesse assignée et les composantes à amortissement rapide pendant les premières périodes étant négligées

[VEI 411-50-09]

3.4

réactance subtransitoire longitudinale

quotient de la valeur initiale d'une variation brusque du terme fondamental de la composante de la tension d'induit, produite par le flux longitudinal total, par la valeur de la variation simultanée du terme fondamental de la composante du courant d'induit longitudinal, la machine tournant à sa vitesse assignée

[VEI 411-50-11]

3.5

réactance synchrone transversale

quotient de la valeur, en régime établi, du terme fondamental de la composante de la tension d'induit, produite par le flux transversal total dû au courant d'induit transversal, par la valeur du terme fondamental de ce courant, la machine tournant à sa vitesse assignée

[VEI 411-50-08]

3.6

réactance transitoire transversale

quotient de la valeur initiale d'une variation brusque du terme fondamental de la composante de la tension d'induit, produite par le flux transversal total, par la valeur de la variation simultanée du terme fondamental de la composante du courant d'induit transversal, la machine tournant à sa vitesse assignée et les composantes à amortissement rapide pendant les premières périodes étant négligées

[VEI 411-50-10]

3.7

réactance subtransitoire transversale

quotient de la valeur initiale d'une variation brusque du terme fondamental de la composante de la tension d'induit, produite par le flux transversal total, par la valeur de la variation simultanée du terme fondamental de la composante du courant d'induit transversal, la machine tournant à sa vitesse assignée

[VEI 411-50-12]

3.8**réactance directe**

quotient du terme fondamental de la composante réactive de la tension d'induit directe, due à la composante directe du courant d'induit sinusoïdal à fréquence assignée, par la valeur de ce courant, la machine tournant à sa vitesse assignée

[VEI 411-50-14]

3.9**réactance inverse**

quotient du terme fondamental de la composante réactive de la tension d'induit inverse, due à la composante inverse du courant d'induit sinusoïdal à fréquence assignée, par la valeur de ce courant, la machine tournant à sa vitesse assignée

[VEI 411-50-15]

3.10**réactance homopolaire**

quotient du terme fondamental de la composante réactive de la tension d'induit homopolaire, due à la présence du terme fondamental du courant d'induit homopolaire à fréquence assignée, par cette composante du courant, la machine tournant à sa vitesse assignée

[VEI 411-50-16]

3.11**réactance de Potier**

réactance, tenant compte de la fuite supplémentaire de l'enroulement d'excitation en charge dans la zone de fonctionnement en surexcitation, qui est utilisée à la place de la réactance de fuite d'induit pour déterminer l'excitation en charge par la méthode de Potier

[VEI 411-50-13]

3.12**réactance de fuite d'induit**

quotient de la composante réactive du terme fondamental de la tension d'induit due au flux de fuites de l'enroulement d'induit par le terme fondamental du courant d'induit, la machine tournant à sa vitesse assignée

3.13**résistance d'induit**

résistance mesurée en courant continu entre les bornes de l'enroulement d'induit, assignée à une certaine température d'enroulement exprimée comme valeur de phase

3.14**résistance de l'enroulement d'excitation**

résistance mesurée en courant continu entre les bornes de l'enroulement d'excitation, assignée à une certaine température d'enroulement

3.15**résistance directe**

quotient de la composante active de la tension d'induit directe correspondant aux pertes dans l'enroulement d'induit et aux pertes supplémentaires en charge, due à la composante directe du courant sinusoïdal d'induit par ce courant, la machine tournant à sa vitesse assignée

[VEI 411-50-18]

3.16**résistance inverse**

quotient du terme fondamental de la composante active de la tension d'induit inverse, due à la composante inverse du courant sinusoïdal d'induit à fréquence assignée, par la valeur de ce courant, la machine tournant à sa vitesse assignée

[VEI 411-50-19]

3.17

résistance homopolaire

quotient du terme fondamental de la composante active de la tension d'induit homopolaire, due au terme fondamental du courant d'induit homopolaire, à fréquence assignée, par la valeur de ce courant, la machine tournant à sa vitesse assignée

[VEI 411-50-20]

3.18

rapport de court-circuit

rapport du courant d'excitation pour la tension assignée d'induit à circuit ouvert au courant d'excitation pour le courant assigné d'induit en court-circuit symétrique permanent, la machine tournant dans les deux cas à sa vitesse assignée

[VEI 411-50-21, modifiée]

3.19

constante de temps transitoire longitudinale à circuit ouvert

temps nécessaire pour qu'à la suite d'une variation brusque des conditions de fonctionnement, la composante à amortissement lent de la tension de l'induit à circuit ouvert, due au flux longitudinal, décroisse jusqu'à $1/e$, c'est-à-dire 0,368 fois sa valeur initiale, la machine tournant à sa vitesse assignée

[VEI 411-48-27]

3.20

constante de temps transitoire longitudinale en court-circuit

temps nécessaire pour qu'à la suite d'une variation brusque des conditions de fonctionnement, la composante à amortissement lent du courant longitudinal dans l'induit en court-circuit décroisse jusqu'à $1/e$, c'est-à-dire 0,368 fois sa valeur initiale, la machine tournant à sa vitesse assignée

[VEI 411-48-28]

3.21

constante de temps subtransitoire longitudinale à circuit ouvert

temps nécessaire pour que la composante à amortissement rapide de la tension de l'induit à circuit ouvert, due au flux longitudinal, présente dans les toutes premières périodes qui suivent une variation brusque des conditions de fonctionnement, décroisse jusqu'à $1/e$, c'est-à-dire 0,368 fois sa valeur initiale, la machine tournant à sa vitesse assignée

[VEI 411-48-29]

3.22

constante de temps subtransitoire longitudinale en court-circuit

temps nécessaire pour que la composante à amortissement rapide du courant longitudinal dans l'induit en court-circuit, présente dans les toutes premières périodes qui suivent une variation brusque des conditions de fonctionnement, décroisse jusqu'à $1/e$, c'est-à-dire 0,368 fois sa valeur initiale, la machine tournant à sa vitesse assignée

[VEI 411-48-30]

3.23

constante de temps transitoire transversale à circuit ouvert

temps nécessaire pour qu'à la suite d'une variation brusque des conditions de fonctionnement, la composante à amortissement lent de la tension de l'induit à circuit ouvert, due au flux transversal, décroisse jusqu'à $1/e$, c'est-à-dire 0,368 fois sa valeur initiale, la machine tournant à sa vitesse assignée

[VEI 411-48-32]

3.24**constante de temps transitoire transversale en court-circuit**

temps nécessaire pour qu'à la suite d'une variation brusque des conditions de fonctionnement, la composante à amortissement lent du courant transversal dans l'induit en court-circuit décroisse jusqu'à $1/e$, c'est-à-dire 0,368 fois sa valeur initiale, la machine tournant à sa vitesse assignée

[VEI 411-48-33]

3.25**constante de temps subtransitoire transversale à circuit ouvert**

temps nécessaire pour qu'à la suite d'une variation brusque des conditions de fonctionnement, la composante à amortissement rapide de la tension de l'induit à circuit ouvert, due au flux transversal, décroisse jusqu'à $1/e$, c'est-à-dire 0,368 fois sa valeur initiale la machine tournant à sa vitesse assignée

[VEI 411-48-34]

3.26**constante de temps longitudinale à circuit ouvert du circuit amortisseur équivalent**

temps nécessaire pour que la composante de courant induite dans le circuit amortisseur équivalent décroisse jusqu'à $1/e \approx 0,368$ fois sa valeur initiale à la suite d'une variation brusque des conditions de fonctionnement avec l'enroulement d'induit en circuit ouvert, l'enroulement d'excitation étant aussi ouvert, la machine tournant à sa vitesse assignée

3.27**constante de temps longitudinale en court-circuit du circuit amortisseur équivalent**

temps nécessaire pour que la composante de courant induite dans le circuit amortisseur équivalent décroisse jusqu'à $1/e \approx 0,368$ fois sa valeur initiale à la suite d'une variation brusque des conditions de fonctionnement, l'induit en court-circuit, l'enroulement d'excitation étant ouvert, la machine tournant à sa vitesse assignée

3.28**constante de temps subtransitoire transversale en court-circuit**

temps nécessaire pour que la composante à amortissement rapide du courant transversal dans l'induit en court-circuit, présente dans les toutes premières périodes qui suivent un changement brusque des conditions de fonctionnement, décroisse jusqu'à $1/e$, c'est-à-dire 0,368 fois sa valeur initiale, la machine tournant à sa vitesse assignée

[VEI 411-48-35]

3.29**constante de temps du courant de court-circuit**

temps nécessaire pour qu'à la suite d'une variation brusque des conditions de fonctionnement, la composante continue présente dans le courant de court-circuit décroisse jusqu'à $1/e$, c'est-à-dire 0,368 fois sa valeur initiale, la machine tournant à sa vitesse assignée

[VEI 411-48-31]

3.30**temps d'accélération unitaire**

temps qui serait nécessaire pour amener les parties tournantes d'une machine du repos à la vitesse assignée sous l'action d'un couple d'accélération constant et égal au quotient de la puissance active assignée par la vitesse angulaire assignée

[VEI 411-48-15]

3.31**énergie cinétique réduite**

quotient de l'énergie cinétique accumulée dans le rotor lorsqu'il tourne à sa vitesse assignée par la puissance apparente assignée

3.32**courant d'excitation assigné**

courant circulant dans l'enroulement d'excitation lorsque la machine fonctionne aux valeurs assignées de tension, de courant, de facteur de puissance et de vitesse

3.33**courant d'excitation, correspondant au courant d'induit assigné en court-circuit**

courant dans l'enroulement d'excitation lorsque la machine fonctionne à sa vitesse assignée et avec le courant d'induit assigné établi, l'enroulement (primaire) d'induit étant court-circuité

3.34**variation assignée de tension**

variation de la tension aux bornes de la génératrice lorsque le fonctionnement au régime assigné est remplacé par une marche à vide avec l'induit court-circuité, la vitesse et le courant d'excitation restant inchangés

3.35**caractéristiques de réponse en fréquence**

ensemble de courbes caractéristiques ou d'expressions analytiques, donnant l'admittance complexe ou son inverse, l'impédance complexe (ou des composantes de l'une ou de l'autre) en fonction du glissement à la fréquence assignée d'alimentation sauf indication contraire

3.36**caractéristique de réponse en fréquence de la réactance longitudinale**

quotient complexe exprimé en fonction du glissement de la valeur complexe établie (vecteur) du terme fondamental de la composante de la tension d'induit produite par le courant d'induit longitudinal et le vecteur du terme fondamental de ce courant, la machine tournant à un glissement donné avec l'enroulement d'excitation court-circuité

NOTE Le terme pour la représentation complexe d'une grandeur sinusoïdale d'une seule fréquence est phaseur ou alternativement vecteur qui est le terme utilisé dans la présente norme.

3.37**caractéristique de réponse en fréquence de la réactance transversale**

quotient complexe exprimé en fonction du glissement du vecteur établi du terme fondamental de la composante de la tension d'induit produite par le flux transversal due au courant d'induit transversal et le vecteur du terme fondamental de ce courant, la machine tournant à un glissement donné avec l'enroulement d'excitation court-circuité

3.38**caractéristique de réponse en fréquence du coefficient d'excitation**

quotient complexe du vecteur établi de la tension d'induit, produite par le courant dans l'enroulement d'excitation à la fréquence $s \cdot f$, par la valeur complexe de la tension appliquée à l'enroulement d'excitation, la machine tournant à une vitesse assignée

NOTE Il existe plusieurs méthodes de déduction des caractéristiques de réponse en fréquence (3.36 à 3.38) (ou dans le cas de 3.36 et 3.37 leurs valeurs inverses), voir par exemple 7.28.2 à 7.28.4. Les caractéristiques peuvent être obtenues avec l'enroulement d'excitation fermé via une impédance spécifiée.

4 Symboles et unités

f	Fréquence
f_N	Fréquence assignée
$G(j\omega)$	Caractéristique de réponse en fréquence complexe du coefficient d'excitation
H	Energie cinétique réduite
I, i	Courant
I_N	Courant assigné
I_{fk}	Courant d'excitation, pour courant assigné de l'induit en court-circuit
I_{fN}	Courant assigné d'excitation

K_c	Rapport de court-circuit
$R_{(0)}$	Résistance homopolaire
$R_{(1)}$	Résistance de l'enroulement d'induit directe
$R_{(2)}$	Résistance inverse
R_a	Résistance d'induit en courant continu
R_f	Résistance en courant continu d'enroulement d'excitation
s	Glissement
S_N	Puissance apparente assignée
U, u	Tension
U_N	Tension assignée
$X_{(0)}$	Réactance homopolaire
$X_{(1)}$	Réactance directe
$X_{(2)}$	Réactance inverse
X_d	Réactance synchrone longitudinale
X'_d	Réactance transitoire longitudinale
X''_d	Réactance subtransitoire longitudinale
X_p	Réactance de Potier
X_q	Réactance synchrone transversale
X'_q	Réactance transitoire transversale
X''_q	Réactance subtransitoire transversale
X_σ	Réactance de fuite d'induit
$X_d(j\omega)$	Caractéristique de réponse en fréquence complexe de la réactance longitudinale
$X_q(j\omega)$	Caractéristique de réponse en fréquence complexe de la réactance transversale
Z	Impédance
Z_N	Impédance assignée
ΔU_N	Variation assignée de tension
δ	Angle de charge
τ_a	Constante de temps de l'induit en court-circuit
τ_{kd}	Constante de temps longitudinale en court-circuit du circuit amortisseur équivalent
τ_{kdo}	Constante de temps longitudinale à circuit ouvert du circuit amortisseur équivalent
τ'_d	Constante de temps transitoire longitudinale en court-circuit
τ'_{do}	Constante de temps transitoire longitudinale à circuit ouvert
τ'_q	Constante de temps transitoire transversale en court-circuit
τ'_{qo}	Constante de temps transitoire transversale à circuit ouvert
τ''_d	Constante de temps subtransitoire longitudinale en court-circuit
τ''_{do}	Constante de temps subtransitoire longitudinale à circuit ouvert
τ''_q	Constante de temps subtransitoire transversale en court-circuit
τ''_{qo}	Constante de temps subtransitoire transversale à circuit ouvert
τ_j	Temps d'accélération

5 Vue d'ensemble des essais

Le Tableau 1 est un tableau de correspondances des essais pour déterminer les grandeurs des machines synchrones et il indique les méthodes préférentielles.

