

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Rotating electrical machines –
Part 4-1: Methods for determining electrically excited synchronous machine
quantities from tests**

**Machines électriques tournantes –
Partie 4-1: Méthodes pour la détermination, à partir d'essais, des grandeurs
des machines synchrones à excitation électrique**



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2018 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 l'IEC ou du Comité national de l'IEC du pays du demandeur. Si vous avez des questions sur le copyright de l'IEC ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de l'IEC de votre pays de résidence.

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

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

About the IEC

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

About IEC publications

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

IEC Catalogue - webstore.iec.ch/catalogue

The stand-alone application for consulting the entire bibliographical information on IEC International Standards, Technical Specifications, Technical Reports and other documents. Available for PC, Mac OS, Android Tablets and iPad.

IEC publications search - webstore.iec.ch/advsearchform

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 It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing 21 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in 16 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

IEC Glossary - std.iec.ch/glossary

67 000 electrotechnical terminology entries in English and French extracted from the Terms and Definitions clause of IEC publications issued since 2002. Some entries have been collected from earlier publications of IEC TC 37, 77, 86 and CISPR.

IEC Customer Service Centre - webstore.iec.ch/csc

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

A propos de l'IEC

La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) 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 IEC

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

Catalogue IEC - webstore.iec.ch/catalogue

Application autonome pour consulter tous les renseignements bibliographiques sur les Normes internationales, Spécifications techniques, Rapports techniques et autres documents de l'IEC. Disponible pour PC, Mac OS, tablettes Android et iPad.

Recherche de publications IEC - webstore.iec.ch/advsearchform

La recherche avancée permet de trouver des publications IEC en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...). Elle donne aussi des informations sur les projets et les publications remplacées ou retirées.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne de termes électroniques et électriques. Il contient 21 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 16 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

Glossaire IEC - std.iec.ch/glossary

67 000 entrées terminologiques électrotechniques, en anglais et en français, extraites des articles Termes et Définitions des publications IEC parues depuis 2002. Plus certaines entrées antérieures extraites des publications des CE 37, 77, 86 et CISPR de l'IEC.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

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

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



**Rotating electrical machines –
Part 4-1: Methods for determining electrically excited synchronous machine
quantities from tests**

**Machines électriques tournantes –
Partie 4-1: Méthodes pour la détermination, à partir d'essais, des grandeurs
des machines synchrones à excitation électrique**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 29.160.01

ISBN 978-2-8322-5634-3

**Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor.
Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.**

CONTENTS

FOREWORD.....	6
1 Scope	8
2 Normative references	8
3 Terms and definitions	8
4 Symbols and units	14
5 Overview of tests	15
6 Test procedures	17
6.1 General.....	17
6.1.1 Instrumentation requirements	17
6.1.2 Excitation system requirements	18
6.1.3 Test conditions	18
6.1.4 Per unit base quantities	18
6.1.5 Conventions and assumptions	19
6.1.6 Consideration of magnetic saturation	19
6.2 Direct measurements of excitation current at rated load.....	20
6.3 Direct-current winding resistance measurements	21
6.4 No-load saturation test.....	21
6.4.1 Test procedure	21
6.4.2 No-load saturation characteristic determination	22
6.5 Sustained three-phase short-circuit test.....	22
6.5.1 Test procedure	22
6.5.2 Three-phase sustained short-circuit characteristic	22
6.6 Motor no-load test.....	23
6.7 Over-excitation test at zero power-factor	23
6.8 Negative excitation test.....	23
6.9 On-load test measuring the load angle	23
6.10 Low slip test.....	24
6.11 Sudden three-phase short-circuit test.....	24
6.12 Voltage recovery test	25
6.13 Suddenly applied short-circuit test following disconnection from line	25
6.14 Direct current decay test in the armature winding at standstill	26
6.15 Applied voltage test with the rotor in direct and quadrature axis positions	26
6.16 Applied voltage test with the rotor in arbitrary position	27
6.17 Single phase voltage test applied to the three phases	28
6.18 Line-to-line sustained short-circuit test.....	28
6.19 Line-to-line and to neutral sustained short-circuit test	28
6.20 Negative-phase sequence test	29
6.21 Field current decay test, with the armature winding open-circuited	29
6.21.1 Test at rated speed.....	29
6.21.2 Test at standstill	30
6.22 Applied voltage test with rotor removed	30
6.23 No-load retardation test	31
6.24 Locked rotor test.....	31
6.25 Asynchronous operation during the low-voltage test.....	31
6.26 Over-excitation test at zero power factor and variable armature voltage	32
6.27 Applied variable frequency voltage test at standstill	32

7	Determination of quantities	34
7.1	Analysis of recorded data	34
7.1.1	No-load saturation and three-phase, sustained short-circuit curves	34
7.1.2	Sudden three-phase short-circuit test	35
7.1.3	Voltage recovery test	38
7.1.4	Direct current decay in the armature winding at standstill	39
7.1.5	Suddenly applied excitation test with armature winding open-circuited	41
7.2	Direct-axis synchronous reactance	41
7.2.1	From no-load saturation and three-phase sustained short-circuit test	41
7.2.2	From motor no-load test	41
7.2.3	From on-load test measuring the load angle	42
7.3	Direct-axis transient reactance	42
7.3.1	From sudden three-phase short-circuit test	42
7.3.2	From voltage recovery test	42
7.3.3	From DC decay test in the armature winding at standstill	43
7.3.4	Calculation from test values	43
7.4	Direct-axis sub-transient reactance	43
7.4.1	From sudden three-phase short-circuit test	43
7.4.2	From voltage recovery test	43
7.4.3	From applied voltage test with the rotor in direct and quadrature axis	43
7.4.4	From applied voltage test with the rotor in arbitrary position	44
7.5	Quadrature-axis synchronous reactance	44
7.5.1	From negative excitation test	44
7.5.2	From low slip test	45
7.5.3	From on-load test measuring the load angle	46
7.6	Quadrature-axis transient reactance	47
7.6.1	From direct current decay test in the armature winding at standstill	47
7.6.2	Calculation from test values	47
7.7	Quadrature-axis sub-transient reactance	47
7.7.1	From applied voltage test with the rotor in direct and quadrature position	47
7.7.2	From applied voltage test with the rotor in arbitrary position	47
7.8	Zero-sequence reactance	48
7.8.1	From single-phase voltage application to the three phases	48
7.8.2	From line-to-line and to neutral sustained short-circuit test	48
7.9	Negative-sequence reactance	48
7.9.1	From line-to-line sustained short-circuit test	48
7.9.2	From negative-phase sequence test	49
7.9.3	Calculation from test values	49
7.9.4	From direct-current decay test at standstill	49
7.10	Armature leakage reactance	50
7.11	Potier reactance	50
7.12	Zero-sequence resistance	51
7.12.1	From single-phase voltage test applied to the three phases	51
7.12.2	From line-to-line and to neutral sustained short-circuit test	51
7.13	Positive-sequence armature winding resistance	52
7.14	Negative-sequence resistance	52
7.14.1	From line-to-line sustained short-circuit test	52
7.14.2	From negative-phase sequence test	52

7.15	Armature and excitation winding resistance	52
7.16	Direct-axis transient short-circuit time constant	53
7.16.1	From sudden three-phase short-circuit test	53
7.16.2	From direct current decay test at standstill	53
7.17	Direct-axis transient open-circuit time constant	53
7.17.1	From field current decay at rated speed with armature winding open	53
7.17.2	From field current decay test at standstill with armature winding open	53
7.17.3	From voltage recovery test	54
7.17.4	From direct-current decay test at standstill	54
7.18	Direct-axis sub-transient short-circuit time constant	54
7.19	Direct-axis sub-transient open-circuit time constant	54
7.19.1	From voltage recovery test	54
7.19.2	From direct-current decay test at standstill	54
7.20	Quadrature-axis transient short-circuit time constant	54
7.20.1	Calculation from test values	54
7.20.2	From direct-current decay test at standstill	54
7.21	Quadrature-axis transient open-circuit time constant	54
7.22	Quadrature-axis sub-transient short-circuit time constant	54
7.22.1	Calculation from test values	54
7.22.2	Determination from direct-current decay test at standstill	55
7.23	Quadrature-axis sub-transient open-circuit time constant	55
7.24	Armature short-circuit time constant	55
7.24.1	From sudden three-phase short-circuit test	55
7.24.2	Calculation from test values	55
7.25	Rated acceleration time and stored energy constant	55
7.26	Rated excitation current	56
7.26.1	From direct measurement	56
7.26.2	Potier diagram	56
7.26.3	ASA diagram	57
7.26.4	Swedish diagram	58
7.27	Excitation current referred to rated armature sustained short-circuit current	59
7.27.1	From sustained three-phase short-circuit test	59
7.27.2	From over-excitation test at zero power factor	59
7.28	Frequency response characteristics	60
7.28.1	General	60
7.28.2	From asynchronous operation at reduced voltage	61
7.28.3	From applied variable frequency voltage test at standstill	61
7.28.4	From direct current decay test in the armature winding at standstill	63
7.29	Short-circuit ratio	63
7.30	Rated voltage regulation	63
7.30.1	From direct measurement	63
7.30.2	From no-load saturation characteristic and known field current at rated load	63
7.31	Initial starting impedance of synchronous motors	64
Annex A (informative)	Testing cross-reference	65
Annex B (informative)	Calculation scheme for frequency response characteristics	68
B.1	Basics	68
B.2	Parameter calculation	68
Annex C (informative)	Conventional electrical machine model	70

Bibliography.....	72
Figure 1 – Schematic for DC decay test at standstill	26
Figure 2 – Circuit diagram for line-to-line short-circuit test	28
Figure 3 – Circuit diagram for line-to-line and to neutral sustained short-circuit test.....	29
Figure 4 – Search coil installation with rotor removed	30
Figure 5 – Power and current versus slip (example).....	32
Figure 6 – Schematic for variable frequency test at standstill	33
Figure 7 – Recorded quantities from variable frequency test at standstill (example).....	34
Figure 8 – Combined saturation and short-circuit curves	35
Figure 9 – Determination of intermediate points on the envelopes.....	35
Figure 10 – Determination of transient component of short-circuit current	37
Figure 11 – Determination of sub-transient component of short-circuit current	37
Figure 12 – Transient and sub-transient component of recovery voltage	39
Figure 13 – Semi-logarithmic plot of decay currents	40
Figure 14 – Suddenly applied excitation with armature winding open-circuited	41
Figure 15 – No-load e.m.f. and excitation current for one pole-pitch slip	45
Figure 16 – Current envelope from low-slip test	46
Figure 17 – Determination of Potier reactance	51
Figure 18 – Potier's diagram	56
Figure 19 – ASA diagram	57
Figure 20 – Swedish diagram.....	58
Figure 21 – Excitation current from over-excitation test at zero power factor.....	60
Figure 22 – Frequency response characteristics at low frequencies (example).....	61
Figure C.1 – Equivalent circuit model of a salient pole machine	70
Table 1 – Test methods and cross-reference table.....	15
Table A.1 – Test cross-reference	65

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

ROTATING ELECTRICAL MACHINES –

Part 4-1: Methods for determining electrically excited 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 itself does not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC is not responsible for any services carried out by independent certification bodies.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 60034-4-1 has been prepared by IEC technical committee 2: Rotating machinery.

IEC 60034-4-1 first edition cancels and replaces the third edition of IEC 60034-4 published in 2008. This edition constitutes a technical revision.

This publication includes the following significant technical changes with respect to IEC 60034-4 edition 3:

- a) improvement of several procedures with respect to evaluation of quantities;
- b) deletion of uncommon procedures;
- c) applicability of procedures for permanent magnet machines.

The text of this International Standard is based on the following documents:

CDV	Report on voting
2/1829/CDV	2/1869/RVC

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

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

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

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

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

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

ROTATING ELECTRICAL MACHINES –

Part 4-1: Methods for determining electrically excited synchronous machine quantities from tests

1 Scope

This part of IEC 60034 applies to three-phase synchronous machines of 1 kVA rating and larger.

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 should be taken against irreversible demagnetization.

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

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

2 Normative references

The following documents are referred to in the text in such a way that some or all of their content constitutes requirements 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 60034-1:2017, *Rotating electrical machines – Part 1: Rating and performance*

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

IEC 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.

ISO and IEC maintain terminological databases for use in standardization at the following addresses:

- IEC Electropedia: available at <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: available at <http://www.iso.org/obp>

3.1

<synchronous motors> initial starting impedance

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

3.2

direct-axis synchronous reactance

quotient of the sustained value of that fundamental AC 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 AC component of this current, the machine running at rated speed

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 411-50-07]

3.3

direct-axis transient reactance

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

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 411-50-09]

3.4

direct-axis sub-transient reactance

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

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 411-50-11]

3.5

quadrature-axis synchronous reactance

quotient of the sustained value of that fundamental AC 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 AC component of this current, the machine running at rated speed

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 411-50-08]

3.6

quadrature-axis transient reactance

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

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 411-50-10]

3.7

quadrature-axis sub-transient reactance

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

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 411-50-12]

3.8

positive sequence reactance

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

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 411-50-14]

3.9

negative sequence reactance

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

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 411-50-15]

3.10

zero sequence reactance

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

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 411-50-16]

3.11

Potier reactance

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

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 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, referred 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, referred to a certain winding temperature

3.15

positive sequence resistance

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

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 411-50-18]

3.16**negative sequence resistance**

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

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 411-50-19]

3.17**zero sequence resistance**

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

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 411-50-20]

3.18**short-circuit ratio**

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

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 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

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 411-48-27]

3.20**direct-axis transient short-circuit time constant**

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

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 411-48-28]

3.21**direct-axis sub-transient open-circuit time constant**

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

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 411-48-29]

3.22**direct-axis sub-transient short-circuit time constant**

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

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 411-48-30]

3.23

quadrature-axis transient open-circuit time constant

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

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 411-48-32]

3.24

quadrature-axis transient short-circuit time constant

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

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 411-48-33]

3.25

quadrature-axis sub-transient open-circuit time constant

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

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 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

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

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 411-48-35]

3.29

short-circuit time constant of armature windings

time required, following a sudden change in operating conditions, for the DC 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

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 411-48-31]

3.30**unit acceleration time**

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

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 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**

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**

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 (phasor) 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 1 to entry. 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 document.

3.37**frequency response characteristic of quadrature-axis reactance**

complex quotient expressed as a slip function of the sustained phasor 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 phasor 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

4 Symbols and units

f	Frequency
f_N	Rated frequency
$G(j\omega)$	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
Z_{st}	Initial starting impedance of a synchronous motors
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'_{q0}	Quadrature-axis transient open-circuit time constant
τ''_d	Direct-axis sub-transient short-circuit time constant
τ''_{d0}	Direct-axis sub-transient open-circuit time constant
τ''_q	Quadrature-axis sub-transient short-circuit time constant
τ''_{q0}	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	
	7.2.3	On-load measuring the load angle	6.9	
Direct-axis transient reactance X'_d	7.3.1	Sudden three-phase short-circuit	6.11	Preferred
	7.3.2	Voltage recovery	6.12	
	7.3.3	DC decay in the armature winding at standstill	6.14	
	7.3.4	Calculation from test values	-	
Direct-axis sub-transient reactance X''_d	7.4.1	Sudden three-phase short-circuit	6.11	Preferred
	7.4.2	Voltage recovery	6.12	
	7.4.3	Applied voltage test with rotor in direct and quadrature axis	6.15	
	7.4.4	Applied voltage with the rotor in arbitrary position	6.16	
Quadrature axis synchronous reactance X_q	7.5.1	Negative excitation	6.8	Preferred (unsaturated)
	7.5.2	Low slip	6.10	
	7.5.3	On-load measuring the load angle	6.9	
Quadrature-axis transient reactance X'_q	7.6.1	DC decay test at standstill	6.14	
	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	6.15	Preferred
	7.7.2	Applied voltage with the rotor in arbitrary position	6.16	

Quantity	Clause	Test description	Test	Preference/ uncertainty
Zero-sequence reactance $X_{(0)}$	7.8.1	Single-phase voltage application to the three phases	6.17	Preferred
	7.8.2	Line-to-line and to neutral sustained short-circuit	6.19	
Negative-sequence reactance $X_{(2)}$	7.9.1	Line-to-line sustained short-circuit	6.18	Preferred
	7.9.2	Negative-phase sequence	6.20	
	7.9.3	Calculation from test values	-	
	7.9.4	DC decay in the armature winding at standstill	6.14	
Armature leakage reactance X_{σ}	7.10	Rotor removed	6.22	
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	6.17	Preferred
	7.12.2	Line-to-line and to neutral sustained short-circuit	6.19	
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	6.18	Preferred
	7.14.2	Negative-phase sequence	6.20	
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	
Time constants				
Direct-axis transient short-circuit time constant τ'_d	7.16.1	Sudden three-phase short-circuit	6.11	Preferred
	7.16.2	DC decay in the armature winding at standstill	6.14	
Direct-axis transient open-circuit time constant τ'_{do}	7.17.1	Field current decay, with the armature winding open-circuited, at rated speed	6.21.1	Preferred
	7.17.2	Field current decay, with the armature winding open-circuited, at standstill	6.21.2	
	7.17.3	Voltage recovery	6.12	
	7.17.4	DC decay in the armature winding at standstill	6.14	
Direct-axis sub-transient short-circuit time constant τ''_d	7.18	Sudden three-phase short-circuit	6.11	
Direct-axis sub-transient open-circuit time constant τ''_{do}	7.19.1	Voltage recovery	6.12	Preferred
	7.19.2	DC decay in the armature winding at standstill	6.14	
Quadrature-axis transient short-circuit time constant τ'_q	7.20.1	Calculation from test values	-	Preferred
	7.20.2	DC decay in the armature winding at standstill	6.14	
Quadrature-axis transient open-circuit time constant τ'_{qo}	7.21	DC decay in the armature winding at standstill	6.14	

Quantity	Clause	Test description	Test	Preference/ uncertainty
Quadrature-axis sub-transient short-circuit time constant τ''_q	7.22.1	Calculation from test values	-	Preferred
	7.22.2	DC decay in the armature winding at standstill	6.14	
Quadrature-axis sub-transient open-circuit time constant τ''_{qo}	7.23	DC decay in the armature winding at standstill	6.14	
Armature short-circuit time constant τ_a	7.24.1	Sudden three-phase short-circuit	6.11	Preferred
	7.24.2	Calculation from test values	-	
Other quantities				
Unit acceleration time τ_J , stored energy constant H	7.25	No-load retardation	6.23	Preferred
Rated excitation current i_{fN}	7.26.1	Direct measurement	6.2	Preferred
	7.26.2	Potier diagram	-	
	7.26.3	ASA diagram	-	
	7.26.4	Swedish diagram	-	
Excitation current, at rated armature short-circuit current i_{fk}	7.27.1	Sustained three-phase short-circuit test	6.5	Preferred
	7.27.2	Over-excitation at zero power-factor and variable armature winding voltage	6.26	
Frequency response characteristics	7.28.2	Asynchronous operation at reduced voltage	6.25	Preferred
	7.28.3	Applied variable frequency voltage at standstill	6.27	
	7.28.4	DC decay in the armature winding at standstill	6.14	
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	Direct measurement	6.2	Preferred
	7.30.2	By diagram from no-load saturation characteristic and known i_{fN}	6.4.2	
Initial starting impedance of synchronous motors Z_{st}	7.31	Locked rotor	6.24	

6 Test procedures

6.1 General

6.1.1 Instrumentation requirements

Digital instruments shall be used whenever possible.

The 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 DC resistances shall have an accuracy class of at least 0,2.

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

6.1.2 Excitation system requirements

In the 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 can give results different from those obtained with 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 document, shall correspond to an equivalent star-connected winding.

6.1.4 Per unit base quantities

All formulas 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 document. Small letters designate the quantities in per unit values, and capital letters designate physical quantities.

In the formulae given in this document 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 document, 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 document 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 time function 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.

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 This document provides methods to determine the quadrature axis transient parameters $X_q', \tau_q', \tau_{qo}'$ (see 6.14), 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 document, 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 AC 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 test permits 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 method of sudden three-phase short-circuit is preferred. It permits saturated and unsaturated values of X'_d to be determined.

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.