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60034-4:2008

Withd2Wm

Tableau 1 – Tableau des méthodes d'essai et des correspondances

Grandeur	Article	Description de l'essai	Essai	Préférence/ incertitude
Réactances				
Réactance synchrone longitudinale X_d	7.2.1	Saturation à vide, court-circuit triphasé permanent	6.4 et 6.5	Préférentiel (non saturé)
	7.2.2	Moteur à vide	6.6	Préférentiel (saturé)
	7.2.3	Angle interne variable	6.7	
	7.2.4	Mesure en charge de l'angle de charge	6.10	
Réactance transitoire longitudinale X'_d	7.3.1	Court-circuit triphasé brusque	6.12	Préférentiel
	7.3.2	Reprise de tension	6.13	
	7.3.3	Décroissance c.c dans l'enroulement d'induit à l'arrêt	6.15	
	7.3.4	Calcul à partir des valeurs d'essai	-	
Réactance subtransitoire longitudinale X''_d	7.4.1	Court-circuit triphasé brusque	6.12	Préférentiel
	7.4.2	Reprise de tension	6.13	
	7.4.3	Essai de tension appliquée avec rotor longitudinal et transversal	6.17	
	7.4.4	Tension appliquée avec le rotor en position arbitraire	6.18	
Réactance synchrone transversale X_q	7.5.1	Excitation négative	6.9	Préférentiel (non saturé)
	7.5.2	Glissement lent	6.11	
	7.5.3	Angle interne variable	6.7	
	7.5.4	Mesure en charge de l'angle de charge	6.10	
Réactance transitoire transversale X'_q	7.6.1	Essai de décroissance en c.c à l'arrêt	6.15	
	7.6.2	Calcul à partir des valeurs d'essai	-	
Réactance subtransitoire transversale X''_q	7.7.1	Essai de tension appliquée avec rotor longitudinal et transversal	6.17	Préférentiel
	7.7.2	Tension appliquée avec le rotor en position arbitraire	6.18	
Réactance homopolaire $X_{(0)}$	7.8.1	Application de tension monophasée aux trois phases	6.19	Préférentiel
	7.8.2	Court-circuit permanent entre phases et le neutre	6.22	
Réactance inverse $X_{(2)}$	7.9.1	Court-circuit permanent entre phases	6.20	Préférentiel
	7.9.2	Séquence de phase négative	6.23	
	7.9.3	Calcul à partir des valeurs d'essai	-	
	7.9.4	Court-circuit brusque entre phases	6.21	
	7.9.5	Décroissance c.c dans l'enroulement d'induit à l'arrêt	6.15	
Réactance de fuite d'induit X_σ	7.10	Rotor retiré	6.28	
Réactance de Potier X_p	7.11	Saturation à vide, court-circuit triphasé permanent (surexcitation)	6.4 et 6.5	
Résistances				
Résistance homopolaire $R_{(0)}$	7.12.1	Application de tension monophasée aux trois phases	6.19	Préférentiel
	7.12.2	Court-circuit permanent entre phases et le neutre	6.22	
Résistance de l'enroulement d'induit directe $R_{(1)}$	7.13	Calcul à partir des valeurs d'essai	-	
Résistance inverse $R_{(2)}$	7.14.1	Court-circuit permanent entre phases	6.20	Préférentiel
	7.14.2	Séquence de phase négative	6.23	
Résistance d'induit R_a	7.15	Ampèremètre-voltmètre ou pont	6.3	
Résistance d'enroulement d'excitation R_f	7.15	Ampèremètre-voltmètre ou pont	6.3	

Tableau 1 (suite)

Grandeur	Article	Description de l'essai	Essai	Préférence/ incertitude
Constantes de temps				
Constante de temps transitoire longitudinale en court-circuit τ'_d	7.16.1	Court-circuit triphasé brusque	6.12	Préférentiel
	7.16.2	Décroissance du courant d'excitation à la vitesse assignée avec enroulement d'induit court-circuité	6.25	
	7.16.3	Décroissance c.c dans l'enroulement d'induit à l'arrêt	6.15	
	7.16.4	Excitation appliquée de manière brusque avec induit court-circuité	6.26	
	7.16.5	Décroissance du courant d'excitation à l'arrêt avec deux phases de l'enroulement d'induit court-circuitées	6.27	
Constante de temps transitoire longitudinale à vide τ'_{do}	7.17.1	Décroissance du courant d'excitation à la vitesse assignée avec l'enroulement d'induit court-circuité	6.24.1	Préférentiel
	7.17.2	Décroissance du courant d'excitation à l'arrêt avec l'enroulement d'induit court-circuité	6.24.2	
	7.17.3	Reprise de tension	6.13	
	7.17.4	Décroissance c.c dans l'enroulement d'induit à l'arrêt	6.15	
	7.17.5	Excitation appliquée de manière brusque avec induit en circuit ouvert	6.16	
Constante de temps subtransitoire longitudinale en court-circuit τ''_d	7.18	Court-circuit triphasé brusque	6.12	
Constante de temps subtransitoire longitudinale en circuit ouvert τ''_{do}	7.19.1	Reprise de tension	6.13	Préférentiel
	7.19.2	Décroissance c.c dans l'enroulement d'induit à l'arrêt	6.15	
Constante de temps transitoire transversale en court-circuit τ'_q	7.20.1	Calcul à partir des valeurs d'essai	-	Préférentiel
	7.20.2	Décroissance en courant continu dans l'enroulement d'induit à l'arrêt	6.15	
Constante de temps transitoire transversale en circuit ouvert τ'_{qo}	7.21.1	Décroissance c.c dans l'enroulement d'induit à l'arrêt	6.15	
Constante de temps subtransitoire transversale en court-circuit τ''_q	7.22.1	Calcul à partir des valeurs d'essai	-	Préférentiel
	7.22.2	Décroissance c.c dans l'enroulement d'induit à l'arrêt	6.15	
Constante de temps subtransitoire transversale en circuit ouvert τ''_{qo}	7.23.1	Décroissance c.c dans l'enroulement d'induit à l'arrêt	6.15	
Constante de temps en court-circuit de l'induit τ_a	7.24.1	Court-circuit triphasé brusque	6.12	Préférentiel
	7.24.2	Calcul à partir des valeurs d'essai	-	
Autres grandeurs				
Temps d'accélération τ_j , constante d'énergie cinétique H	7.25.1	Oscillation du rotor suspendu	6.30	-
	7.25.2	Ralentissement à vide	6.29	
Courant assigné d'excitation i_{fN}	7.26.1	Mesure directe	6.2	Préférentiel
	7.26.2	Diagramme de Potier	-	
	7.26.3	Diagramme ASA	-	
	7.26.4	Diagramme suédois	-	

Tableau 1 (suite)

Grandeur	Article	Description de l'essai	Essai	Préférence/ incertitude
Courant d'excitation, re: courant d'induit assigné en court-circuit i_{fk}	7.27.1	Surexcitation à facteur de puissance nul et à tension d'induit (primaire) variable	6.32	Préférentiel
	7.27.2	Essai en court-circuit triphasé permanent	6.5	
Caractéristiques de réponse en fréquence	7.28.2	Fonctionnement asynchrone à tension réduite	6.33	Préférentiel
	7.28.3	Application à l'arrêt d'une fréquence variable	6.34	
	7.28.4	Décroissance c.c dans l'enroulement d'induit à l'arrêt	6.15	
Rapport de court-circuit K_c	7.29	Saturation à vide, court-circuit triphasé permanent (surexcitation)	6.4 6.5	
Variation assignée de tension ΔU_N	7.30.1	Mesure directe	6.2	Préférentiel
	7.30.2	Par diagramme à partir de la caractéristique de saturation à vide et du courant connu i_N	6.4.2	
Impédance de démarrage initiale des moteurs synchrones Z_{st}	7.31	Rotor bloqué	6.31	

6 Méthodes d'essai

6.1 Généralités

6.1.1 Exigences relatives aux appareils de mesure

Les appareils de mesure et leurs accessoires tels que les transformateurs de mesure, les shunts et les ponts utilisés au cours des essais doivent, sauf indication contraire, appartenir à une classe de précision d'au moins 0,5 selon la CEI 60051. Les appareils de mesure utilisés pour la détermination des résistances en courant continu doivent appartenir à une classe de précision d'au moins 0,2.

Il convient de choisir la classe de précision des oscilloscopes de mesure et des autres appareils enregistreurs en tenant compte des caractéristiques assignées de la machine soumise aux essais.

La vitesse de rotation peut être déterminée au moyen d'une méthode stroboscopique, ou au moyen de tachymètres (mécaniques ou électriques) ou au moyen d'un fréquencemètre, lorsque la machine tourne en synchronisation avec une autre machine, soit tourne par ses propres moyens.

6.1.2 Exigences relatives au système d'excitation

Dans le cas d'une machine synchrone équipée d'une excitatrice sans balais, l'enroulement d'excitation est connecté via un convertisseur rotatif, le plus souvent une diode de redressement, à l'enroulement d'induit de l'excitatrice sans bagues collectrices. Il en résulte que certains essais qui exigent soit la mesure du courant d'excitation alimentant l'enroulement d'excitation à partir d'une source individuelle, soit sa mise en court-circuit ne peuvent pas être réalisés sans montage spécial (par exemple, en montant des bagues temporaires sur l'arbre).

6.1.3 Conditions d'essai

Les essais de détermination des grandeurs des machines synchrones doivent être réalisés sur une machine complète avec tous les appareils de réglage automatique hors circuit sauf exigence contraire spécifique dans la méthode d'essai. Les appareils qui n'ont aucune influence sur les valeurs des paramètres n'ont pas à être installés.

Sauf indication contraire, les essais doivent être réalisés à la vitesse assignée de rotation.

NOTE Les méthodes d'essai avec le rotor à l'arrêt peuvent donner des résultats différents de ceux obtenus sur des machines en rotation, par exemple lorsque les grandeurs du circuit amortisseur dépendent des forces centrifuges.

Les températures des enroulements sont mesurées:

- lorsque les grandeurs à déterminer par l'essai dépendent de la température, ou
- lorsque des considérations de sécurité exigent la surveillance de la température au cours des essais.

Lorsqu'il existe un risque que les températures dépassent de manière transitoire les valeurs sûres, il est recommandé que les essais soient entrepris seulement après que la machine a fonctionné à vide avec son refroidissement normal ou a été à l'arrêt pendant un temps suffisant pour assurer une faible température de démarrage et il convient de surveiller ou de prédéterminer les températures de manière à ce que l'essai puisse être suspendu avant que la température ne devienne excessive.

Au cours de l'essai, il convient que le mode de connexion de l'enroulement de la machine soit le même qu'en utilisation normale.

La détermination de toutes les grandeurs est réalisée avec une connexion en étoile de l'enroulement d'induit (sauf si des connexions spéciales comme en triangle ouvert sont spécifiées). Si l'enroulement d'induit est réellement connecté en étoile, les valeurs des grandeurs obtenues conformément à la présente norme doivent correspondre à un enroulement équivalent connecté en étoile.

6.1.4 Grandeurs en valeurs réduites

Toutes les équations sont données soit en valeurs physiques en utilisant les unités du Système International soit en valeurs réduites par rapport à des valeurs de base spécifiées. Généralement, ces valeurs de base sont la tension assignée (U_N) et la puissance assignée apparente (S_N), avec le courant de base dérivé:

$$I_N = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_N}$$

et l'impédance de base:

$$Z_N = \frac{U_N^2}{S_N} = \frac{S_N}{3I_N^2}$$

Les calculs intermédiaires peuvent être réalisés sur les valeurs physiques avec conversion ultérieure de la grandeur en valeur réduite. Il est recommandé d'exprimer le temps en secondes. Dans les calculs des caractéristiques et pour l'établissement des diagrammes, le courant d'excitation correspondant à la tension assignée sur la caractéristique à vide est pris comme valeur de base du courant d'excitation. Lors de l'établissement des diagrammes et des caractéristiques, les courants et les tensions peuvent être exprimés par des valeurs physiques.

Si une machine possède plusieurs valeurs assignées, celles qui sont choisies comme valeurs de base doivent être indiquées.

Sauf indication contraire, le système mentionné ci-dessus est accepté dans la présente norme. Les lettres minuscules désignent les grandeurs exprimées en valeurs réduites et les lettres majuscules désignent les grandeurs physiques.

Dans les formules données dans la présente norme pour déterminer les réactances synchrones, la résistance directe de l'induit est, sauf indication contraire, considérée comme

étant négligeable. Lorsque la résistance directe de l'induit est supérieure à 0,2 fois la réactance mesurée, les formules doivent être considérées comme approchées.

6.1.5 Conventions et hypothèses

Les définitions de la plupart des grandeurs et de leurs méthodes expérimentales de détermination, telles qu'elles figurent dans la présente norme, reposent sur la théorie largement acceptée des deux axes des machines synchrones comportant la représentation approximative de tous les circuits qui s'ajoutent à l'enroulement d'excitation et aux circuits fixes qui s'y rapportent au moyen de deux circuits équivalents, un le long de l'axe longitudinal et un le long de l'axe transversal en négligeant les résistances de l'induit ou en en tenant compte seulement d'une manière approximative.

Il résulte de cette représentation approximative d'une machine que dans la présente norme trois réactances (synchrone, transitoire et subtransitoire) et deux constantes de temps (transitoire et subtransitoire) interviennent pour l'étude des phénomènes transitoires dans l'axe longitudinal, deux réactances (synchrone et subtransitoire) et une constante de temps (subtransitoire) dans l'axe transversal et la constante de temps en court-circuit de l'induit.

Ces constantes de temps sont fondées sur l'hypothèse d'une décroissance exponentielle des composantes des grandeurs impliquées (courants, tensions, etc.). Si le tracé des composantes mesurées ne décroît pas selon une exponentielle pure, comme par exemple dans le cas d'une machine à rotor massif, il convient que la constante de temps soit normalement interprétée comme le temps nécessaire pour que la composante tombe à $1/e \approx 0,368$ fois sa valeur initiale. Les courbes de décroissance exponentielle correspondant à ces constantes de temps doivent être considérées comme des courbes équivalentes qui remplacent les courbes résultant des mesures effectives.

NOTE 1 Dans la plupart des cas, la représentation conventionnelle au moyen de trois réactances et de deux constantes de temps ne permet pas de décrire de manière suffisamment précise la machine et il convient d'ajouter au modèle des paramètres d'ordre supérieur. Ceci s'applique aux machines de type turbo où le modèle peut être modifié par les paramètres X_d''', τ_d''' . Ils peuvent être déterminés selon les spécifications données dans le présent document (voir Annexe B).

NOTE 2 Le présent document fournit des méthodes de détermination des paramètres transitoires transversaux $X_q', \tau_q', \tau_{qo}'$ (voir 6.15), bien qu'ils soient rarement pris en compte dans les calculs conventionnels lorsqu'on suppose que $X_q' = X_q$.

6.1.6 Examen de la saturation magnétique

Les grandeurs des machines synchrones varient avec la saturation des circuits magnétiques. Dans les calculs pratiques, on utilise aussi bien les valeurs saturées que non saturées.

Dans la présente norme, sauf indication contraire, la "valeur saturée" des réactances et des résistances sera comprise comme la tension assignée (d'induit) de la grandeur et la "valeur non saturée" comme la valeur pour le courant assigné (induit) exception faite des réactances synchrones, dont les valeurs non saturées seront prises comme les valeurs basse tension des grandeurs et les valeurs saturées comme les valeurs de tension assignée de la machine en charge. Les valeurs saturées des grandeurs dépendront du mode de fonctionnement.

La valeur d'une telle grandeur à la tension assignée (induit) (à l'exception de la réactance synchrone) correspond à l'état magnétique de la machine au moment du court-circuit brusque de l'enroulement d'induit à partir des conditions de fonctionnement à vide sous tension assignée, la machine tournant à sa vitesse assignée.

La valeur du courant assigné (induit) pour une grandeur correspond à un état dans lequel la valeur de l'onde fondamentale alternative de la composante du courant d'induit qui détermine cette grandeur particulière est égale au courant assigné.