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. If the time constant τ_a is less than one fundamental cycle, its value is determined from the decrease of the aperiodic (DC) 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.

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 an automatic system may differ from that when the machine is separately excited (especially in machines with a static excitation system).

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

6.3 Direct-current winding resistance measurements

The resistance shall be measured according to IEC 60034-2-1.

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

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 60034-1:2017); 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.

For machines with ratings equal and above 10 MVA, the voltage should be limited to 1,2 rated voltage.

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

It is preferred to conduct test a) with a DC calibrated prime-mover or a torquemeter, 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.

This test is not applicable for permanent magnet machines.

6.4.2 No-load saturation characteristic determination

Represent 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 by multiplying the measured voltages with the ratio rated frequency to test 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) 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 DC 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.

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.

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.

This test is not applicable for permanent magnet machines.

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).

Represent 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 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, if rated excitation current is not exceeded significantly.

This test is not applicable for permanent magnet machines.

6.8 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.

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

This test is not applicable for permanent magnet machines.

6.9 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.

6.10 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. 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).

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

6.11 Sudden three-phase short-circuit test

This test is conducted with running the machine at rated speed initially. 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.

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 DC component is not of importance. Use either non-inductive shunts or suitable current transformers to measure the short-circuit current. The latter should be used in dealing with AC 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 For machines with rated frequencies less than 60 Hz, DC shunts can be used.

Recording should continue for a time interval not less than $3\tau'_d$ after short-circuiting and the steady state values should also be recorded following the establishment of steady conditions. 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 represented against the initial values of AC 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 represented 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 the time functions of the armature current in each phase and excitation current during the short-circuiting period. The data are analysed according to 7.1.2.

This test can be applied to permanent magnet machines, if the design is safe against demagnetization of the magnets.

6.12 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. Records of the time functions of one line-to-line voltage recovery and one armature current are required.

NOTE This test can be performed in a brushless machine if it is equipped with temporary slip-rings (excitation from separate exciter) or if the machine can 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 the time function of the armature current in each phase and excitation current after switching off the short-circuit.

Data are analysed according to 7.1.3.

This test is suitable but not relevant for permanent magnet machines.

6.13 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 6.11.

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.

6.14 Direct current decay test in the armature winding at standstill

The DC 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.

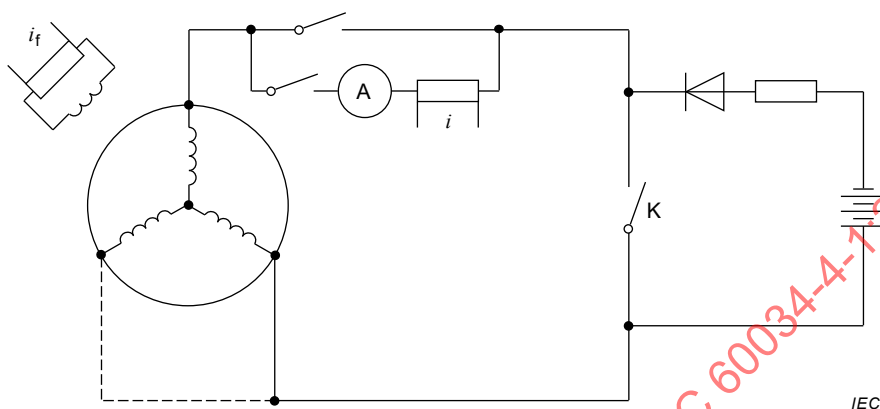


Figure 1 – Schematic for DC decay test at standstill

The resistance of the 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 DC 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 whole decay current should be carried out.

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 versus time. 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 versus time. The same applies to the test with the rotor position along the d-axis, with the excitation winding open-circuited.

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

Data are analysed according to 7.1.4.

This test is partly suitable for permanent magnet machines.

6.15 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.

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 ($0,2 I_N$ to $0,7 I_N$).

The quantities are represented 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.

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

This test is not applicable for permanent magnet machines.

6.16 Applied voltage test with the rotor in arbitrary position

To conduct the test, AC 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.

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 AC 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 6.15.

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

This test is suitable but not relevant for permanent magnet machines.

6.17 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 .

This test is not applicable for permanent magnet machines.

6.18 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.

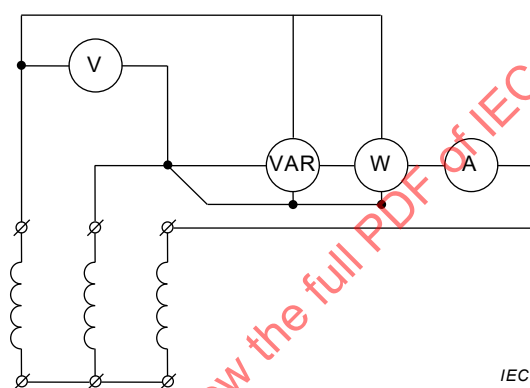


Figure 2 – Circuit diagram for line-to-line short-circuit test

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

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.

This test is partly suitable for permanent magnet machines.

6.19 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).

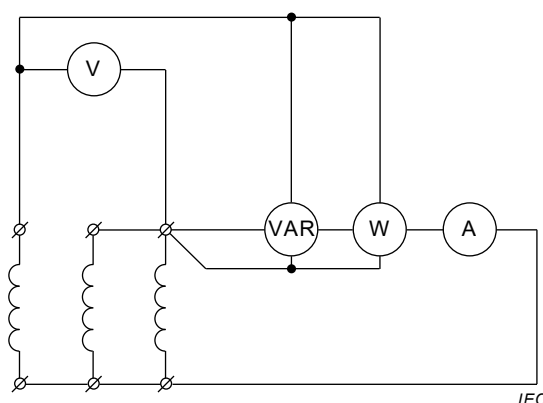


Figure 3 – Circuit diagram for line-to-line and to neutral sustained short-circuit test

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.

This test is partly suitable for permanent magnet machines.

6.20 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.

This test is not applicable for permanent magnet machines.

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

6.21.1 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 can be connected in series with its excitation winding to limit the DC supply short-circuit current.

Record the time function 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 time function and the residual voltage of the machine is represented against time on a semi-log scale.

This test is not applicable for permanent magnet machines.

6.21.2 Test at standstill

With the machine at standstill; the armature winding open-circuited; the excitation winding fed from a separate DC 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 can be connected in series with its excitation winding to limit the DC supply short-circuit current.

Record the time function of the excitation winding current, and represent against time on a semi-log scale.

This test is not applicable for permanent magnet machines.

6.22 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).

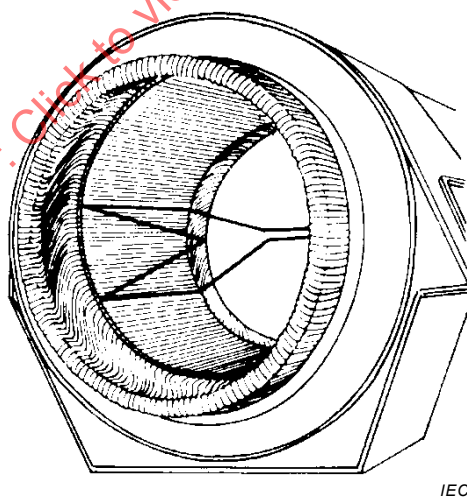


Figure 4 – Search coil installation with rotor removed

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.

This test is suitable for permanent magnet machines.

6.23 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.

This test is suitable for permanent magnet machines.

6.24 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).

This test is not applicable for permanent magnet machines.

6.25 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 transient 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).

This test is not applicable for permanent magnet machines.

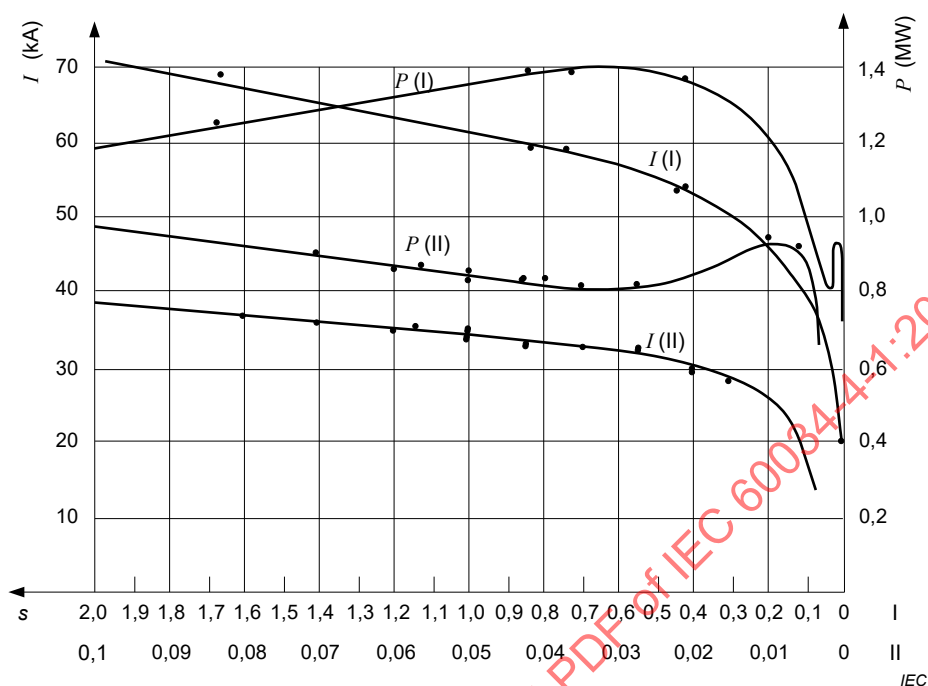


Figure 5 – Power and current versus slip (example)

6.26 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.

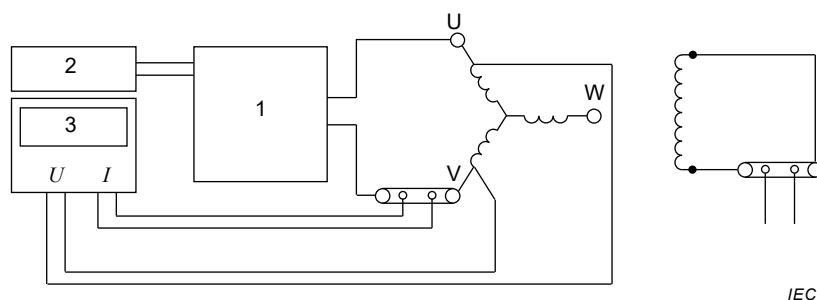
During the test, armature winding current is kept constant and equal to the rated value, armature voltage is varied from at least rated value down to the lowest value at which the machine remains stable. For reasonable accuracy, it is recommended that armature voltage should be decreased below 0,5 times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

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

This test is not applicable for permanent magnet machines.