Les essais de saturation à vide et en court-circuit triphasé permanent sont généralement utilisés pour les valeurs non saturées de X_d . Les essais de moteur à vide et avec angle interne variable permettent de déterminer les valeurs non saturées et saturées de X_d . Mais les grandeurs saturées déterminées par ces essais ne peuvent pas être rapportées au mode spécifique de fonctionnement de la machine et elles peuvent seulement être utilisées pour comparer les valeurs obtenues pour différentes machines par les mêmes essais.

Les essais d'excitation négative et de glissement lent sont utilisés pour les valeurs non saturées. L'essai avec angle interne variable permet de déterminer les valeurs non saturées et saturées de X_q .

La méthode préférentielle est celle du court-circuit triphasé brusque. Elle permet de déterminer les valeurs saturées et non saturées de X'_d .

Si la méthode par calcul est utilisée, les valeurs de τ'_{d0} et de τ'_d obtenues à partir des essais de décroissance du courant d'excitation à la vitesse assignée (6.24 et 6.25) sont les valeurs préférentielles.

L'essai de court-circuit triphasé brusque ainsi que l'essai de décroissance du courant d'excitation à la vitesse assignée (pour déterminer τ'_{d0} et τ'_d) peuvent être réalisés sur une machine sans balais si celle-ci est excitée par sa propre excitatrice ou une excitatrice extérieure via des bagues collectrices temporaires montées sur le rotor, l'excitatrice étant excitée séparément. L'essai de rétablissement de la tension peut être réalisé sans bagues collectrices si la machine est excitée par sa propre excitatrice, celle-ci étant excitée séparément. Sinon, la valeur de X'_d dans une machine sans balais est déterminée par calcul à partir des valeurs d'essai de τ'_{d0} et τ'_d obtenues avec les essais de décroissance du courant d'excitation à l'arrêt avec l'enroulement d'induit en circuit ouvert (constante de temps τ'_{d0} , voir 6.24) et avec deux phases de l'enroulement d'induit court-circuitées (constante de temps τ'_d , voir 6.27).

La méthode préférentielle est celle du court-circuit triphasé brusque. Elle permet de déterminer les valeurs saturées et non saturées de X''_d .

Les méthodes d'application de la tension sont pratiquement équivalentes et peuvent être utilisées pour la valeur non saturée de X''_d et de X''_q , mais elles ne sont généralement pas applicables pour la valeur saturée à cause des intensités élevées nécessaires et de l'échauffement possible des enroulements et des pièces massives.

Si un essai de court-circuit brusque est réalisé pour déterminer X'_d , il convient que τ'_d soit déterminée à partir du même essai. Dans tous les autres cas, la préférence est donnée à la méthode de décroissance du courant d'excitation à vitesse assignée avec l'enroulement d'induit court-circuité.

Si la constante de temps τ_a est inférieure à une période fondamentale, sa valeur est déterminée à partir de la décroissance de la composante apériodique (en courant continu) du courant dans l'enroulement d'induit; si τ_a dépasse une période, la méthode de mesure de la décroissance de la composante périodique dans le courant de l'enroulement d'excitation est la méthode préférentielle.

NOTE Pour les compensateurs synchrones, la puissance active assignée (sortie) est remplacée par la puissance apparente assignée.

Toutes les méthodes mentionnées ci-dessus sont pratiquement équivalentes. L'application de l'une ou l'autre de ces méthodes dépend de la conception et de la puissance apparente de la machine en essai.

6.2 Mesures directes du courant d'excitation à la charge assignée

I_{fN} est le courant de l'enroulement d'excitation lorsque la machine fonctionne aux valeurs assignées de tension, de courant, de facteur de puissance et de vitesse.

Les méthodes graphiques sont utilisées lorsqu'une charge de facteur de puissance nul est appliquée à la machine en essai. Lors de la détermination du courant assigné d'excitation par la mesure directe pendant un fonctionnement en conditions assignées, il convient que la machine en essai soit excitée par son propre système de commande automatique car lorsque la machine est excitée par le système automatique, le courant d'excitation peut être différent de celui qui existe lorsque la machine est excitée par une source extérieure (en particulier pour les machines à système d'excitation statique).

NOTE Pour les machines sans balais, les mesures directes du courant d'excitation peuvent être réalisées avec des bagues collectrices temporaires.

6.3 Mesures de la résistance en courant continu d'un enroulement

Toute source de courant continu (batterie, génératrice, etc.) ayant la puissance exigée et fournissant une tension stable peut être utilisée pour la mesure de la résistance en courant continu par la méthode du voltmètre et de l'ampèremètre (méthode recommandée) ou par la méthode du pont.

La résistance doit être mesurée directement aux bornes de l'enroulement, le rotor étant à l'arrêt.

La méthode du pont unique n'est pas admissible pour mesurer des résistances inférieures à 1 Ω .

La résistance de l'enroulement d'induit doit être mesurée pour chaque phase séparément. Si, pour une raison quelconque, la résistance de phase ne peut pas être mesurée directement, les mesures doivent être réalisées entre chaque paire de bornes de l'enroulement d'induit.

Lorsqu'on mesure la résistance en courant continu de l'induit ou de l'enroulement d'excitation:

- par la méthode du pont, il est nécessaire de faire trois lectures, à chaque fois en perturbant l'équilibre du pont. Il convient que la résistance soit mesurée sur les bagues collectrices ou sur les bornes de l'enroulement de manière à ce que la résistance des balais et de leurs contacts ne soit pas incluse;
- par la méthode du voltmètre et de l'ampèremètre, il est recommandé de prendre trois à cinq lectures à différentes valeurs permanentes du courant.

Il convient que l'intensité du courant au cours des mesures de la résistance en courant continu soit telle que l'échauffement supposé adiabatique de l'enroulement pendant l'essai ne dépasse pas 1 K. Pour calculer l'échauffement adiabatique, on utilisera la formule:

$$\Delta\theta = \frac{j^2}{c} \text{ K/s}$$

où:

j est la densité du courant pendant l'essai, en ampères par mm^2 ;

c est une constante égale à 200 pour le cuivre et 86 pour l'aluminium.

Si l'échauffement de l'enroulement n'est pas connu, il convient que le courant ne dépasse pas 0,1 du courant assigné de l'enroulement et il convient qu'il ne soit pas appliqué pendant plus d'1 min.

Il convient que le temps de mesure soit tel que lorsqu'au moment des lectures sur les instruments, celles-ci soient stables, c'est-à-dire que les phénomènes transitoires aient disparu aussi bien dans les appareils eux-mêmes que dans les circuits dont les résistances sont mesurées.

Il convient que la température de l'enroulement au cours de l'essai soit déterminée au moyen de détecteurs thermiques incorporés ou le cas échéant, intégrés.

Il convient que les thermomètres et les thermocouples utilisés pour mesurer la température de l'enroulement soient en place depuis au moins 15 min et qu'ils soient protégés contre toute influence extérieure.

Il convient d'enregistrer les numéros d'identification des appareils de mesure afin d'utiliser les mêmes appareils lors de l'essai d'échauffement.

6.4 Essai de saturation à vide

6.4.1 Méthode d'essai

L'essai de saturation à vide est effectué soit:

- a) en entraînant la machine d'essai comme une génératrice au moyen d'un moteur approprié; ou
- b) en faisant tourner la machine en essai comme un moteur à vide au moyen d'une source de tension triphasée symétrique (pour la symétrie de la tension, voir le 7.2 de la CEI 60034-1:2004); ou
- c) pendant le ralentissement de la machine en essai.

Lors de l'essai à vide, il convient de faire varier l'excitation par échelons progressifs en allant des tensions les plus élevées vers les tensions les plus basses et en utilisant des points répartis de manière uniforme; si possible, il convient de commencer à la tension qui correspond à l'excitation à la charge assignée mais au minimum à 1,3 fois la tension assignée de la machine en essai jusqu'à 0,2 fois cette tension assignée sauf si la tension résiduelle est plus élevée.

Mesurer la tension résiduelle de la génératrice lorsque le courant d'excitation est abaissé à zéro.

Il est préférable de conduire l'essai a) avec un moteur approprié étalonné en courant continu, dans la mesure où cela permet également de déterminer les pertes à vide au cours de l'essai.

Lorsqu'on utilise l'essai b), il est aussi nécessaire de mesurer le courant d'induit. A chaque échelon de tension, il faut enregistrer les valeurs lues pour un courant d'induit minimal qui correspond au facteur de puissance égale à l'unité.

Lorsqu'on utilise l'essai c), il convient que le taux de décélération ne dépasse pas 0,04 fois la vitesse assignée par seconde. Toutefois, lorsque la machine en essai a un taux de décélération supérieur à 0,02 fois la vitesse assignée par seconde, son excitation doit être fournie par une source séparée de manière à maintenir une excitation stable pendant l'essai. Avant de séparer la machine du réseau, celle-ci est excitée à la valeur la plus élevée exigée mais au minimum à 1,3 fois sa tension assignée. L'excitation est réduite par échelons et, à chaque échelon, des lectures de la vitesse (fréquence) sont faites simultanément, le courant d'excitation restant constant. L'essai de ralentissement doit être répété pour obtenir tous les échelons exigés.

Enregistrer simultanément:

- le courant d'excitation;

- la tension en ligne;
- la fréquence (ou vitesse);
- pour l'essai b), le courant d'induit minimal qui correspond au facteur de puissance égal à l'unité;
- pour l'essai c), la tension d'induit.

6.4.2 Evaluation de la caractéristique de saturation à vide

Tracer la tension aux bornes de l'enroulement d'induit à circuit ouvert (ordonnée) par rapport au courant d'excitation (abscisse) à la vitesse (fréquence) assignée comme indiqué à la Figure 8. Si, en raison d'une tension résiduelle élevée, la caractéristique à vide coupe l'axe au-dessus de l'origine, une correction doit être apportée. A cet effet, la partie rectiligne de la courbe à vide qui est généralement appelée ligne d'entrefer est prolongée jusqu'au point d'intersection avec l'axe des abscisses. La longueur de l'axe des abscisses limitée par ce prolongement de la courbe représente la valeur de la correction qu'il faut ajouter à toutes les valeurs mesurées du courant d'excitation.

Si la fréquence pendant l'essai est différente de la valeur assignée, toutes les valeurs de tension mesurées doivent être rapportées à la fréquence assignée.

6.5 Essai en court-circuit triphasé permanent

6.5.1 Méthode d'essai

L'essai en court-circuit triphasé permanent est effectué:

- a) en entraînant la machine d'essai comme une génératrice au moyen d'un moteur approprié; ou
- b) par un ralentissement de la machine d'essai; ou
- c) en entraînant la machine d'essai comme un moteur.

Lorsqu'on utilise l'essai a) ou b), il convient de réaliser le court-circuit aussi près que possible des bornes de la machine et en appliquant le courant d'excitation après l'établissement du court-circuit. Faire une des lectures à un courant proche du courant d'induit assigné.

Il est préférable de conduire l'essai a) avec un moteur approprié étalonné en courant continu, dans la mesure où cela permet également de déterminer les pertes de court-circuit au cours de l'essai.

Enregistrer simultanément le courant d'excitation et le courant en ligne de l'induit.

NOTE 1 La vitesse de rotation (ou fréquence) peut différer de la valeur assignée, mais il convient qu'elle ne tombe pas en dessous de 0,2 fois sa valeur assignée.

Lorsqu'on utilise l'essai b), il convient que le taux de décélération ne dépasse pas 0,10 fois la vitesse assignée par seconde. Si la machine en essai a un taux de décélération supérieur à 0,04 fois la vitesse assignée par seconde, l'excitation doit être fournie par une source séparée.

Lorsqu'on utilise l'essai c), la machine fonctionne comme un moteur synchrone à une tension définie, de préférence égale à environ 1/3 de la tension normale, mais à la valeur la plus faible permettant d'obtenir un fonctionnement stable. Le courant d'induit est modifié par variation du courant d'excitation. Il convient de modifier le courant d'induit par environ six pas compris entre 125 % et 25 % du courant assigné et d'inclure un ou deux points à un courant très faible.

NOTE 2 Il convient d'obtenir la valeur maximale du courant d'essai, généralement établie à 125 %, auprès du constructeur dans la mesure où le refroidissement du stator peut ne pas permettre un fonctionnement au-delà de 100 % du courant assigné sans provoquer de dommage.

Pour chaque point pris dans l'ordre descendant (pour des températures de bobine de stator plus uniformes), enregistrer le courant d'induit, la tension d'induit et le courant d'excitation.

6.5.2 Caractéristique en court-circuit triphasé permanent

La relation entre le courant d'enroulement d'induit court-circuité et le courant d'excitation est déduite des données de l'essai en court-circuit triphasé permanent (6.5.1).

Tracer le courant en ligne de l'induit mesuré aux bornes (ordonnée) par rapport au courant d'excitation (abscisse) à la vitesse (fréquence) assignée comme indiqué à la Figure 8.

6.6 Essai de moteur à vide

L'essai est réalisé comme en 6.4.1 b), c'est-à-dire avec la machine en essai fonctionnant comme un moteur à vide, mais avec le courant nul dans l'enroulement d'excitation.

Pour obtenir la valeur non saturée de la réactance X_d , il convient que la valeur de la tension aux bornes de la machine ne dépasse pas 50 % à 70 % de la valeur assignée.

Enregistrer simultanément:

- le courant d'induit;
- la tension en ligne;
- la fréquence (ou vitesse).

6.7 Essai à angle interne variable

L'essai est réalisé selon l'une des méthodes suivantes:

- a) en entraînant la machine d'essai avec un moteur synchrone ordinaire et en connectant l'enroulement d'induit de la machine à une source d'alimentation basse tension de la même fréquence que celle utilisée pour le moteur synchrone au moyen d'un déphaseur;
- b) en entraînant la machine en essai avec un moteur synchrone muni d'enroulements d'excitation d'axes longitudinal et transversal, l'enroulement d'induit de la machine entraînée étant connecté à une source d'alimentation à basse tension symétrique et ayant la même fréquence que le moteur synchrone.

Le courant dans la machine d'essai varie selon la position de l'axe des pôles entre une valeur minimale correspondant à X_d et une valeur maximale correspondant à X_q .

On passe d'une position à l'autre soit en agissant sur le déphaseur (méthode a)) soit en faisant varier les excitations dans les deux axes du moteur synchrone (méthode b)), les valeurs maximale et minimale du courant d'induit et les valeurs correspondantes de la tension appliquée aux bornes de la machine sont mesurées.

Pendant les mesures, l'enroulement d'excitation doit être en circuit ouvert. Toutefois, pour éviter d'éventuels dommages, il convient que l'enroulement d'excitation soit court-circuité (ou fermé par l'intermédiaire d'une résistance de décharge) lorsque les mesures ne sont pas réalisées.

Avec la méthode a), le déphaseur doit être capable de faire varier la tension appliquée à l'induit d'au moins 180 degrés électriques.

Avec la méthode b), la puissance du moteur d'entraînement dépend de la tension appliquée à l'enroulement d'induit de la machine en essai qui développe un couple quand on passe d'une position à l'autre.

Pour déterminer les valeurs non saturées des réactances X_d et X_q , il convient que la valeur de la tension appliquée ne dépasse pas 0,5 p.u. de la valeur assignée.

Enregistrer:

- $U_{\max}$ à $I_{\max}$
- $U_{\min}$ à $I_{\min}$

6.8 Essai de surexcitation à facteur de puissance nul

L'essai de surexcitation à facteur de puissance nul est réalisé avec la machine fonctionnant comme une génératrice ou comme un moteur. Il convient que la puissance active soit nulle lorsque la machine fonctionne comme une génératrice. Lorsque la machine fonctionne comme un moteur, la charge sur l'arbre doit être nulle.

Pendant l'essai, le courant d'excitation est déterminé selon les valeurs de la tension et du courant d'induit de préférence avec une différence d'au plus $\pm 0,15$ par unité par rapport aux valeurs assignées, au facteur de puissance nul avec surexcitation.

L'essai de surexcitation au facteur de puissance nul et aux valeurs assignées de tension et de courant d'induit est l'essai préférentiel.

6.9 Essai d'excitation négative

L'essai est réalisé avec la machine fonctionnant à vide en parallèle avec le réseau. Le courant d'excitation est réduit progressivement jusqu'à zéro, sa polarité est inversée et puis il est ensuite augmenté jusqu'au moment où la machine glisse d'un pôle.

NOTE Cet essai n'est pas adapté aux machines à aimants permanents car il exige des lectures avec l'enroulement d'excitation en circuit ouvert ou avec un courant d'excitation nul.

Enregistrer: la tension, le courant d'induit et le courant d'excitation jusqu'au moment où la machine commence à glisser.

6.10 Essai en charge avec mesure de l'angle de charge

L'essai est réalisé avec la machine fonctionnant en parallèle avec le réseau. La charge de la machine ne doit pas inférieure à 0,5 fois la charge active assignée au facteur de puissance assigné.

Enregistrer: le courant dans l'induit et la tension, la puissance active ou le $\cos \varphi$ mesuré directement, le courant d'excitation et l'angle de charge.

NOTE L'angle de charge δ est l'angle interne entre les vecteurs de la tension aux bornes et la f.é.m, cette dernière indiquant la direction transversale.

6.11 Essai à faible glissement

Pendant l'essai à faible glissement, une tension triphasée symétrique inférieure à la normale de $(0,01 U_N \text{ à } 0,2 U_N)$ est appliquée aux bornes de l'induit de la machine en essai. Il convient que la tension soit telle que la machine ne s'accroche pas. L'enroulement d'excitation doit être mis en circuit ouvert, le rotor doit être entraîné par un moteur à un glissement d'au moins 0,01 et dans le cas de machines à rotor massif avec un glissement beaucoup plus faible de telle sorte que les courants induits dans les circuits amortisseurs pendant la marche synchrone doivent avoir une influence négligeable sur les mesures.

Pendant la mise en circuit et hors circuit de l'alimentation, l'enroulement d'excitation doit être fermé (court-circuité directement ou via une résistance de décharge) pour éviter tout dommage potentiel. Le courant et la tension de l'enroulement d'induit et la tension aux bagues collectrices et le glissement sont mesurés par des appareils de mesure ou enregistrés

par un oscilloscope. Si la tension résiduelle mesurée avant l'essai est supérieure à 0,3 fois la tension d'essai d'alimentation, il convient que le rotor soit démagnétisé. La démagnétisation pourrait être réalisée par exemple en connectant l'enroulement d'excitation à une source basse fréquence avec un courant d'environ 0,5 fois le courant d'excitation correspondant à la tension assignée à vide de la machine en essai et faisant décroître progressivement son amplitude et sa fréquence (cette dernière si possible).

NOTE Cet essai n'est pas adapté aux machines à aimants permanents car il exige des lectures avec l'enroulement d'excitation en circuit ouvert ou avec un courant d'excitation nul.

6.12 Essai de court-circuit triphasé brusque

Cet essai est réalisé à la vitesse assignée. Appliquer un court-circuit à l'enroulement d'induit lorsqu'il fonctionne à vide à la tension désirée. L'excitation de la machine est généralement réalisée par sa propre excitatrice qui est excitée séparément.

NOTE 1 Si on ne peut pas utiliser l'excitatrice de la machine, alors une excitatrice séparée et, dans le cas d'une machine sans balais, des bagues collectrices temporaires peuvent être utilisées, mais il convient que la valeur du courant assigné soit au moins égale au double du courant d'excitation à vide de la machine en essai et que sa résistance d'induit ne soit pas supérieure à celle de l'excitatrice de la machine principale. Il convient que cette excitatrice soit à excitation séparée.

Court-circuiter les trois phases simultanément. Il convient que les contacts de phase se ferment avec un décalage inférieur ou égal à 15 degrés électriques. Cette valeur peut être dépassée pendant l'essai lorsque la composante en courant continu d'induit est peu importante. Pour mesurer le courant de court-circuit, on peut utiliser des shunts non inductifs, des transformateurs sans fer ou des transformateurs de courant appropriés. Il convient que les transformateurs de courant ne soient utilisés que pour la mesure des composantes alternatives des courants et qu'ils soient choisis de manière que la pointe initiale de la composante subtransitoire du courant de court-circuit se trouve sur la partie droite de la caractéristique du transformateur.

NOTE 2 Pour les machines dont les fréquences assignées sont inférieures à 60 Hz, des shunts à courant continu peuvent être utilisés.

Il convient que l'enregistrement soit effectué pendant une durée au moins égale à $3\tau_d$ après le court-circuit. Il convient également d'enregistrer les valeurs permanentes (en faisant redémarrer l'oscillogramme) après l'établissement des conditions permanentes. Des enregistrements oscillographiques de plus courte durée peuvent être effectués s'il est établi par des essais que, sur des machines similaires, la valeur du courant décroît suivant une courbe exponentielle.

Le transformateur sans fer est relié à l'oscilloscope par l'intermédiaire d'un amplificateur intégrateur. Lorsqu'il est nécessaire de déterminer seulement les valeurs apériodique et périodique maximales des composantes du courant de court-circuit, un galvanomètre intégrateur peut être utilisé.

Il convient que la résistance totale des appareils de mesure et des conducteurs qui les relient au circuit secondaire des transformateurs de courant ne dépasse pas les valeurs assignées acceptées pour le type de transformateurs utilisé.

Pour obtenir des grandeurs correspondant à l'état non saturé de la machine, l'essai est réalisé à plusieurs tensions d'induit de valeur assignée (0,1 à 0,4). Les grandeurs sont obtenues pour chaque essai et sont reportées sur une courbe en fonction des valeurs initiales des courants d'induit alternatifs transitoires et subtransitoires. En partant de cette relation, les grandeurs exigées sont obtenues à la valeur assignée du courant d'induit.

Pour obtenir les grandeurs correspondant à l'état saturé de la machine, l'essai est réalisé avec la tension assignée aux bornes de la machine avant le court-circuit de l'enroulement d'induit.

Si l'essai de court-circuit brusque ne peut pas être réalisé à la tension d'induit assignée, il est recommandé que les essais soient réalisés à plusieurs tensions d'induit (par exemple 30 %, 50 % et 70 % de la tension d'induit assignée) et que les grandeurs soient déterminées pour chaque essai. Les résultats sont ensuite reportés sur une courbe en fonction de la tension en circuit ouvert avant mise en court-circuit et la grandeur approximative de la tension d'induit assignée est obtenue par extrapolation.

Enregistrer immédiatement avant le court-circuit:

- la tension aux bornes;
- le courant d'excitation;
- la température de l'enroulement d'excitation.

Enregistrer les oscillogrammes du courant d'induit dans chaque phase et le courant d'excitation au cours de la durée du court-circuit. Les données des oscillogrammes sont analysées selon 7.1.2.

6.13 Essai de rétablissement de la tension

Faire fonctionner la machine d'essai à sa vitesse assignée, son induit étant court-circuité par un disjoncteur et le courant d'excitation étant réglé à une valeur correspondant à la partie linéaire de la courbe de saturation à vide qui généralement ne dépasse pas 0,7 fois la tension assignée d'induit à circuit ouvert.

Le court-circuit permanent doit être pratiquement coupé simultanément sur les trois phases, les courants étant interrompus selon des angles $\theta \leq 0,5 \cdot \tau''_d$ (avec τ''_d en degrés électriques) mais sans dépasser 180 degrés électriques. Les enregistrements oscillographiques (partie initiale à vitesse élevée) d'une tension de rétablissement en ligne et d'un courant d'induit sont exigés.

NOTE Cet essai peut être réalisé dans une machine sans balais si elle est équipée de bagues collectrices temporaires (excitation par une excitatrice séparée) ou si la machine peut être excitée par sa propre excitatrice, l'excitatrice étant excitée séparément.

Enregistrer immédiatement avant le court-circuit de déconnexion:

- la tension aux bornes;
- le courant d'excitation;
- la température de l'enroulement d'excitation.

Enregistrer les oscillogrammes du courant d'induit dans chaque phase et le courant d'excitation après coupure du court-circuit.

Les données des oscillogrammes sont analysées selon 7.1.3.

6.14 Essai de court-circuit brusque après déconnexion de la ligne

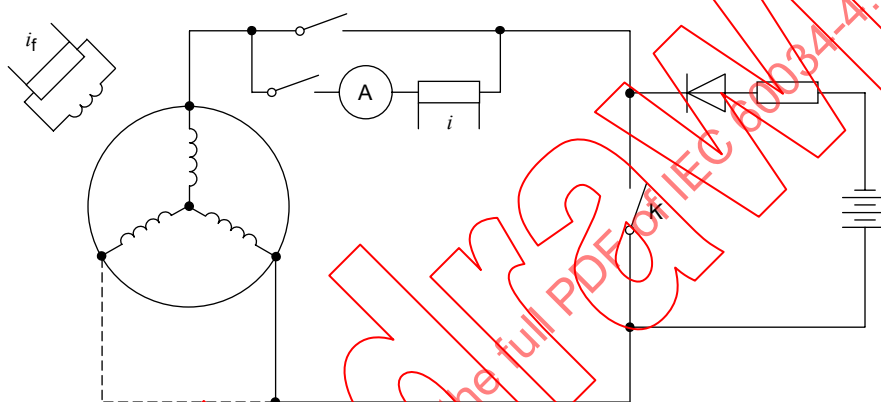
L'essai de court-circuit triphasé brusque peut être réalisé en faisant ralentir la machine en essai à condition que sa décélération ne soit pas supérieure à 0,05 fois sa vitesse assignée par seconde. Avant la séparation d'avec la ligne, la machine fonctionnant à vide est excitée jusqu'à la valeur du courant à laquelle le facteur de puissance est égal à l'unité ou jusqu'à une valeur inférieure. Le courant et la tension d'excitation sont mesurés et enregistrés.

Aussi vite que possible après la déconnexion, et au plus tard au bout d'1 s, la machine est mise en court-circuit pratiquement simultanément. Les exigences générales pour l'équipement, les appareils de mesure, l'excitation et la détermination des grandeurs sont similaires à celles indiquées en 6.12.

Pour les machines à pôles saillants, le courant peut être augmenté jusqu'à la valeur assignée si la vibration de la machine ne dépasse pas les valeurs admissibles. Pour les machines à pôles lisses, le courant d'induit est généralement limité à 0,5 fois la valeur assignée.

6.15 Essai de décroissance d'un courant continu dans l'essai de l'enroulement d'induit à l'arrêt

L'essai de décroissance d'un courant continu dans l'enroulement d'induit est réalisé à l'arrêt. Une tension continue est appliquée à l'enroulement d'induit (entre deux bornes, la troisième étant libre, ou deux phases en parallèle entre elles et en série avec la troisième) par l'intermédiaire d'une résistance (voir Figure 1). Lorsque le contacteur K est fermé, l'enroulement est mis en court-circuit et le courant qui y circule décroît. Le processus entier de décroissance du courant est enregistré.



IEC 454/08

Figure 1 – Schéma pour l'essai de décroissance du courant continu à l'arrêt

La résistance du contacteur K doit être notablement plus faible que celle de l'induit. La résistance mise en série avec la source de tension doit être choisie de manière à ce que la fermeture du contacteur n'affecte pas notablement la valeur du courant débité par la source (la valeur du courant ne doit pas varier de plus de quelques pour-cent).

L'essai est réalisé avec le rotor orienté selon l'axe longitudinal puis selon l'axe transversal après une magnétisation préalable du système magnétique de la machine en faisant passer à travers l'enroulement (primaire) d'induit un courant continu qui produira la saturation. Une démagnétisation progressive est ensuite entreprise en descendant jusqu'à la valeur du courant d'essai et la source est mise en court-circuit ou hors circuit après la fermeture du contacteur K.

Il convient que l'enregistrement du courant de décroissance soit réalisé de telle manière que les courbes soient disponibles avec différentes bases temporelles dans un rapport approximatif 10:1:0,1, pour:

- la portion initiale de la décroissance;
- la portion initiale et la portion moyenne de la courbe;
- l'ensemble de la courbe décroissante.

NOTE L'essai peut également être réalisé une fois en utilisant un équipement à trois canaux d'oscilloscope.

Lorsque l'essai est réalisé avec le rotor orienté suivant l'axe longitudinal, l'enroulement d'excitation est mis en court-circuit, le courant qui le parcourt est aussi enregistré par le

même oscilloscope. Il convient qu'il n'y ait pas de résistance supplémentaire efficace dans le circuit de l'enroulement d'excitation.

Lorsque l'essai est réalisé avec le rotor orienté suivant l'axe transversal, l'enroulement d'excitation est mis en circuit ouvert et la tension qui y est induite est aussi enregistrée par le même oscilloscope. La même chose s'applique à l'essai avec le rotor orienté selon l'axe longitudinal avec l'enroulement d'excitation en circuit ouvert.

Après l'essai, la résistance en courant continu du circuit de l'enroulement d'excitation et l'enroulement d'excitation lui-même sont mesurés.

Les données des oscillogrammes sont analysées selon 7.1.4.

6.16 Essai d'application brusque de l'excitation avec l'enroulement d'induit à circuit ouvert

L'essai d'application brusque de l'excitation avec l'enroulement d'induit en circuit ouvert est réalisé sur une machine tournant à sa vitesse assignée avec son enroulement d'excitation préalablement en circuit ouvert. L'excitation de la machine est assurée de préférence par sa propre excitatrice qui doit être excitée séparément. Si on ne peut pas utiliser l'excitatrice de la machine, une excitatrice séparée peut être utilisée mais la valeur du courant assigné doit être au moins le double du courant d'excitation à vide de la machine en essai et sa résistance d'induit ne doit pas être supérieure à celle de l'excitatrice de la machine principale. Cette excitatrice séparée doit aussi être excitée séparément.

La tension de l'excitatrice est réglée à une valeur correspondant à la partie rectiligne de la courbe de saturation à vide qui n'est généralement pas supérieure à 0,7 fois la tension assignée d'induit en circuit ouvert. L'enroulement d'excitation de la machine en essai est relié brusquement à l'excitatrice. On enregistre la tension de l'induit, le courant d'excitation et, à titre de contrôle, la tension de l'excitatrice.

L'essai est considéré comme satisfaisant si la tension de l'excitatrice reste pratiquement constante au cours de l'essai.

Les données des oscillogrammes sont analysées selon 7.1.5.