6.27 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

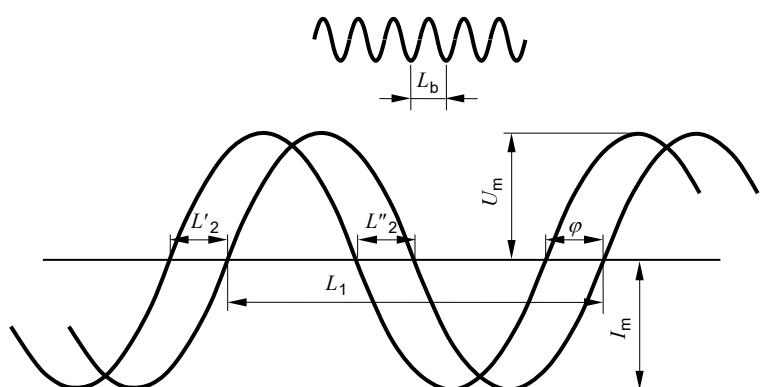
During the test, the rotor is oriented once in such a position as to have maximum current induced in the excitation winding (direct axis), and once to have minimum (practically zero) induced current (quadrature axis).

Supply voltage, armature winding current and phase angle between them are measured and recorded; for determination from a time function, see Figure 7.

Excitation winding current is recorded only for the purpose of the rotor position evaluation. For permanent magnet machines the rotor position has to be determined by other means.

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 DC current in the same armature winding superimposed on low-frequency current in such a way that the peak value of AC current is below the value of direct current. At all frequencies, the values of alternating and direct current should be about the same.



IEC

Key

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

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.

The inaccuracies may be considerably reduced if the armature circuit resistance voltage drop is compensated during the test.

The voltage drop in the shunt and the auxiliary resistance, proportional to the measuring current, then has to be subtracted from the voltage at the armature winding terminals.

7 Determination of quantities

7.1 Analysis of recorded data

7.1.1 No-load saturation and three-phase, sustained short-circuit curves

The data from 6.4.2 (No-load saturation characteristic) and 6.5.2 (Sustained short-circuit characteristic) are represented in a set of curves according to Figure 8.

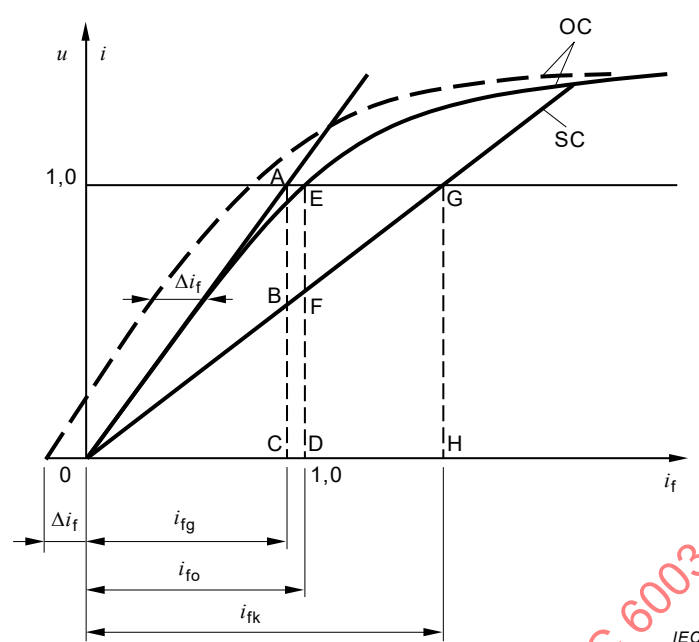


Figure 8 – Combined saturation and short-circuit curves

The curves are used for determining direct axis synchronous reactance (7.2.1, 7.2.2) and short circuit ratio (7.29).

7.1.2 Sudden three-phase short-circuit test

The change with time of aperiodic and periodic armature current components in each phase is determined from the recordings of the three-phase short-circuit currents versus time (see 6.11).

Therefore, the envelopes of the short circuit currents have to be determined, which are running through the peaks of the oscillating phase currents.

The peaks on the upper and lower envelopes are not corresponding (see Figure 9). Corresponding intermediate points shall be calculated on both envelopes. For calculating the corresponding intermediate points on the envelopes, a suitable interpolation algorithm should be used.

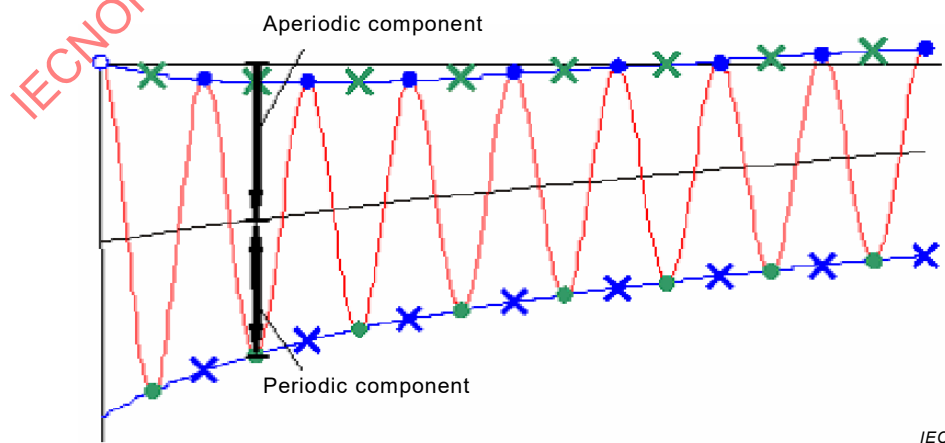


Figure 9 – Determination of intermediate points on the envelopes

The course of the aperiodic component of a phase current is obtained by adding the current values of the upper and lower envelope and dividing by 2. The initial values are found by extrapolation to the moment of short-circuit, $t = 0$.

The course of the periodic component of a phase current is obtained by subtracting the current values of the upper and lower envelope and dividing by 2. The initial values are found by extrapolation to the moment of short-circuit, $t = 0$.

Armature current periodic component at short-circuit is determined as a mean arithmetic value of the periodic components of the current envelopes of the three phases.

The sustained short-circuit current $i(\infty)$ is to be evaluated as an average value of several successive amplitudes for the thoroughly decayed periodic short-circuit current or from the three-phase sustained short-circuit test of 6.5.

To determine the transient ($\Delta i'_k$) current component, the value of the sustained short-circuit current $i(\infty)$ is subtracted from the armature current periodic component.

For determination of the transient component ($\Delta i'_k$) the natural logarithm is applied to the remaining transient envelope of the periodic current values over a time interval between 5 times the approximate subtransient time constant τ''_d (or 0,2 s) and the approximate transient time constant τ'_d . The transient time constant is the inverse of the representative initial gradient of the logarithmized transient current. Intersection point of the representative straight line with the initial gradient and the ordinate axis of the diagram allows for calculating the initial transient current ($\Delta i'_k$) (see Figure 10).

To determine the sub-transient ($\Delta i''_k$) component, the values of the transient ($\Delta i'_k$) and the sustained short-circuit current $i(\infty)$ are subtracted from the armature current periodic component.

For determination of the sub-transient component ($\Delta i''_k$), the natural logarithm is applied to the remaining sub-transient envelope of the periodic current values within a time frame limited by the maximum time of $2 \times \tau''_d$. The subtransient time constant is the inverse of the representative initial gradient of the logarithmized subtransient current values. Intersection point of the representative straight line with the initial gradient and the ordinate axis of the diagram allows for calculating the initial subtransient current ($\Delta i''_k$) (see Figure 11).