6.17 Essai d'application de tension pour les positions longitudinale et transversale des pôles du rotor

Une tension alternative à la fréquence assignée est appliquée entre deux bornes de ligne quelconques de l'enroulement d'induit.

L'enroulement d'excitation est court-circuité pour mesurer son courant. Il convient que la durée de l'application de la tension soit limitée pour éviter un échauffement important.

NOTE Dans les machines sans balais, il convient que l'enroulement d'excitation soit déconnecté du redresseur tournant et qu'il soit court-circuité.

Le rotor est tourné lentement de manière à déterminer les positions angulaires correspondant aux valeurs maximale et pratiquement nulle du courant dans l'enroulement d'excitation. La première position correspond à l'axe longitudinal, la seconde à l'axe transversal. La tension d'alimentation, le courant dans l'induit et la puissance absorbée sont mesurés avec le rotor fixe dans ces positions. Le courant dans l'enroulement d'excitation est nécessaire pour évaluer la position du rotor (axe longitudinal ou axe transversal), c'est pourquoi il n'est pas nécessaire que les appareils de mesure soient obligatoirement d'une grande précision.

Les grandeurs déterminées à partir de cet essai, selon la valeur du courant d'induit, incluent la saturation des chemins de fuite des circuits amortisseurs. Les grandeurs déterminées au

courant assigné avec la saturation relative des chemins des circuits amortisseurs sont rapportées aux grandeurs non saturées.

En règle générale, les valeurs saturées ne peuvent pas être déterminées à partir de cet essai en raison de la valeur élevée du courant nécessaire et du possible échauffement des enroulements et des parties massives.

Si les essais ne peuvent pas être réalisés au courant d'induit assigné, la détermination des grandeurs rapportées à l'état non saturé de la machine doit être effectuée à partir de plusieurs essais avec différents courants d'induit (0,2 à 0,7 I_N).

Les grandeurs sont reportées en fonction du courant d'induit et les valeurs exigées sont obtenues par extrapolation.

Pour les machines à encoches d'induit fermées ou semi-fermées et à encoches d'enroulement d'amortisseur fermées, la tension d'alimentation ne doit pas être inférieure à 0,2 fois la valeur assignée.

6.18 Essai de tension appliquée avec le rotor en position arbitraire

Pour réaliser cet essai, une tension alternative est appliquée à chaque paire de bornes de ligne de l'enroulement d'induit de la machine fixe en essai.

L'enroulement d'excitation doit être court-circuité et son courant mesuré. Il est nécessaire que la position du rotor reste la même pour les trois applications de la tension d'essai.

NOTE Dans les machines sans balais, il convient que l'enroulement d'excitation soit déconnecté du redresseur et qu'il soit court-circuité.

Si cela est nécessaire, il convient de freiner le rotor. Il convient que la durée de l'application de la tension soit limitée pour éviter un échauffement important des parties massives.

La tension appliquée, l'intensité et la puissance absorbée dans l'induit et le courant de l'enroulement d'excitation sont mesurés en appliquant une tension alternative d'alimentation à chaque paire de bornes. Les exigences pour obtenir les grandeurs rapportées à l'état non saturé ou saturé de la machine sont similaires à celles 6.17.

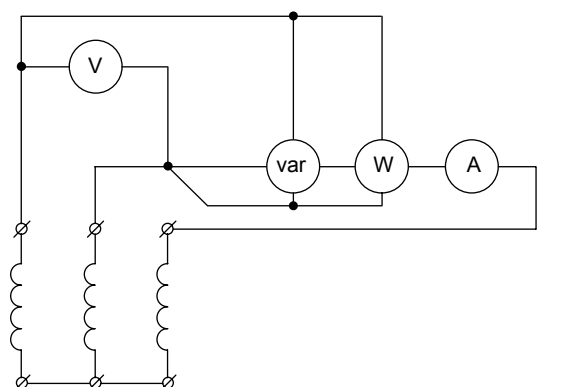
6.19 Essai de tension monophasée appliquée aux trois phases

Pour réaliser l'essai, une tension monophasée est appliquée aux bornes des trois phases montées en série ou en parallèle, la machine étant entraînée à la vitesse assignée ou à une valeur proche de celle-ci. Le raccordement des phases doit être réalisé de sorte que le courant circule dans chaque phase dans la même direction comme cela est défini par le régime homopolaire. L'enroulement d'excitation est court-circuité.

Enregistrer la tension U , le courant I et la puissance active P .

6.20 Essai de court-circuit permanent entre phases

Pour réaliser l'essai de court-circuit permanent entre phases, deux bornes de ligne quelconques sont court-circuitées (voir Figure 2) et la machine est entraînée à sa vitesse assignée par un moteur approprié.



IEC 455/08

Figure 2 – Schéma de circuit pour l'essai de court-circuit entre phases

Le courant de court-circuit I_{k2} , le courant d'excitation et la tension U_{k2} entre les bornes à circuit ouvert et une des bornes court-circuitées sont mesurés.

Pour augmenter la précision des mesures en présence des harmoniques de la tension ou du courant, il est recommandé de mesurer la puissance active P et la puissance réactive Q .

Les mesures sont prises pour plusieurs valeurs du courant de court-circuit.

Pour éviter un échauffement important des pièces massives, il convient que la durée de l'essai de court-circuit permanent entre phases pour des courants supérieurs à $0,3 I_N$ soit limitée à l'intervalle de temps nécessaire pour lire les appareils de mesure.

6.21 Court-circuit brusque entre phases

L'essai de court-circuit brusque entre phases en vue de la détermination de la réactance inverse est effectué à la vitesse assignée. Avant de provoquer le court-circuit, la machine doit fonctionner avec son enroulement d'induit en circuit ouvert.

Les exigences relatives au système d'excitation et au choix des appareils de mesure doivent être conformes à celles indiquées en 6.12.

La tension aux bornes de la machine, le courant d'excitation et la température du rotor sont mesurés immédiatement avant le court-circuit.

Pour déterminer la réactance inverse, on enregistre des oscillogrammes de la tension d'induit aux bornes qui vont être court-circuitées, le courant d'induit dans les mêmes phases et le courant dans le circuit d'excitation. L'enregistrement et la méthode d'analyse des oscillogrammes doivent être conformes à 6.12.

Pour obtenir la valeur de $X_{(2)}$ correspondant à l'état non saturé de la machine, c'est-à-dire aux conditions de courant assigné, l'essai est effectué à plusieurs tensions entre phases comme au cours de l'essai de court-circuit triphasé brusque de 6.12 et la valeur exigée est obtenue à partir des résultats enregistrés.

Pour obtenir la valeur de $X_{(2)}$ correspondant à l'état saturé de la machine, il convient que la tension aux bornes de la machine avant l'application du court-circuit entre phases de l'enroulement (primaire) d'induit soit égale à la valeur assignée.

Si l'essai ne peut pas être réalisé à la tension assignée, il peut être réalisé à plusieurs valeurs réduites de tension d'induit comme en 6.12 et $X_{(2)}$ peut être déterminée pour chaque essai. Ces valeurs sont ensuite représentées graphiquement en fonction de la tension à

circuit ouvert avant la mise en court-circuit et une valeur approximative correspondant à la tension assignée doit être trouvée par extrapolation.

L'essai de court-circuit doit être réalisé de sorte que la composante apériodique soit pratiquement maximale, c'est-à-dire que le court-circuit réel doit être décalé dans les limites de 30° par rapport au passage de la tension par zéro.

6.22 Essai de court-circuit permanent entre phases et le neutre

Pour effectuer l'essai de court-circuit permanent entre phases et le neutre, l'enroulement d'induit est connecté en étoile, deux bornes de ligne sont court-circuitées au point neutre, la machine est entraînée à sa vitesse assignée et elle est excitée (Figure 3).

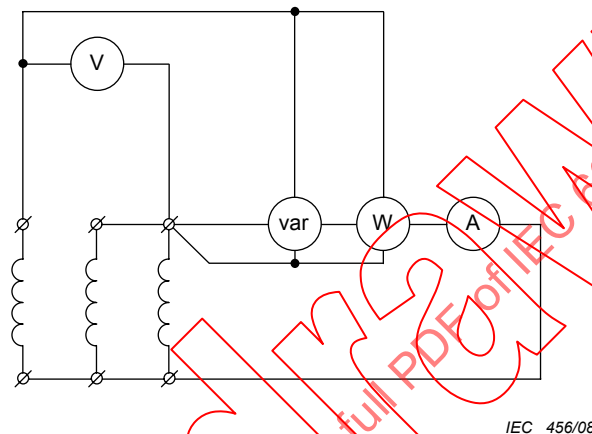


Figure 3 – Schéma de circuit pour l'essai de court-circuit permanent entre phases et le neutre

Les grandeurs mesurées sont la tension U_0 entre la borne à circuit ouvert et le point neutre et le courant I_0 dans la connexion qui relie les bornes court-circuitées au point neutre.

Pour tenir compte de l'influence des harmoniques, on mesure la puissance active et la puissance réactive.

Les mesures sont prises à plusieurs valeurs du courant de neutre. Les valeurs du courant et la durée de l'essai sont limitées par l'échauffement du rotor ou par les vibrations.

6.23 Essai de rotation inverse

L'essai est effectué en appliquant une tension symétrique réduite de $0,02 U_N$ à $0,2 U_N$ fournie par une source extérieure ayant un ordre de succession des phases inverse, appliquée à la machine entraînée à sa vitesse assignée, c'est-à-dire que la machine fonctionne comme un frein électromagnétique avec un glissement de 2.

L'enroulement d'excitation doit être court-circuité.

Si la tension résiduelle de la machine en essai dépasse 30 % de la tension d'alimentation, il convient que le rotor soit démagnétisé avant de procéder à l'essai de la machine. Les valeurs mesurées au cours de l'essai sont la tension et le courant dans les trois phases et la puissance d'alimentation.

6.24 Essai de décroissance du courant d'excitation, avec l'enroulement d'induit en circuit ouvert

6.24.1 Essai à la vitesse assignée

Cet essai est effectué sur la machine entraînée à sa vitesse assignée par un moteur approprié et excitée à la tension assignée; l'enroulement d'excitation est mis brusquement en court-circuit. La source d'alimentation de l'enroulement d'excitation peut exiger une séparation dans les 0,02 s qui suivent l'application.

NOTE Pendant l'essai des machines, une résistance de limitation du courant peut être connectée en série à l'enroulement d'excitation pour limiter le courant de court-circuit de la source à courant continu.

Enregistrer un oscillogramme de la tension de l'enroulement d'induit, du courant dans l'enroulement d'excitation et de la tension aux bagues collectrices. Cette dernière permet une détermination précise de l'instant où commence la décroissance du courant d'excitation (instant zéro) et de la tension initiale à cet instant.

La différence entre la tension transitoire relevée à l'oscillogramme et la tension résiduelle de la machine est représentée graphiquement par rapport au temps sur une échelle semi-logarithmique.

6.24.2 Essai à l'arrêt

La machine est à l'arrêt; l'enroulement d'induit est en circuit ouvert; l'enroulement d'excitation est alimenté par une source séparée en courant continu, l'enroulement d'excitation est brusquement mis en court-circuit. La source d'alimentation de l'enroulement d'excitation peut exiger une séparation dans les 0,02 s qui suivent l'application.

NOTE Pendant l'essai des machines, une résistance de limitation du courant peut être connectée en série à l'enroulement d'excitation pour limiter le courant de court-circuit de la source à courant continu.

On enregistre un oscillogramme du courant de l'enroulement d'excitation et on représente graphiquement la valeur par rapport au temps sur une échelle semi-logarithmique.

6.25 Essai de décroissance du courant d'excitation à la vitesse assignée avec l'enroulement d'induit court-circuité

L'essai de décroissance du courant d'excitation avec l'enroulement d'induit court-circuité est réalisé avec un moteur approprié qui entraîne la machine à sa vitesse assignée et avec l'induit parcouru par le courant assigné en court-circuitant brusquement l'enroulement d'excitation.

On enregistre un oscillogramme d'un courant de ligne et d'un courant d'excitation quelconques ou de la tension aux bagues collectrices.

La différence entre le courant transitoire relevé à l'oscillogramme et le courant dû à la tension résiduelle est représentée graphiquement par rapport au temps sur une échelle semi-logarithmique.

NOTE Il convient que le courant de court-circuit soit maintenu seulement temporairement pour éviter les dommages dus à l'échauffement.

6.26 Excitation appliquée de manière brusque avec l'enroulement d'induit court-circuité

L'essai d'application brusque de l'excitation avec l'enroulement d'induit en court-circuit est réalisé sur une machine tournant à sa vitesse assignée avec son enroulement d'excitation préalablement en circuit ouvert. Les exigences à remplir pour la source d'excitation sont celles indiquées en 6.16. La machine est excitée à partir de sa propre excitatrice qui doit être excitée séparément ou à partir d'une autre source.

La tension de l'excitation est réglée à une valeur correspondant au courant de court-circuit assigné de la machine en essai. L'enroulement d'excitation de la machine en essai est relié brusquement à l'excitatrice. On enregistre un oscillogramme du courant dans l'induit, du courant d'excitation et de la tension excitatrice. L'essai est considéré comme satisfaisant si la tension de l'excitatrice reste pratiquement constante au cours de l'essai.

6.27 Essai de décroissance du courant d'excitation à l'arrêt avec deux phases de l'enroulement d'induit court-circuitées

L'essai de décroissance du courant d'excitation avec deux phases de l'enroulement d'induit court-circuitées est réalisé à l'arrêt avec le rotor placé de manière longitudinale par rapport à l'axe magnétique des phases court-circuitées de l'enroulement d'induit en court-circuitant brusquement l'enroulement d'excitation.

NOTE Une résistance de limitation du courant peut être connectée en série à l'enroulement d'excitation pour limiter le courant de court-circuit de la source à courant continu.

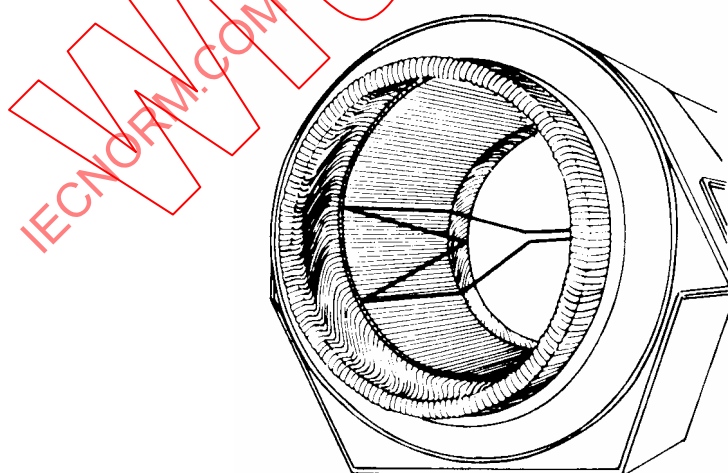
Cet essai déterminera la constante de temps τ'_d des machines sans balais lorsque l'essai à la vitesse assignée ne peut être réalisé.

On enregistre un oscillogramme du courant de l'enroulement d'excitation et on représente graphiquement la valeur par rapport au temps sur une échelle semi-logarithmique.

6.28 Essai de tension appliquée le rotor retiré étant enlevé

Cet essai est effectué en appliquant à l'enroulement d'induit une tension triphasée symétrique à fréquence assignée, le rotor étant enlevé.

Une bobine exploratrice est placée à la surface des dents ou suivant un diamètre légèrement inférieur à l'alésage du stator pour exclure les flux de fuites à travers les encoches. La longueur de cette bobine est égale à la longueur totale du circuit magnétique; sa largeur est égale à un pas polaire. Les parties terminales sont tendues au moyen de fils vers l'axe de la machine et suivant des rayons dans les plans des dents extrêmes du circuit magnétique de manière à les soustraire à l'influence des flux de fuites autour des têtes de bobine de l'induit (voir Figure 4).



0626/85

Figure 4 – Installation de la bobine exploratrice le rotor étant enlevé

Si l'induit a un nombre fractionnaire d'encoches par pôle et par phase, la largeur de la bobine est prise comme égale au nombre entier d'encoches immédiatement supérieur au pas polaire.

L'enroulement d'induit est relié à la source de tension et on mesure la tension appliquée U , le courant magnétisant dans l'induit I , la puissance absorbée P et la tension de la bobine exploratrice U_c . La mesure de la tension de la bobine exploratrice doit être réalisée avec un voltmètre à forte résistance interne.

6.29 Essai de ralentissement à vide

L'essai de ralentissement à vide est réalisé lorsqu'il n'y a pas de volant supplémentaire sur l'arbre de la machine en essai. La machine est excitée par une source séparée et l'excitation reste inchangée au cours de l'essai.

La machine en essai est amenée en survitesse en augmentant la fréquence d'alimentation ou au moyen d'un moteur muni d'un embrayage; l'alimentation est alors déconnectée.

Cet essai consiste à mesurer le temps de ralentissement Δt pendant que la machine ralentit entre deux vitesses prédéterminées espacées d'une valeur $\Delta \omega$, soit entre 1,10 et 0,9 par unité ou entre 1,05 et 0,95 par unité.

6.30 Essai d'oscillation du rotor suspendu

Pour effectuer cet essai, le rotor est suspendu à un câble ou à deux câbles parallèles de manière à ce que son arbre soit en position verticale. En tournant le rotor, on provoque des oscillations autour de l'axe de son arbre. Le temps nécessaire pour effectuer plusieurs oscillations est enregistré et la durée moyenne d'un cycle d'oscillation est calculée.

Dans le cas de la suspension à un seul câble, l'essai est réalisé deux fois, d'abord avec le rotor seul puis avec le rotor auquel on adjoint un volant ou une poulie, se comportant comme un volant d'inertie connue.

Il convient que le déplacement angulaire unidirectionnel ne dépasse pas 45° pour une suspension à un seul câble et 10° pour une suspension à deux câbles.

6.31 Essai à rotor bloqué

L'essai est effectué avec le rotor bloqué et en appliquant la tension triphasée de fréquence assignée à l'enroulement d'induit, l'enroulement d'excitation étant court-circuité ou fermé par l'intermédiaire d'une résistance suivant le cas.

L'essai doit être réalisé en appliquant la tension assignée à l'enroulement d'induit à moins que l'échauffement excessif de l'enroulement amortisseur et de l'enroulement d'induit n'empêche d'exécuter l'essai.

Dans ce cas, une série d'essais à tension réduite peut être exécutée de manière à permettre la détermination par extrapolation des grandeurs correspondant à la tension assignée. Il convient que la valeur réduite de la tension appliquée soit suffisamment élevée à cause de l'effet de saturation de telle sorte que le point de tension assignée puisse être extrapolé de manière précise. Généralement, au cours de l'essai, il convient que le courant d'induit soit supérieur à deux fois la valeur du courant assigné.

La durée d'application de la tension est limitée par le temps nécessaire pour procéder aux lectures et par l'échauffement des parties du rotor et il convient qu'elle soit maintenue en dessous de 10 s.

Enregistrer:

- la tension et le courant de l'induit dans les trois phases;
- la puissance d'entrée (souhaitable).

6.32 Essai de surexcitation à facteur de puissance nul et à tension d'induit variable

L'essai est réalisé avec la machine fonctionnant en générateur ou en moteur. Il convient que la puissance active soit nulle lorsque la machine fonctionne comme une génératrice. La charge sur l'arbre doit être nulle lorsque la machine fonctionne comme un moteur.

Au cours de l'essai, le courant de l'enroulement d'induit est gardé constant et égal à sa valeur assignée, on fait varier la tension appliquée à l'induit depuis au moins sa valeur assignée jusqu'à la valeur la plus faible à laquelle la machine reste stable. Pour obtenir une précision raisonnable, il est recommandé que la tension d'induit soit abaissée à moins de 0,5 fois la valeur assignée.

Il convient de veiller à ce qu'il ne se produise pas d'échauffement excessif de l'enroulement d'excitation.

6.33 Fonctionnement asynchrone pendant l'essai à basse tension

L'essai est effectué en appliquant à la machine en essai une tension symétrique réduite ($0,01 U_N$ à $0,2 U_N$) à la fréquence assignée fournie par une source extérieure.

L'enroulement d'excitation est court-circuité. Si la tension résiduelle de la machine dépasse 0,3 de la tension appliquée, il convient que le rotor soit démagnétisé avant de procéder à l'essai de la machine. On mesure une tension entre phases, un courant en ligne et la puissance absorbée et on les enregistre pendant l'essai. En procédant aux calculs, on prend en compte les valeurs moyennes de ces grandeurs pendant la période d'oscillation pleine.

La vitesse de rotation de la machine est modifiée par échelons; à chaque échelon de vitesse, la tension est appliquée à l'enroulement d'induit pendant le temps nécessaire pour procéder aux lectures et aux enregistrements. Dans le domaine des petits glissements (au-dessous de 0,05), il devient difficile de maintenir la vitesse de rotation constante dans les limites de la précision exigée. Dans ce cas, l'essai avec enregistrement oscillographique peut être réalisé avec un faible ralentissement (pas plus de 0,04 fois la vitesse assignée par seconde pour les petites machines; pour de grosses machines il sera bien plus faible en raison des caractéristiques inhérentes à la machine).

Les valeurs moyennes pour la puissance et le courant sont représentées graphiquement en fonction du glissement (voir Figure 5).

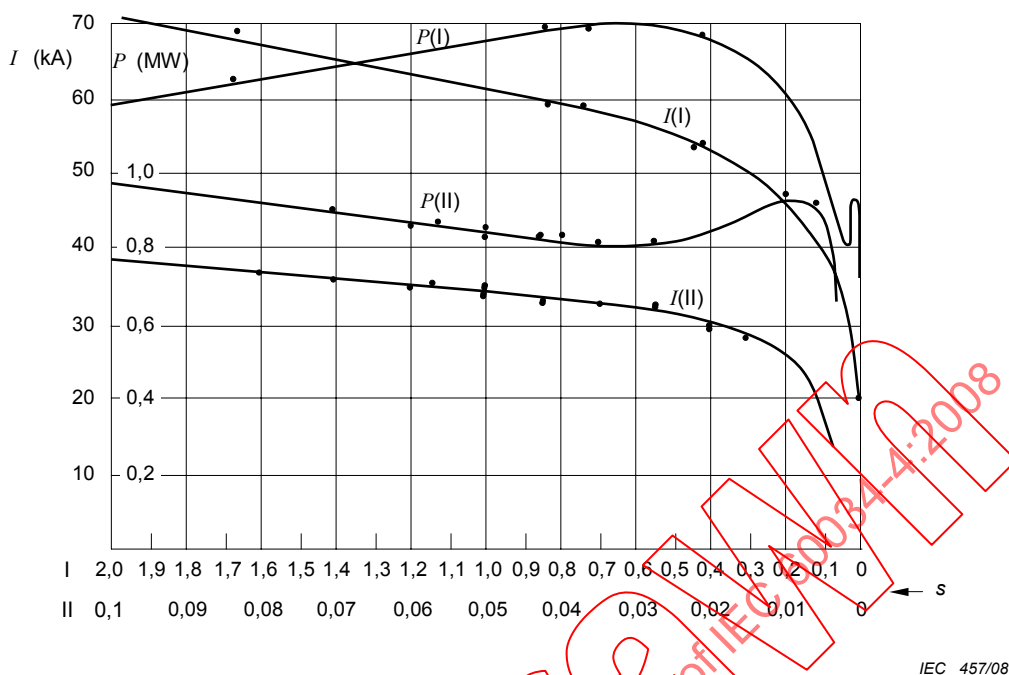
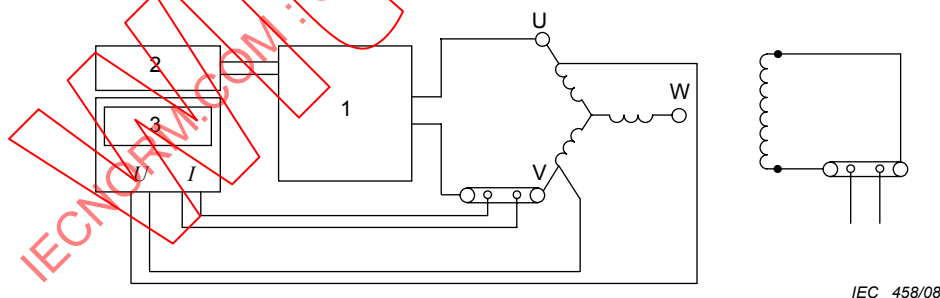


Figure 5 – Puissance et courant en fonction du glissement (exemple)

6.34 Essai d'application d'une fréquence variable à l'arrêt

Pour réaliser cet essai, une tension à différentes fréquences est appliquée entre deux bornes de ligne de l'enroulement d'induit. La machine est à l'arrêt. L'enroulement d'induit est alimenté par un amplificateur monophasé à fréquence variable. La connexion est en étoile, avec bornes d'alimentation U et V, la troisième borne W ouverte ou court-circuitée avec la borne V. L'enroulement d'excitation est court-circuité. La Figure 6 représente un schéma des connexions principales.



Légende

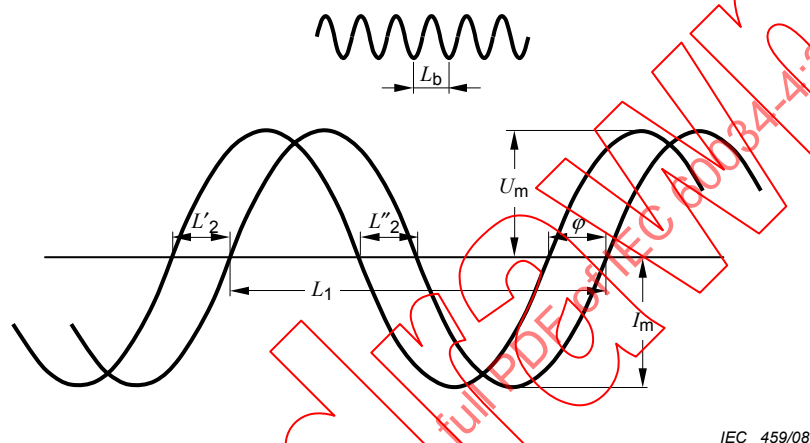
- 1 Amplificateur de puissance
- 2 Oscillateur
- 3 Oscilloscope

Figure 6 – Schéma pour l'essai d'application d'une fréquence variable à l'arrêt

Au cours de l'essai, le rotor est orienté une première fois de manière à avoir le courant d'induit maximal dans l'enroulement d'excitation (axe longitudinal) et une fois de manière à avoir le courant d'induit minimal (presque zéro) (axe transversal).

La tension d'alimentation, le courant de l'enroulement d'induit et leur déphasage mutuel sont mesurés et enregistrés par un oscilloscope (voir Figure 7). Le courant dans l'enroulement d'excitation est enregistré uniquement dans le but d'évaluer la position du rotor. Le déphasage peut être aussi mesuré par toute autre méthode ayant une précision adéquate.

Certaines précautions doivent être prises au cours de l'essai. Celui-ci peut être réalisé soit avec des courants relativement élevés (0,3 à 0,5 de la valeur du courant d'induit assigné) soit avec des courants faibles dans l'induit (0,05 à 0,1 de la valeur assignée) et un flux magnétique supplémentaire produit par le courant continu dans le même enroulement d'induit superposé au courant de faible fréquence de telle sorte que la valeur de crête du courant alternatif soit inférieure à la valeur du courant continu. A toutes les fréquences, il convient que les valeurs du courant alternatif et continu soient approximativement les mêmes.



Légende

$$s = f_i / f_N = (f_b L_b) / (f_N L_1) ; \quad \phi = 2\pi (L'_2 + L''_2) / (2L_1)$$

où

L_b = durée de la fréquence d'étalonnage; L_1 = durée de la fréquence de glissement;

f_b = fréquence d'étalonnage; f_i = fréquence d'essai; f_N = fréquence assignée

Figure 7 – Grandeurs enregistrées au cours de l'essai d'application à l'arrêt d'une fréquence variable (exemple)

Aux fréquences de 5 Hz et au-dessous, la différence entre les impédances et les résistances devient faible et le déphasage entre la tension et le courant diminue, ce qui introduit des erreurs supplémentaires dans la mesure de cet angle sur l'oscillogramme.

Les imprécisions peuvent être considérablement réduites si l'on compense la chute de tension dans la résistance de l'induit au cours de l'essai. Pour cela, une méthode analogique consiste à compenser la chute de tension dans la résistance de l'induit en utilisant un amplificateur et une résistance auxiliaire. Il convient que la température soit stable pendant l'essai.

La chute de tension dans le shunt et dans la résistance auxiliaire, proportionnelle au courant à mesurer, est déduite de la tension aux bornes de l'enroulement d'induit à l'aide d'un amplificateur. En modifiant la résistance à l'entrée de l'amplificateur, on peut régler sa tension de sortie jusqu'à zéro, avec un passage de courant continu dans l'enroulement d'induit, ce qui compense la résistance de l'induit. Pour réduire l'erreur due à l'échauffement de l'enroulement au cours de l'essai, l'aptitude à la compensation doit être vérifiée plusieurs fois avec du courant continu dans l'enroulement d'induit en réglant chaque fois la tension de sortie de l'amplificateur à zéro.

7 Détermination des grandeurs

7.1 Méthodes graphiques et analyse des enregistrements oscillographiques

7.1.1 Courbes de saturation à vide et de court-circuit triphasé permanent

Les données obtenues à partir de 6.4.2 et 6.5.2 sont combinées dans un graphique pour obtenir des courbes de saturation et de court-circuit conformes à la Figure 8.