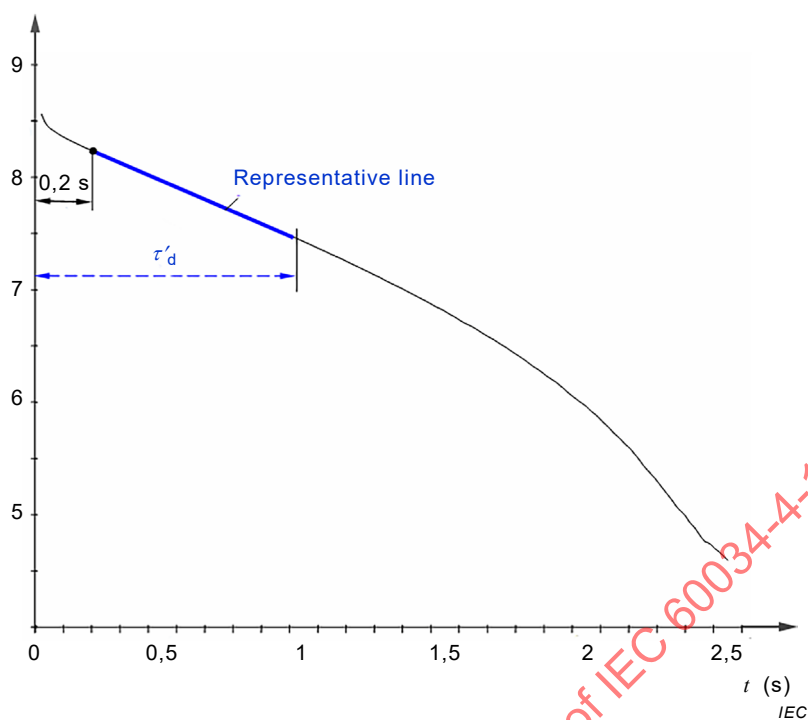


Figure 10 – Determination of transient component of short-circuit current

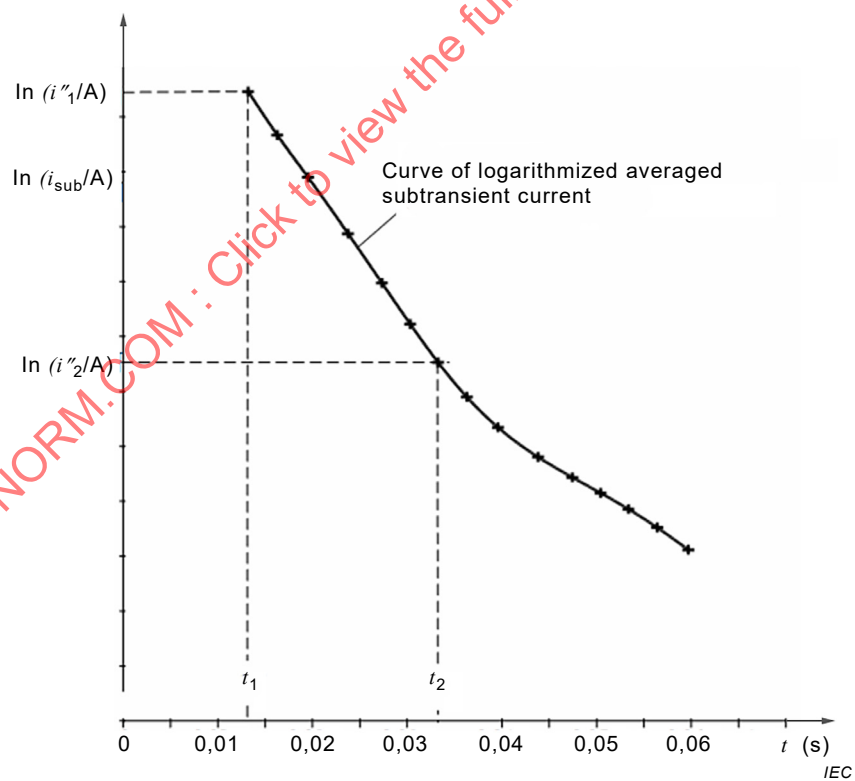


Figure 11 – Determination of sub-transient component of short-circuit current

The greatest possible value of the aperiodic component is determined analytically by the formula:

$$i_{\text{amax}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{i_{a1}^2 + i_{a2}^2 + i_{a1} i_{a2}}$$

where

i_{a1} , i_{a2} are the initial aperiodic current components of any two of the three phases.

Values i_{a1} , i_{a2} shall be inserted with their sign, as obtained by the procedure to determine the initial aperiodic component values.

NOTE The formula is valid when $i_{a1} + i_{a2} + i_{a3} = 0$, and the phase displacement of the current vectors is $2\pi/3$, respectively.

The curve of the periodic component of the excitation current against time is determined from the excitation current recording. Extrapolation of the curve to zero time gives the initial value of the periodic current component.

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 recordings (see 6.12) the difference between the sustained voltage and the voltage determined by the envelope of recovery voltage is calculated. Natural logarithm is applied to the remaining envelope of the periodic current values and 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.

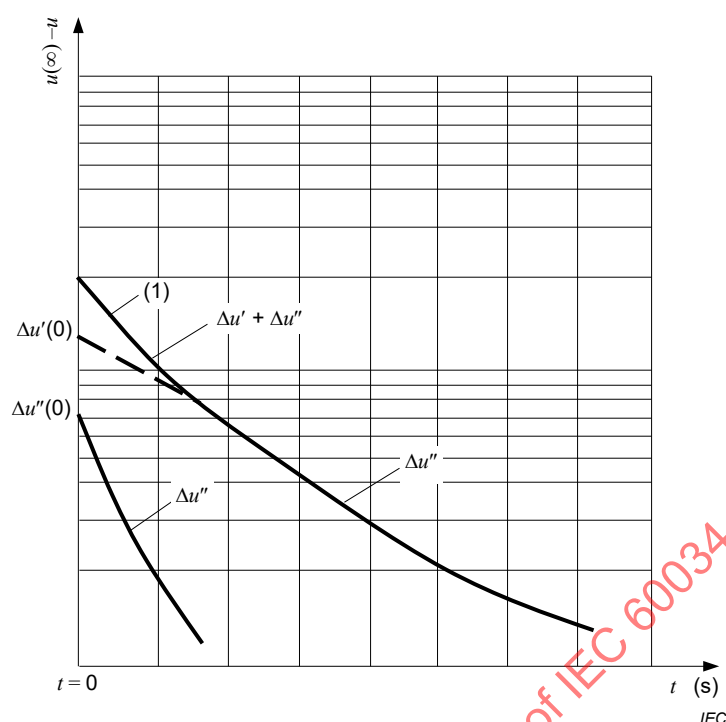


Figure 12 – Transient and sub-transient component of recovery voltage

7.1.4 Direct current decay in the armature winding at standstill

The test (see 6.14) 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 represented against time on a semi-logarithmic scale.

Transient and sub-transient initial values and the time constants of these decaying currents are found by linear extrapolation of the points of extremity (Figure 13 a). The intersection of the extrapolation 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.

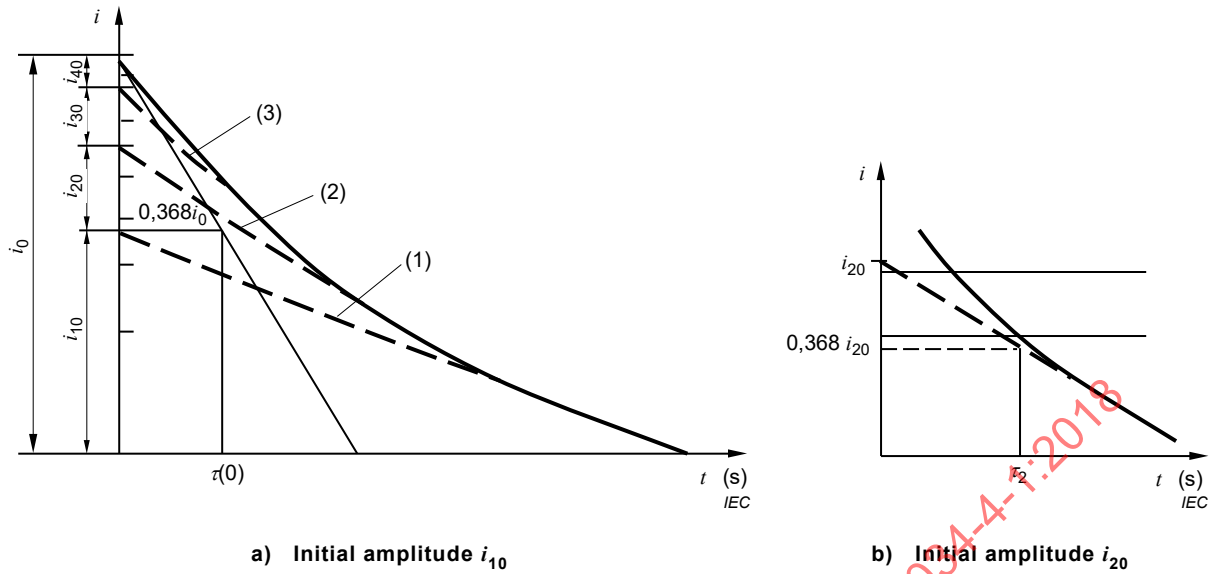


Figure 13 – Semi-logarithmic plot of decay currents

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

Analysis of the data is continued in this manner until that point where non-linearity of the decaying curve is negligible.

The analysis of the decaying armature winding current and 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. To obtain sufficient accuracy in analysing the test data into exponentials, a suitable computer program shall be used.

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

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

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

where

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

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

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

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

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 represented on a semi-logarithmic scale against time. This data is extrapolated to the instant of the exciter connection switch closure (see Figure 14) by a suitable interpolation algorithm. The linear 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 can usually be neglected.

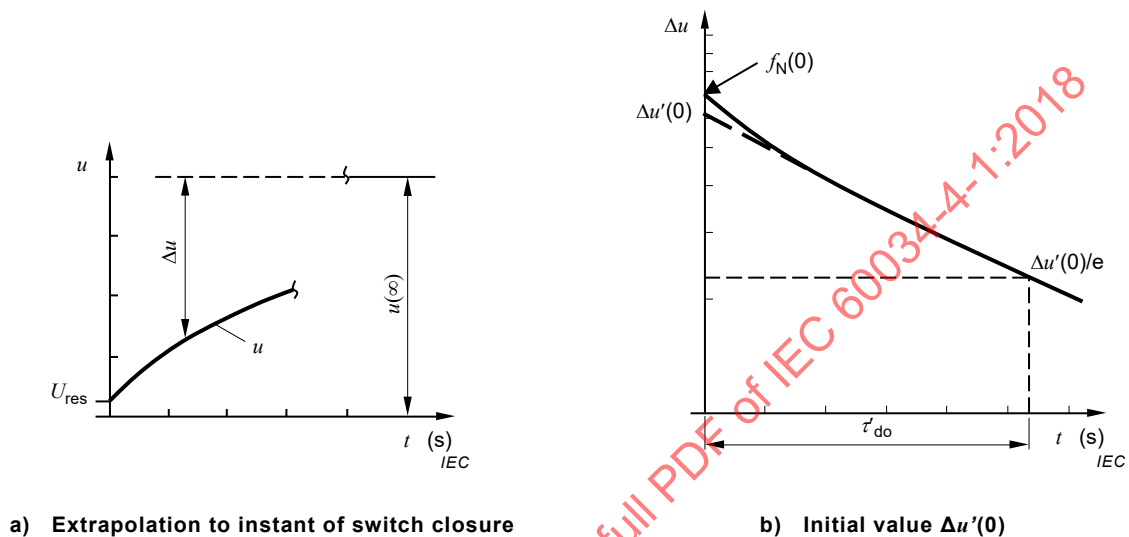


Figure 14 – Suddenly applied excitation with armature winding open-circuited

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

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

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

7.2.3 From on-load test measuring the load angle

The determination of X_d by the method of load angle measurement (see 6.9) is made using the formula:

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

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 taken (similar to Figure 8) and 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.

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 6.11);

$I(\infty), \Delta I'_k(0)$ 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 (6.12) as analysed according to 7.1.3.

7.3.3 From DC 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 time function (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 6.12) 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:

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

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

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 6.15.

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 6.16) 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 6.8 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:

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

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.

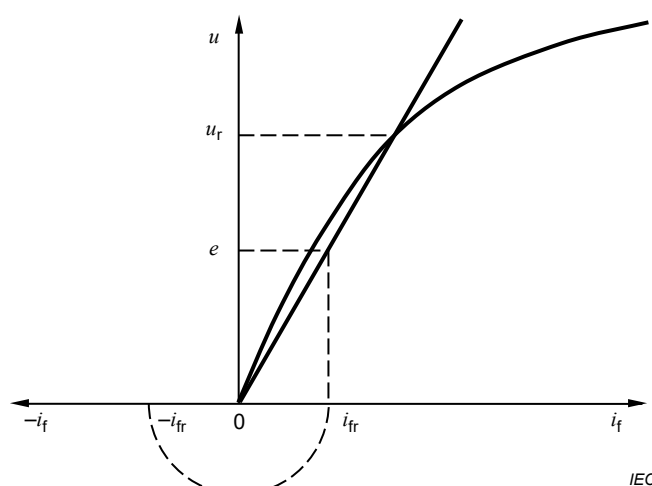


Figure 15 – No-load e.m.f. and excitation current for one pole-pitch slip

7.5.2 From low slip test

To determine X_q from the low slip test (see 6.10), armature current and voltage are measured at maximum excitation winding voltage U_{f0} , and X_q is calculated using the formula:

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

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:

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

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

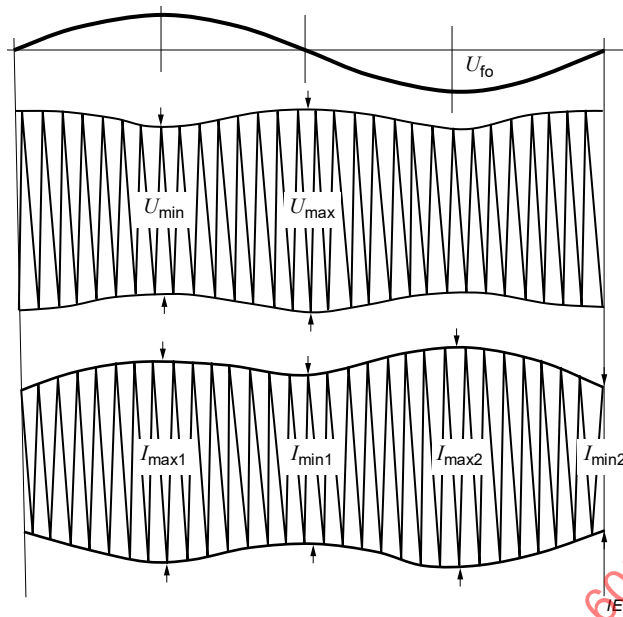


Figure 16 – Current envelope from low slip test

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.

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

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 on-load test measuring the load angle

The determination of X_q by the method of load angle measurement (see 6.9) 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

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

where C_{Iq} 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.

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

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

The values of the voltage U , current I and power input P , measured for the rotor position which gives the minimum excitation winding current, are according to 6.15.

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 6.16.

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 6.17) by

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

where, dependent on the connection of the three phases:

- for series connection $Z_0 = \frac{U}{3I}$; $R_0 = \frac{P}{3I^2}$; $\left[z_0 = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{u}{i}; r_0 = \frac{p}{i^2} \right]$; 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 6.19) is determined using:

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

when voltage or current harmonics may be ignored, or

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

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:

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

when voltage or current harmonics may be ignored, or

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

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 6.20 are determined by the formulae:

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

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

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.

7.9.3 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 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 6.22) 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

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

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 6.22):

$$\begin{aligned} \text{– for integral slot windings} \quad X_b &= \frac{U_c}{I} \frac{N k_w}{N_c}; \\ \text{– for fractional slot windings} \quad X_b &= \frac{U_c}{I} \frac{N k_w}{N_c \sin\left(\frac{q'}{3q} \frac{\pi}{2}\right)} \end{aligned}$$

where

U_c 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.

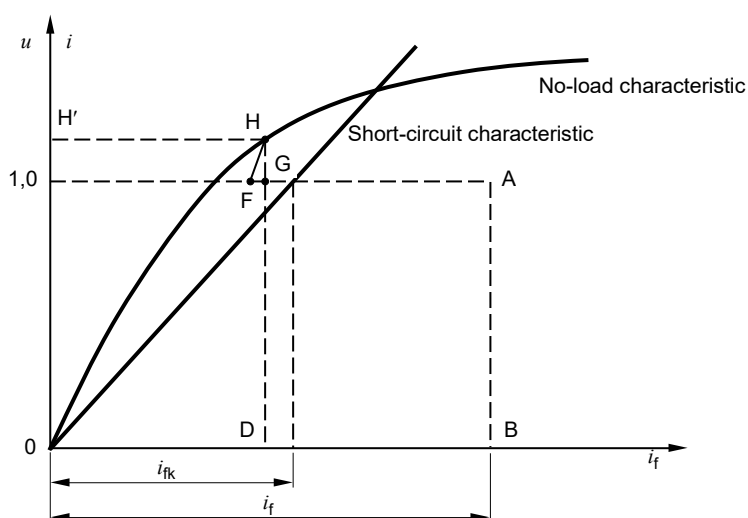


Figure 17 – Determination of Potier reactance

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 6.26), 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 6.17) 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:

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

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 direct current decay test at standstill

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

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 6.21.1 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 6.21.2 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 6.12 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 formulas $D_d(p) = 0$ and $D'_d(p) = 0$ according to 7.1.4.

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 formulas $D_d(p) = 0$ 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 formulas $D_q(p) = 0$ and $D'_q(p) = 0$ according to 7.1.4.

7.21 Quadrature-axis transient open-circuit time constant

Quadrature axis time constants are determined using known roots of the characteristic formulas $D_q(p) = 0$ 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) using the following formula:

$$\tau_q'' = \tau_{q0}'' \frac{x_q''}{x_q}$$

7.22.2 Determination from direct-current decay test at standstill

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

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

Quadrature axis time constants are similarly determined using the roots of characteristic formulas $D_q(p) = 0$ 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:

$$\tau_a = \frac{x_{(2)}}{2\pi f_N r_a}$$

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

7.25 Rated acceleration time and stored energy constant

Acceleration time of the machine and stored energy constant from the no-load retardation test (see 6.23) 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.

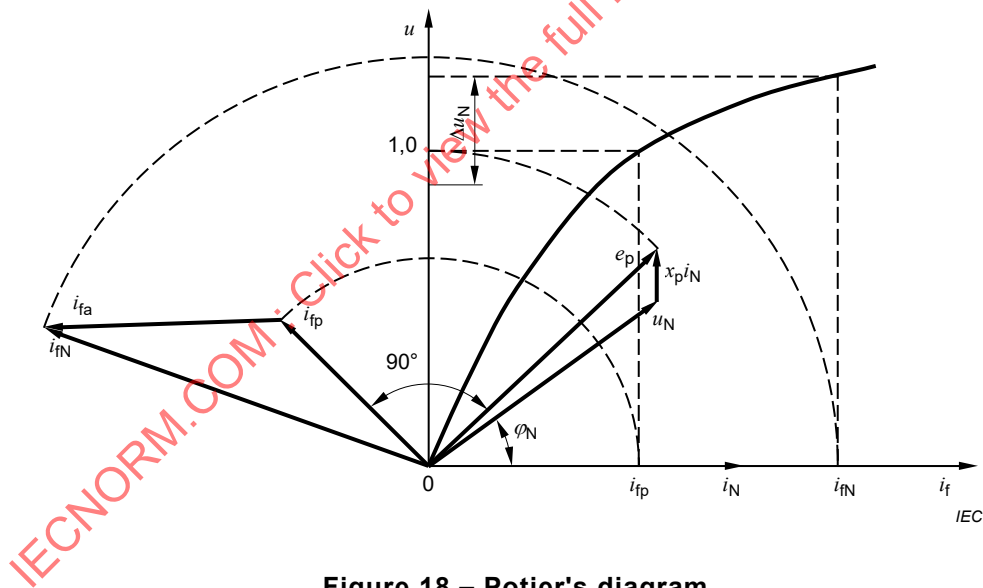


Figure 18 – Potier's diagram

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 (6.22) 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.