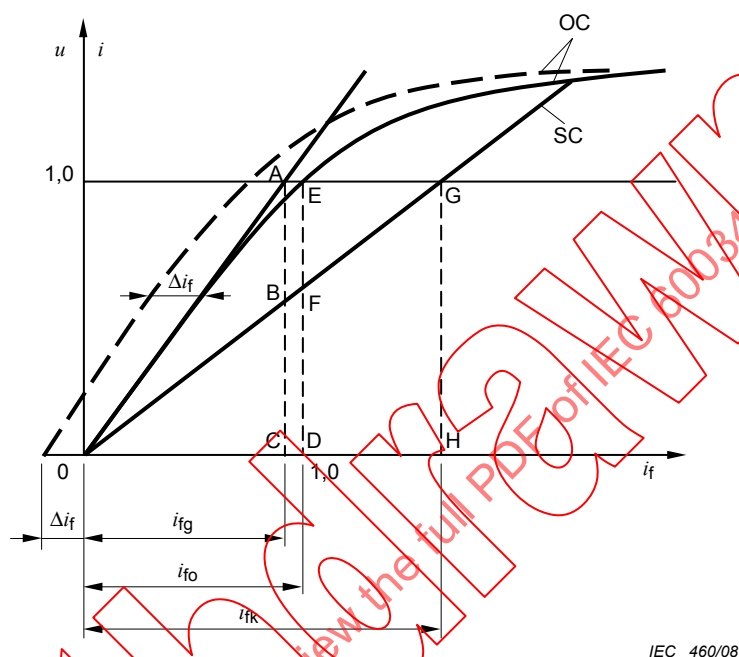


Figure 8 – Courbes combinées de saturation et de court-circuit

Ce graphique est utilisé pour déterminer le rapport de la réactance synchrone longitudinale (7.2.1, 7.2.2) et du court-circuit (7.2.9).

7.1.2 Essai de court-circuit triphasé brusque

Les variations dans le temps de la composante périodique et de la composante aperiodique du courant d'induit dans chacune des phases sont déterminées d'après les oscillogrammes du court-circuit triphasé (voir 6.12) comme étant respectivement la demi-somme algébrique et la demi-différence algébrique des ordonnées des enveloppes supérieure et inférieure du courant de court-circuit en phases séparées.

La composante périodique du courant de court-circuit de l'induit est prise comme la moyenne arithmétique de la composante périodique du courant dans les trois phases.

Pour déterminer les composantes transitoire ($\Delta i'_k$) et subtransitoire ($\Delta i''_k$), on retranche de la courbe de la composante périodique du courant d'induit, la valeur du courant de court-circuit permanent $i(\infty)$. La différence qui représente la somme de $\Delta i'_k + \Delta i''_k$, est représentée graphiquement à l'échelle semi-logarithmique. Ce tracé peut être une droite ou une courbe.

- Lorsque la deuxième partie de ce tracé est une droite (cas d'une exponentielle), le prolongement de celle-ci jusqu'au temps zéro donne la valeur initiale $\Delta i'_k(0)$ de la composante transitoire du courant de court-circuit (voir Figure 9).
- Lorsque la deuxième partie de ce tracé est une courbe, l'amplitude du courant i_Δ est mesurée (voir Figure 10) au temps OA' , où OA' est pris égal à 0,2 s ou au temps à partir

duquel les phénomènes subtransitoires deviennent négligeables. Le temps OB' est mesuré au moment où le courant est égal à $i_B = 1/e \cdot i_A$. La constante de temps τ'_d est prise égale à $(OB' - OA')$ secondes. La droite passant par les valeurs des courants i_B et i_A est considérée comme représentant la valeur équivalente de $\Delta i'_k$ et, son extrapolation jusqu'au temps zéro, donne la valeur initiale $\Delta i'_k(0)$ de la composante transitoire du courant de court-circuit.

La composante subtransitoire du courant de court-circuit est définie comme étant la différence entre la courbe $(\Delta i'_k + \Delta i''_k)$ et la droite représentant la valeur de $\Delta i'_k$. La variation de la composante subtransitoire du courant en fonction du temps est également représentée graphiquement sur l'échelle semi-logarithmique.

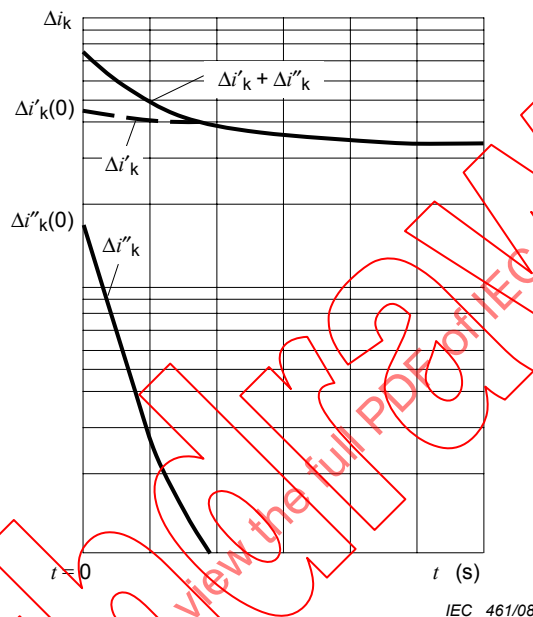


Figure 9 – Composantes transitoire et subtransitoire du courant de court-circuit

Les composantes aperiodiques du courant de toutes les phases sont représentées graphiquement en fonction du temps sur l'échelle semi-logarithmique. L'extrapolation de ces courbes jusqu'au temps zéro donne les valeurs initiales des courants correspondants.

Pour déterminer la plus grande valeur possible de la composante aperiodique, les valeurs initiales des composantes aperiodiques des phases séparées obtenues par extrapolation sont reportées sous forme de vecteurs sur trois lignes espacées de 60° , partant d'une origine commune, le plus long des trois vecteurs étant tracé sur la ligne médiane. Des perpendiculaires sont tirées à l'extrémité de chaque vecteur. Le vecteur joignant l'origine au centre du triangle formé par les intersections de ces perpendiculaires représente la plus grande composante aperiodique possible qui est égale à la valeur initiale de l'amplitude de la composante périodique (voir Figure 11).

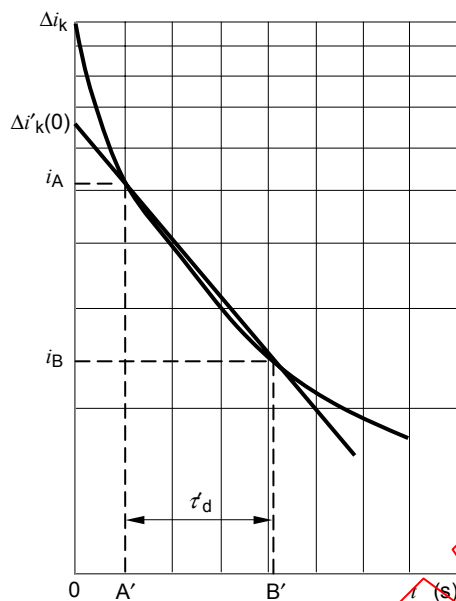


Figure 10 – Détermination de la composante transitoire du courant de court-circuit

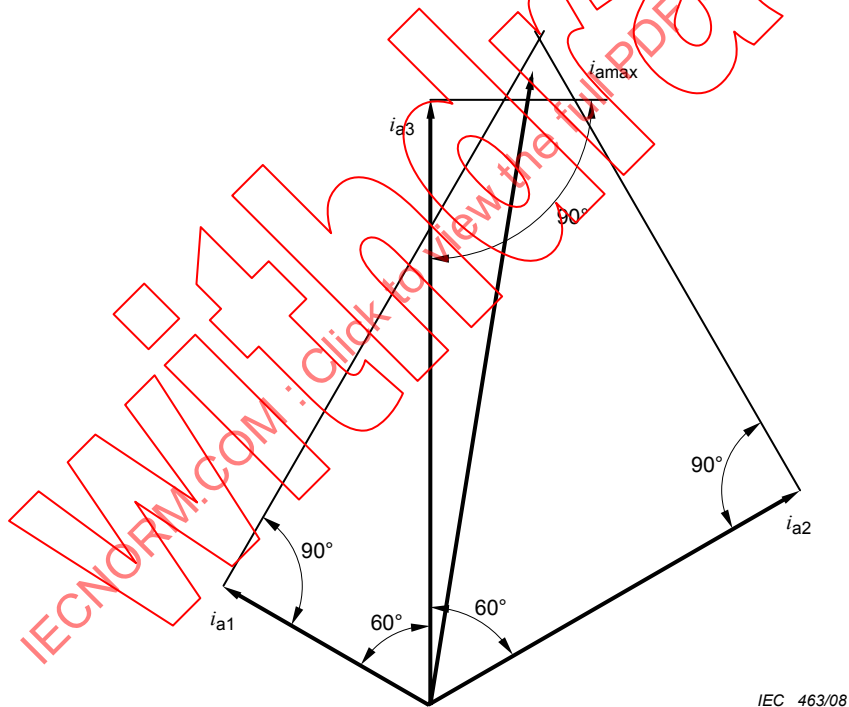


Figure 11 – Détermination graphique de la composante apériodique

La plus grande valeur possible de la composante apériodique du courant peut être déterminée de manière analytique (en valeurs réduites ou en grandeurs physiques) par la formule:

$$i_{a \max} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{i_{a1}^2 + i_{a2}^2 - i_{a1} i_{a2}}$$

où

i_{a1} est la valeur initiale absolue la plus élevée (quel que soit son signe) de la composante apériodique du courant donné par l'essai,

i_{a2} est la valeur initiale absolue de la composante du courant apériodique dans une quelconque des deux autres phases.

La courbe de la composante périodique du courant d'excitation en fonction du temps est déterminée à partir de l'oscillogramme du courant d'excitation et elle est représentée graphiquement sur une échelle semi-logarithmique. L'extrapolation de cette courbe jusqu'au temps zéro donne les valeurs initiales de la composantes du courant périodique.

NOTE Pour les machines sans balais, si le courant d'excitation ne peut pas être enregistré, il convient que la constante de temps d'induit en court-circuit soit déterminée à partir de la décroissance de la composante apériodique du courant de l'induit.

7.1.3 Essai de rétablissement de la tension

En utilisant l'oscillogramme (voir 6.13), on représente graphiquement la différence entre la tension permanente et la tension déterminée par les enveloppes de la tension de rétablissement sur une échelle semi-logarithmique en fonction du temps et on extrapole ensuite le moment de la coupure du court-circuit (courbe 1, Figure 12). L'extrapolation de la partie droite de la courbe 1 jusqu'à l'axe des ordonnées donne la valeur initiale de la composante de tension transitoire $\Delta u'(0)$.

La différence entre la tension déterminée par la courbe 1 et la composante de tension transitoire $\Delta u'$ donne la tension subtransitoire $\Delta u''$ pour les moments correspondants.

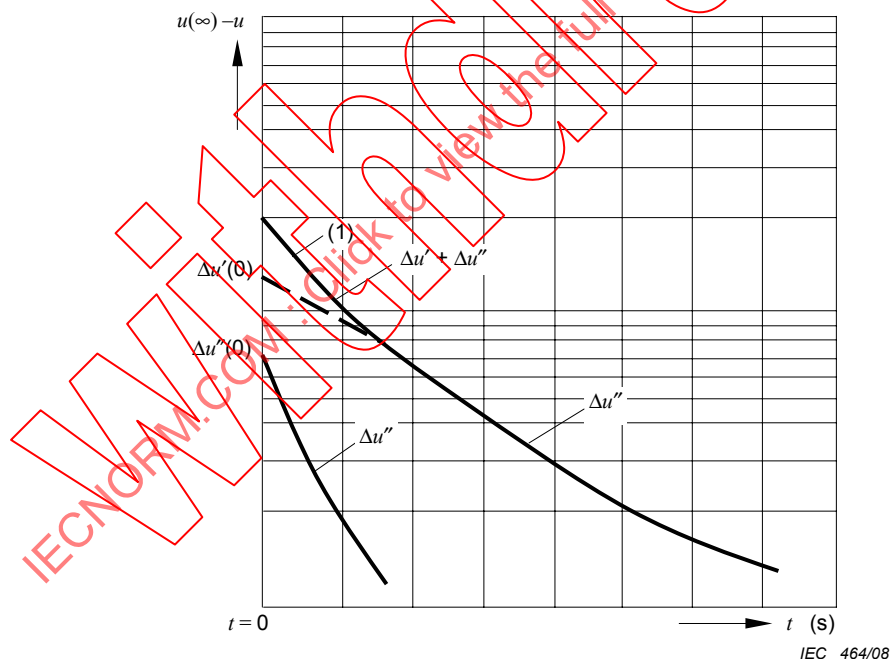


Figure 12 – Composantes transitoire et subtransitoire de la tension de rétablissement

7.1.4 Décroissance en courant continu dans l'enroulement d'induit à l'arrêt

L'essai (voir 6.15) peut être réalisé avec le rotor dans les positions longitudinale et transversale. La valeur du courant décroissant dans l'enroulement d'induit est prise comme le rapport du courant à tout moment $i(t)$ et du courant initial $i(0)$.

De même pour l'essai avec le rotor en position longitudinale, le courant décroissant induit dans l'enroulement d'excitation est considéré comme le rapport du courant décroissant induit

et du courant induit initial. Ces valeurs de courants décroissants sont représentées graphiquement en fonction du temps.

Les valeurs initiales transitoire et subtransitoire et leurs constantes de temps sont déterminées à partir de la représentation graphique semi-logarithmique des courants décroissants. Pour ce faire, une ligne droite est tracée qui passe par les points d'extrémité (Figure 13 a). L'intersection de cette droite avec l'axe des ordonnées donne l'amplitude initiale de la première exponentielle (i_{10}). Sa constante de temps (τ_1) est la valeur la plus élevée et elle est considérée comme étant le temps nécessaire pour que i_{10} décroisse jusqu'à $1/e \approx 0,368$ de sa valeur initiale.

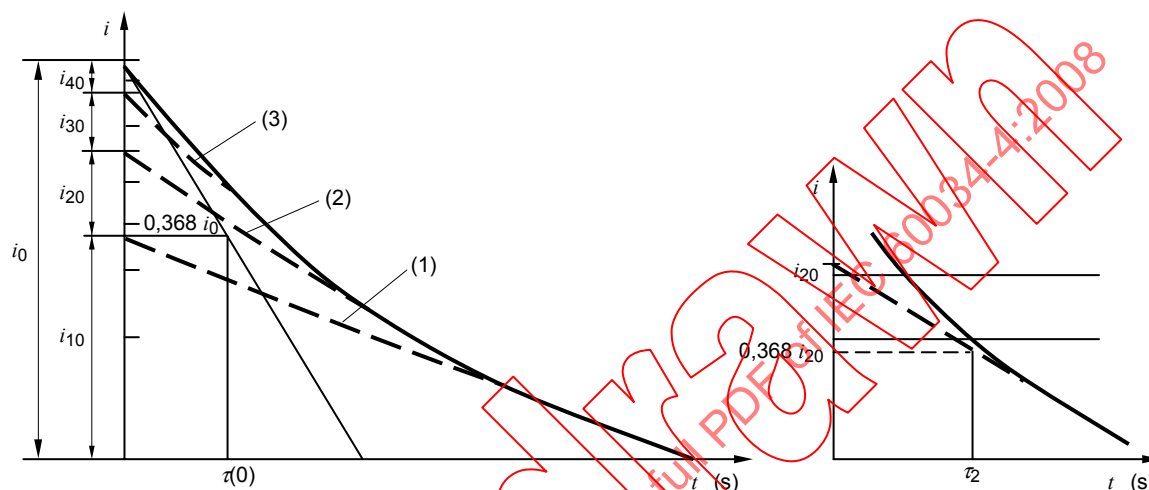


Figure 13a

IEC 465/08

Figure 13b

IEC 466/08

Figure 13 – Représentation graphique semi-logarithmique des courants décroissants

La différence entre la courbe initiale et la première exponentielle est reportée de nouveau sur une échelle semi-logarithmique et l'amplitude i_{20} et la constante de temps de la deuxième exponentielle τ_2 sont déterminées (Figure 13 b).