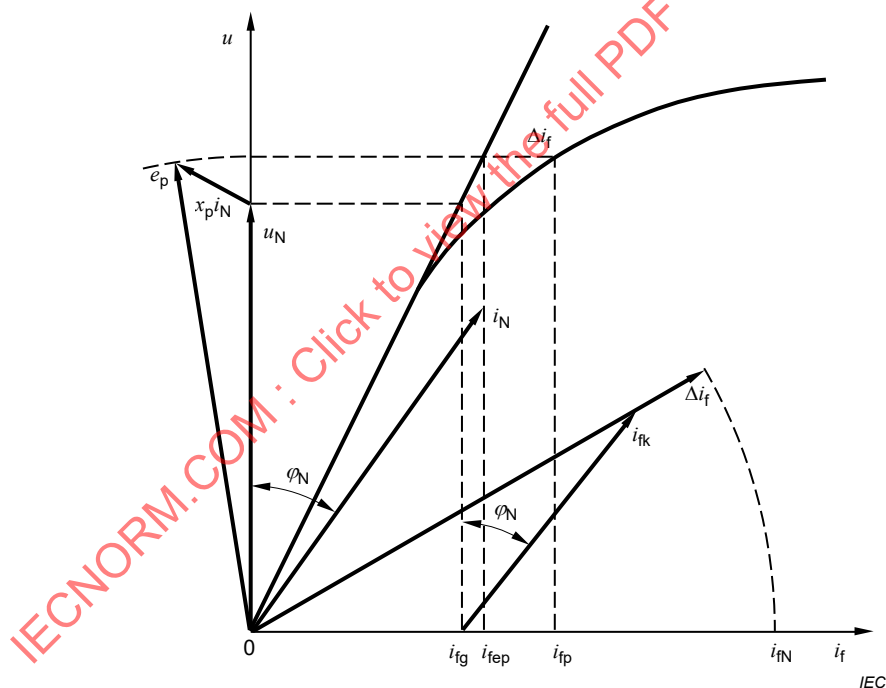


Figure 19 – ASA diagram

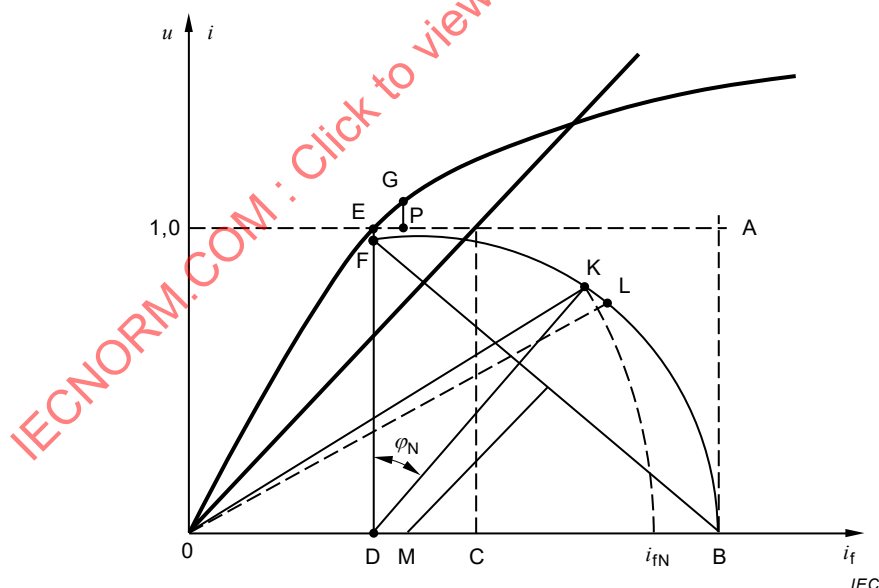
The determination of e.m.f. e_p is made in accordance with 7.1.1. The excitation current for the air-gap line at the rated armature voltage i_{fg} is determined from the no-load saturation characteristic. The vector current i_{fg} is laid off from the origin along the abscissa axis. From its end, at 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 rated excitation current may also be determined using the following formula (in per unit or physical values):

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 ax_a (see 7.26.2).

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 6.7).

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.



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 sustained three-phase short-circuit test

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

7.27.2 From over-excitation test at zero power factor

From the tests of 6.26 performed at rated armature current i_N the experimental points are represented 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.

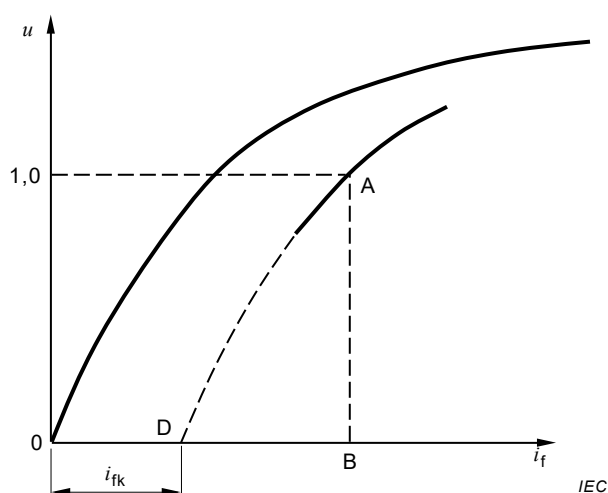


Figure 21 – Excitation current from over-excitation test at zero power factor

7.28 Frequency response characteristics

7.28.1 General

Frequency response characteristics are specialized transfer functions of Park's synchronous machine formulas. 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 6.25):

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

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

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

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.

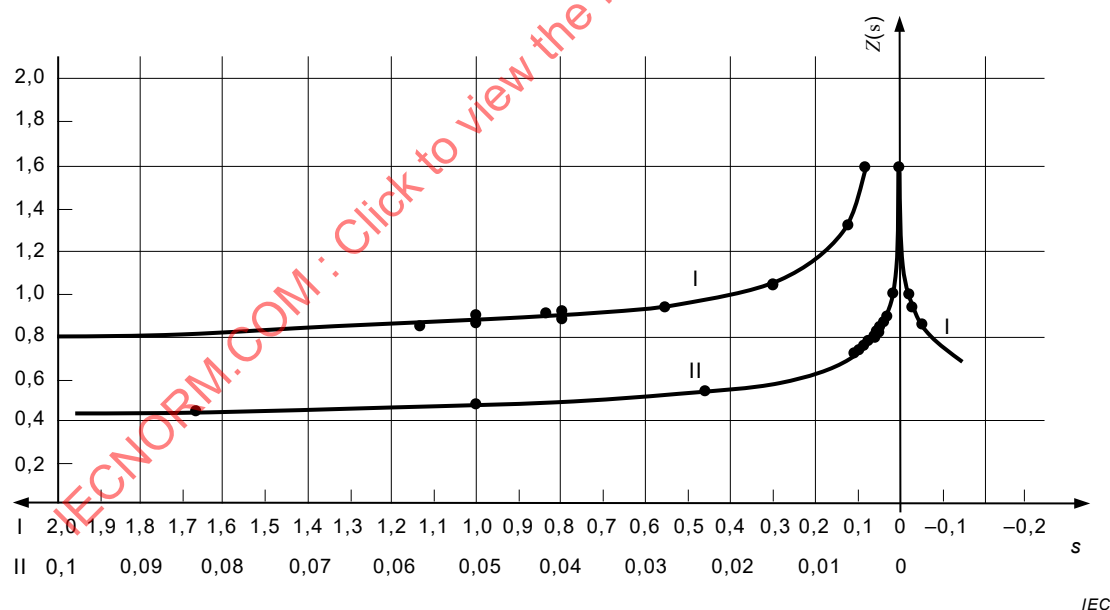


Figure 22 – Frequency response characteristics at low frequencies (example)

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 recordings U and I for the particular test frequency f_t and their phase difference (see 6.27), 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:

$$Z(js) = \frac{Z_{\text{stat}}(js) - R_{1s}}{s} + R_1$$

where

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

R_{1s} is the AC 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:

$$R_{1s} \approx R_s \left[1 + (R_1 R_a) \left(\frac{f}{f_n} \right)^2 \right]$$

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 recordings 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:

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

$$R(js) = \text{Re} [Z_{\text{stat}}(js)] + R_1 = \frac{|Z_{\text{stat}}(js)| \cos \phi - P_{1s}}{s} + R_1$$

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 6.14 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 DC 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 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 document, and the frequency response characteristics correspondingly corrected. If the divergence is more than 10 %, the DC 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 a static excitation system).

7.31 Initial starting impedance of synchronous motors

The initial starting impedance may be determined from the locked rotor test (see 6.24) as:

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

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:

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

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60034-4-1:2018

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}	7.27.1
		Short-circuit ratio K_c	7.29
6.6	Motor no-load	Direct-axis synchronous reactance X_d	7.2.2
6.7	Over-excitation at zero power-factor	Rated excitation current (Swedish diagram)	7.26.4
6.8	Negative excitation	Quadrature-axis synchronous reactance X_q	7.5.1
6.9	On-load measuring load angle	Direct-axis synchronous reactance X_d	7.2.3
		Quadrature-axis synchronous reactance X_q	7.5.3
6.10	Low slip	Quadrature-axis synchronous reactance X_q	7.5.2
6.11	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 sub-transient short-circuit time constant τ''_d	7.18
		Armature short-circuit time constant τ_a	7.24.1

Test		Quantity	
Clause	Description	Description	Clause
6.12	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
		Direct-axis sub-transient open-circuit time constant τ''_{do}	7.19.1
6.13	Suddenly applied short circuit following disconnection	See 6.11	
6.14	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 $X_{(2)}$	7.9.4
		Direct-axis transient short-circuit time constant τ'_d	7.16.2
		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
		Quadrature-axis sub-transient short-circuit time constant τ''_q	7.22.2
		Frequency response characteristic	7.28.4
6.15	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
6.16	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
6.17	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)
6.18	Line-to-line sustained short-circuit	Negative-sequence reactance $X_{(2)}$	7.9.1
		Negative-sequence resistance $R_{(2)}$	7.14.1
6.19	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
6.20	Negative-phase sequence	Negative-sequence reactance $X_{(2)}$	7.9.2
		Negative-sequence resistance $R_{(2)}$	7.14.2
6.21.1	Field current decay, with the armature winding open-circuited, at rated speed	Direct-axis transient open-circuit time constant τ'_{do}	7.17.1
6.21.2	Field current decay, with the armature winding open-circuited at standstill	Direct-axis transient open-circuit time constant τ'_{do}	7.17.2

Test		Quantity	
Clause	Description	Description	Clause
6.22	Applied voltage, rotor removed	Armature leakage reactance X_{σ}	7.10
6.23	No-load retardation	Acceleration time τ_j , stored energy constant H	7.25
6.24	Locked rotor	Initial starting impedance of synchronous motors Z_{st}	7.31
6.25	Asynchronous operation at reduced voltage	Frequency response characteristic	7.28.2
6.26	Over-excitation at zero power-factor and variable armature voltage	Excitation current at rated armature short-circuit current i_{fk}	7.27.2
6.27	Applied variable frequency voltage at standstill	Frequency response characteristic	7.28.3

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60034-4-1:2018

Annex B (informative)

Calculation scheme for frequency response characteristics

B.1 Basics

A function $f(t)$ obtained from tests is approximated by a sum of exponential functions. Let $f(t)$ be 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 .

B.2 Parameter calculation

Given the currents $i(t)$ and $i_f(t)$ obtained from the procedure described in 6.14 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 formulas $D_d(p) = 0$; $D'_d(p) = 0$; $D_q(p) = 0$; $D'_q(p) = 0$ 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 formula $\sum_{k=1}^n \frac{i_k \lambda_k}{p + \lambda_k} = 0$
- Roots $-a'_1, -a'_2, \dots, -a'_n$ of $D'(p) = 0$ are roots of the formula $\sum_{k=1}^n \frac{i_k}{p + \lambda_k} = 0$
- Roots $-\gamma_1, -\gamma_2, \dots, -\gamma_{n-1}$ of $A(p) = 0$ are roots of the formula $\sum_{k=1}^n \frac{i_{kf}}{p + \lambda_{kf}} = 0$

Using known values of the roots of the characteristic formulas, 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 formulas, 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.