L'analyse de la courbe se poursuit de cette manière jusqu'au moment où il n'est plus possible d'observer la non-linéarité de la courbe décroissante.

Il convient de réaliser simultanément l'analyse du courant décroissant dans l'enroulement d'induit et celle du courant d'induit dans l'enroulement d'excitation à partir du même essai, en gardant à l'esprit l'égalité des constantes de temps τ_k et des τ_{kf} pour les rotors massifs. En procédant ainsi, on obtient une meilleure exactitude pour les caractéristiques de réponse en fréquence. Lors de l'analyse de la courbe expérimentale de décroissance du courant dans l'enroulement d'induit, il est recommandé de tracer une somme d'exponentielles aussi près que possible de la courbe expérimentale de manière à obtenir:

$$\sum_x \frac{i_{ko}}{\tau_k} = \frac{1}{\tau(0)}$$

où:

$\tau(0)$ est la constante équivalente de temps de la courbe du courant décroissant dans l'induit au moment initial.

Cette constante de temps $\tau(0)$ est obtenue en reportant la partie initiale de la courbe de décroissance sur un graphique semi-logarithmique en traçant la tangente à cette courbe à l'instant zéro (Figure 13a). La constante de temps initiale $\tau(0)$ sera trouvée le long de cette tangente comme le temps nécessaire pour que le courant décroisse de sa valeur initiale à $1/e \approx 0,368$ fois cette valeur.

NOTE Une exactitude suffisante dans l'analyse de la courbe expérimentale en exponentielles peut être obtenue en utilisant un logiciel adapté.

Les constantes de temps longitudinales des machines synchrones sont déterminées en utilisant des racines connues a_{kd} , a'_{kd} des équations caractéristiques $D_d(p) = 0$ et $D'_d(p) = 0$ (voir Annexe B) comme:

$$\tau'_d = \frac{1}{\omega a'_{1d}}; \quad \tau''_d = \frac{1}{\omega a'_{2d}}; \quad \tau'''_d = \frac{1}{\omega a'_{3d}}; \dots$$

$$\tau'_{do} = \frac{1}{\omega a_{1d}}; \quad \tau''_{do} = \frac{1}{\omega a_{2d}}; \quad \tau'''_{do} = \frac{1}{\omega a_{3d}}; \dots$$

où:

$$\omega = 2\pi f$$

De même, les constantes de temps transversales sont déterminées en utilisant des racines connues a_{kq} , a'_{kq} des équations $D_q(p) = 0$ et $D'_q(p) = 0$ (voir Annexe B) comme:

$$\tau'_q = \frac{1}{\omega a'_{1q}}; \quad \tau''_q = \frac{1}{\omega a'_{2q}}; \quad \tau'''_q = \frac{1}{\omega a'_{3q}}; \dots$$

$$\tau'_{qo} = \frac{1}{\omega a_{1q}}; \quad \tau''_{qo} = \frac{1}{\omega a_{2q}}; \quad \tau'''_{qo} = \frac{1}{\omega a_{3q}}; \dots$$

7.1.5 Essai d'application brusque de l'excitation avec l'enroulement d'induit à circuit ouvert

La différence entre la tension d'induit permanente et la tension déterminée par l'enveloppe de la tension d'induit croissante est représentée graphiquement en fonction du temps sur une échelle semi-logarithmique puis elle est extrapolée au moment de la fermeture de l'interrupteur de la connexion d'excitation (voir Figure 14). L'extrapolation de la partie droite de la courbe jusqu'à l'axe des ordonnées donne la valeur initiale de la composante transitoire $\Delta u(0)$.

NOTE Pour les grosses machines, la tension résiduelle peut généralement être négligée.

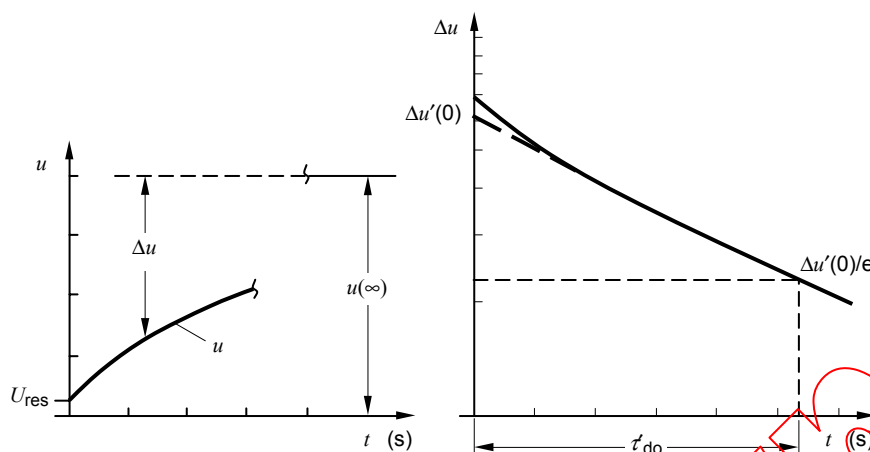


Figure 14a

Figure 14b

IEC 467/08

IEC 468/08

Figure 14 – Excitation appliquée de manière brusque avec enroulement d'induit en circuit ouvert

7.2 Réactance synchrone longitudinale

7.2.1 A partir de l'essai des valeurs de saturation à vide et de court-circuit triphasé permanent

La valeur non saturée de X_d est déterminée à partir des courbes représentées graphiquement selon 7.1.1 (voir Figure 8):

$$X_d = \frac{U_N}{\sqrt{3} I_{BC}} \left[x_d = \frac{AC}{BC} = \frac{OH}{OC} = \frac{i_{fk}}{i_{fg}} \right]$$

où:

AC représente la tension à vide prise sur la ligne d'entrefer à un courant d'excitation donné;

BC représente la valeur du courant de court-circuit permanent obtenue à partir de la caractéristique de court-circuit au même courant d'excitation.

7.2.2 A partir de l'essai de moteur à vide

Une valeur non-saturée de X_d peut être déterminée à partir de (voir Figure 8):

$$X_d = \frac{U}{\sqrt{3} I} ; \quad \left[x_d = \frac{u}{i} \right]$$

où la tension aux bornes U et le courant de l'enroulement d'induit I viennent de 6.6.

7.2.3 A partir de l'essai d'angle interne variable

Une valeur de X_d peut être déterminée à partir de:

$$X_d = \left(\frac{U}{\sqrt{3} I} \right)_{\max} ; \quad \left[x_d = \left(\frac{u}{i} \right)_{\max} \right]$$

où les valeurs proviennent de 6.7.

7.2.4 A partir de l'essai en charge avec mesure de l'angle de charge

La détermination de X_d par la méthode de la mesure de l'angle de charge (voir 6.10) est obtenue en utilisant la formule:

$$X_d = \frac{E_0 / \cos \delta - U}{\sqrt{3} I (\cos \varphi \tan \delta + \sin \varphi)} ; \quad \left[x_d = \frac{e_0 / \cos \delta - u}{i (\cos \varphi \tan \delta + \sin \varphi)} \right]$$

où:

E_0 est la tension interne synchrone correspondant au courant d'excitation pour la charge réelle. Pour déterminer E_0 , la courbe de saturation à vide (voir 6.4) est représentée graphiquement sur un schéma et, comme à la Figure 8, une droite est tracée à partir de l'origine par le point de la tension assignée. E_0 est la valeur d'ordonnée sur la droite correspondant au courant d'excitation réel sur l'abscisse.

U, I sont la tension et le courant d'induit;

φ est le déphasage, déterminé par la méthode avec deux wattmètres ou en calculant $\cos \varphi = P / (\sqrt{3} UI)$;

δ est l'angle de déphasage mesuré par la méthode stroboscopique ou par toute autre méthode précise.

NOTE 1 La formule est fondée sur le modèle de machine à deux axes, négligeant la résistance de l'induit.

NOTE 2 Dans la formule, les valeurs d'angle ont une amplitude et un signe:

L'angle de charge δ est positif dans le fonctionnement en génératrice et négatif dans le fonctionnement en moteur. L'angle de déphasage φ est dans le système de référence de la génératrice, c'est-à-dire $\varphi = 0$ ($\cos \varphi = 1$) pour la génératrice et $\varphi = \pi$ ($\cos \varphi = -1$) pour le fonctionnement en moteur, à charge réactive nulle.

7.3 Réactance transitoire longitudinale

7.3.1 A partir de l'essai de court-circuit triphasé brusque

Une valeur de X'_d peut être déterminée à partir de:

$$X'_d = \frac{U(0)}{\sqrt{3} [I(\infty) + \Delta I'_k(0)]} ; \quad \left[x'_d = \frac{u(0)}{i(\infty) + \Delta i'_k(0)} \right]$$

où:

$U(0)$ est la tension à vide, mesurée immédiatement avant le court-circuit (voir 6.12);

$I(\infty)$, $\Delta I'_k(0)$ sont déterminés selon 7.1.2.

7.3.2 A partir de l'essai de rétablissement de la tension

Une valeur de X'_d (non saturée) est déterminée à partir de:

$$X'_d = \frac{U(\infty) - \Delta U'(0)}{\sqrt{3} I_k} ; \quad \left[x'_d = \frac{u(\infty) - \Delta u'(0)}{i_k} \right]$$

où les valeurs d'entrée proviennent des données d'essai (6.13) telles qu'elles sont analysées selon 7.1.3.

7.3.3 A partir de l'essai de la décroissance en courant continu dans l'enroulement d'induit à l'arrêt

Calculer:

$$x'_d = \frac{1}{\frac{1}{x_d} + C_{1d}}$$

où C_{1d} est tel qu'à l'Annexe B. Le calcul de x_d est indiqué en 7.1.4.

7.3.4 Calcul à partir des valeurs d'essai

Les grandeurs x'_d , x_d , τ'_{do} et τ'_d sont liées entre elles par la formule suivante:

$$x_d \cdot \tau'_d = x'_d \cdot \tau'_{do}$$

Cette relation est utilisée pour la détermination de x'_d à partir des valeurs connues de x_d , τ'_d et τ'_{do} .

7.4 Réactance subtransitoire longitudinale

7.4.1 A partir de l'essai de court-circuit triphasé brusque

La réactance subtransitoire X''_d , telle qu'elle est déterminée à partir de l'essai de court-circuit brusque, est le rapport de la tension à vide, mesurée immédiatement avant le court-circuit, sur la valeur initiale de la composante périodique du courant de court-circuit, obtenue à partir de l'analyse de l'oscillogramme (selon 7.1.2, Figure 9):

$$X''_d = \frac{U(0)}{\sqrt{3}} \frac{1}{[I(\infty) + \Delta I'_k(0) + \Delta I''_k(0)]} ; \quad \left[x''_d = \frac{u(0)}{i(\infty) + \Delta i'_k(0) + \Delta i''_k(0)} \right]$$

7.4.2 A partir de l'essai de rétablissement de la tension

La réactance subtransitoire X''_d est déterminée à partir de l'essai de rétablissement de la tension comme le rapport de la différence entre la tension permanente $u(\infty)$ et la somme des valeurs initiales des composantes de tension transitoire $\Delta u'(0)$ et subtransitoire $\Delta u''(0)$ du courant d'induit (i_k) mesurées immédiatement avant la déconnexion du court-circuit.

$$X''_d = \frac{U(\infty) - [\Delta u'(0) + \Delta u''(0)]}{\sqrt{3} I_k} ; \quad \left[x''_d = \frac{u(\infty) - [\Delta u'(0) + \Delta u''(0)]}{i_k} \right]$$

où les valeurs d'entrée proviennent des données d'essai (voir 6.13) telles qu'elles sont analysées selon 7.1.3.

7.4.3 A partir de l'essai de tension appliquée avec rotor longitudinal et transversal

La réactance subtransitoire X''_d obtenue à partir de l'essai de tension appliquée est déterminée en utilisant la formule:

$$X''_d = \sqrt{Z''_d{}^2 - R_d{}^2}$$

où $Z''_d = \frac{U}{2I} ; R_d = \frac{P}{2I^2} ; \left[x''_d = \sqrt{z''_d{}^2 - r_d{}^2} ; z''_d = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{u}{i} ; r_d = \frac{3}{2} \cdot \frac{p}{i^2} \right]$

Les valeurs de tension U , de courant I et de puissance d'entrée P , mesurées pour la position du rotor qui donne le courant maximal d'enroulement d'excitation, sont conformes à 6.17.

7.4.4 A partir de l'essai d'application de tension dans une position arbitraire du rotor

La réactance subtransitoire X''_d obtenue à partir de l'essai d'application d'une tension (selon 6.18) dans une position arbitraire quelconque du rotor est déterminée comme suit.

La réactance subtransitoire longitudinale est calculée (en valeurs réduites ou en grandeurs physiques) avec la formule suivante:

$$x''_d = x_{av} \pm \Delta x$$

$$\text{où } x_{av} = \frac{x_{12} + x_{23} + x_{31}}{3} ; \quad \Delta x = \frac{2}{3} \sqrt{x_{12}(x_{12} - x_{23}) + x_{23}(x_{23} - x_{31}) + x_{31}(x_{31} - x_{12})}$$

Les réactances x_{12} , x_{23} et x_{31} entre chaque paire des bornes de ligne de l'enroulement d'induit sont calculées à partir des formules données en 7.4.3 (en remplaçant l'indice "d" par les indices 12, 23 et 31 selon les bornes entre lesquelles la tension est appliquée).

Le signe qui précède Δx est plus (+), si le plus grand des trois courants mesurés du circuit-circuit d'excitation correspond à la plus grande réactance mesurée de l'induit; ce signe est moins (–), si le plus grand des trois courants mesurés du circuit d'excitation correspond à la plus petite réactance mesurée de l'induit entre une paire de bornes de ligne de l'enroulement de l'induit.

7.5 Réactance synchrone transversale

7.5.1 A partir de l'essai d'excitation négative

La détermination de X_q à partir de l'essai d'excitation négative de 6.9 se fait selon la formule suivante:

$$x_q = (x_d) \cdot \frac{u_r}{u_r + (e)}$$

où

(e) est la f.é.m à vide déterminée pour le courant d'excitation i_{fr} pour lequel la machine glisse d'un pôle; elle est déterminée au moyen de la caractéristique de saturation à vide rectifiée soit une droite joignant l'origine au point de la caractéristique à vide qui correspond à la tension au moment où la machine glisse d'un pôle (voir Figure 15);

u_r est la tension au moment où la machine glisse d'un pôle;

(x_d) est la réactance synchrone longitudinale déterminée par la même caractéristique de saturation à vide rectifiée.

Si le courant d'induit i_r auquel la machine glisse d'un pôle est mesuré au cours de l'essai, x_q est déterminé en utilisant la formule:

$$X_q = \frac{U_r}{\sqrt{3} I_r} ; \quad \left[x_q = \frac{u_r}{i_r} \right]$$

La valeur de x_q obtenue à partir de cet essai peut, selon la valeur de u_r , inclure la saturation. Pour obtenir une valeur non saturée, la tension appliquée doit être réduite à 0,6 de la valeur assignée ou à une valeur inférieure.