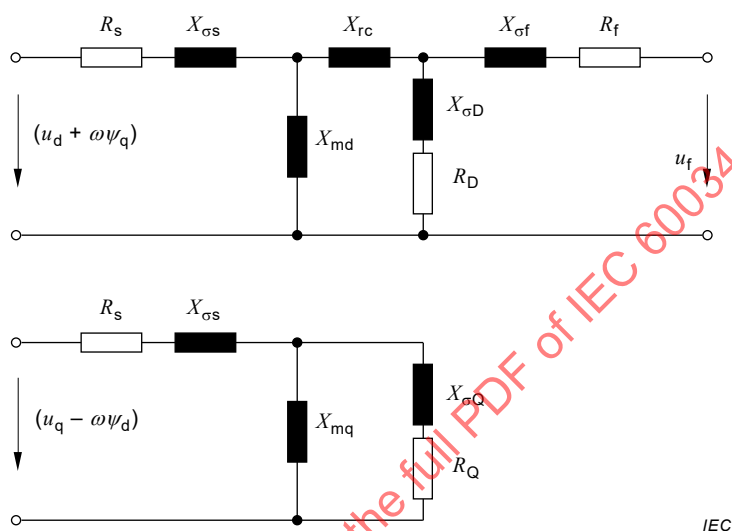


Figure C.1 – Equivalent circuit model of a salient pole machine

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} can 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:

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

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

– Time constants:

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

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

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

$$\tau'_d = \frac{X'_d}{X_d} \tau_{fd0} ; \quad \tau''_d = \frac{X''_d}{X'_d} \tau_{d0}''$$

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

$$\tau''_q = \frac{X''_q}{X_q} \tau_{q0}''$$

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

Bibliography

IEC 60050-411:1996, *International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 411: Rotating machinery*

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60034-4-1:2018

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60034-4-1:2018

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	79
1 Domaine d'application	81
2 Références normatives	81
3 Termes et définitions	81
4 Symboles et unités	87
5 Vue d'ensemble des essais	88
6 Procédures d'essai	90
6.1 Généralités	90
6.1.1 Exigences relatives aux appareils de mesure	90
6.1.2 Exigences relatives au système d'excitation	91
6.1.3 Conditions d'essai	91
6.1.4 Grandeurs en valeurs réduites	91
6.1.5 Conventions et hypothèses	92
6.1.6 Examen de la saturation magnétique	93
6.2 Mesures directes du courant d'excitation à la charge assignée	94
6.3 Mesures de la résistance en courant continu d'un enroulement	94
6.4 Essai de saturation à vide	94
6.4.1 Procédure d'essai	94
6.4.2 Détermination de la caractéristique de saturation à vide	95
6.5 Essai en court-circuit triphasé permanent	95
6.5.1 Procédure d'essai	95
6.5.2 Caractéristique en court-circuit triphasé permanent	96
6.6 Essai de moteur à vide	96
6.7 Essai de surexcitation au facteur de puissance nul	96
6.8 Essai d'excitation négative	97
6.9 Essai en charge avec mesure de l'angle de charge	97
6.10 Essai à faible glissement	97
6.11 Essai de court-circuit triphasé brusque	98
6.12 Essai de rétablissement de la tension	99
6.13 Essai de court-circuit brusque après déconnexion de la ligne	99
6.14 Essai de la décroissance du courant dans l'enroulement d'induit à l'arrêt	99
6.15 Essai d'application de tension pour les positions longitudinale et transversale des pôles du rotor	100
6.16 Essai d'application de tension avec le rotor en position arbitraire	101
6.17 Essai de tension monophasée appliquée aux trois phases	102
6.18 Essai de court-circuit permanent entre phases	102
6.19 Essai de court-circuit permanent entre phases et le neutre	102
6.20 Essai de rotation inverse	103
6.21 Essai de la décroissance du courant d'excitation, avec l'enroulement d'induit en circuit ouvert	103
6.21.1 Essai à la vitesse assignée	103
6.21.2 Essai à l'arrêt	104
6.22 Essai d'application de tension le rotor étant retiré	104
6.23 Essai de ralentissement à vide	105

6.24	Essai à rotor bloqué.....	105
6.25	Fonctionnement asynchrone pendant l'essai à basse tension.....	106
6.26	Essai de surexcitation au facteur de puissance nul et à tension d'induit variable.....	106
6.27	Essai d'application de tension à fréquence variable à l'arrêt.....	107
7	Détermination des grandeurs.....	108
7.1	Analyse des données enregistrées.....	108
7.1.1	Courbes de saturation à vide et de court-circuit triphasé permanent.....	108
7.1.2	Essai de court-circuit triphasé brusque.....	109
7.1.3	Essai de rétablissement de la tension.....	112
7.1.4	Décroissance du courant dans l'enroulement d'induit à l'arrêt.....	113
7.1.5	Essai d'application brusque de l'excitation avec l'enroulement d'induit à circuit ouvert.....	115
7.2	Réactance synchrone longitudinale.....	115
7.2.1	À partir de l'essai des valeurs de saturation à vide et de court-circuit triphasé permanent.....	115
7.2.2	À partir de l'essai de moteur à vide.....	116
7.2.3	À partir de l'essai en charge avec mesure de l'angle de charge.....	116
7.3	Réactance transitoire longitudinale.....	116
7.3.1	À partir de l'essai de court-circuit triphasé brusque.....	116
7.3.2	À partir de l'essai de rétablissement de la tension.....	117
7.3.3	À partir de l'essai de la décroissance du courant dans l'enroulement d'induit à l'arrêt.....	117
7.3.4	Calcul à partir des valeurs d'essai.....	117
7.4	Réactance subtransitoire longitudinale.....	117
7.4.1	À partir de l'essai de court-circuit triphasé brusque.....	117
7.4.2	À partir de l'essai de rétablissement de la tension.....	117
7.4.3	À partir de l'essai d'application de tension avec rotor longitudinal et transversal.....	118
7.4.4	À partir de l'essai d'application de tension dans une position arbitraire du rotor.....	118
7.5	Réactance synchrone transversale.....	118
7.5.1	À partir de l'essai d'excitation négative.....	118
7.5.2	À partir de l'essai à faible glissement.....	119
7.5.3	À partir de l'essai en charge avec mesure de l'angle de charge.....	120
7.6	Réactance transitoire transversale.....	121
7.6.1	À partir de l'essai de la décroissance du courant dans l'enroulement d'induit, à l'arrêt.....	121
7.6.2	Calcul à partir des valeurs d'essai.....	121
7.7	Réactance subtransitoire transversale.....	121
7.7.1	À partir de l'essai d'application de tension avec rotor en position longitudinale ou transversale.....	121
7.7.2	À partir de l'essai d'application de tension dans une position arbitraire du rotor.....	121
7.8	Réactance homopolaire.....	122
7.8.1	À partir de l'application de tension monophasée aux trois phases.....	122
7.8.2	À partir de l'essai de court-circuit permanent entre phases et le neutre.....	122

7.9	Réactance inverse	122
7.9.1	À partir de l'essai de court-circuit permanent entre phases	122
7.9.2	À partir de l'essai de rotation inverse	123
7.9.3	Calcul à partir des valeurs d'essai	123
7.9.4	À partir de l'essai de la décroissance du courant à l'arrêt	123
7.10	Réactance de fuite d'induit	124
7.11	Réactance de Potier	124
7.12	Résistance homopolaire	125
7.12.1	À partir de l'essai de tension monophasée appliquée aux trois phases	125
7.12.2	À partir de l'essai de court-circuit permanent entre phases et le neutre	125
7.13	Résistance de l'enroulement d'induit directe	126
7.14	Résistance inverse	126
7.14.1	À partir de l'essai de court-circuit permanent entre phases	126
7.14.2	À partir de l'essai de rotation inverse	126
7.15	Résistance de l'enroulement d'induit et de l'enroulement d'excitation	127
7.16	Constante de temps transitoire longitudinale en court-circuit	127
7.16.1	À partir de l'essai de court-circuit triphasé brusque	127
7.16.2	À partir de l'essai de la décroissance du courant à l'arrêt	127
7.17	Constante de temps transitoire longitudinale à circuit ouvert	127
7.17.1	À partir de la décroissance du courant d'excitation à la vitesse assignée avec enroulement d'induit en circuit ouvert	127
7.17.2	À partir de l'essai de la décroissance du courant d'excitation à l'arrêt avec enroulement d'induit en circuit ouvert	128
7.17.3	À partir de l'essai de rétablissement de la tension	128
7.17.4	À partir de l'essai de la décroissance du courant à l'arrêt	128
7.18	Constante de temps subtransitoire longitudinale en court-circuit	128
7.19	Constante de temps subtransitoire longitudinale à circuit ouvert	128
7.19.1	À partir de l'essai de rétablissement de la tension	128
7.19.2	À partir de l'essai de la décroissance du courant à l'arrêt	128
7.20	Constante de temps transitoire transversale en court-circuit	128
7.20.1	Calcul à partir des valeurs d'essai	128
7.20.2	À partir de l'essai de la décroissance du courant à l'arrêt	128
7.21	Constante de temps transitoire transversale à circuit ouvert	128
7.22	Constante de temps subtransitoire transversale en court-circuit	129
7.22.1	Calcul à partir des valeurs d'essai	129
7.22.2	À partir de l'essai de la décroissance du courant à l'arrêt	129
7.23	Constante de temps subtransitoire transversale à circuit ouvert	129
7.24	Constante de temps en court-circuit de l'induit	129
7.24.1	À partir de l'essai du court-circuit triphasé brusque	129
7.24.2	Calcul à partir des valeurs d'essai	129
7.25	Valeur assignée des constantes de temps d'accélération et des constantes d'énergie cinétique	130
7.26	Courant d'excitation assigné	130
7.26.1	À partir de mesures directes	130
7.26.2	Diagramme de Potier	130
7.26.3	Diagramme ASA	132
7.26.4	Diagramme suédois	133

7.27	Courant d'excitation correspondant au courant d'induit assigné en court-circuit permanent	134
7.27.1	À partir de l'essai de court-circuit triphasé permanent.....	134
7.27.2	À partir de l'essai de surexcitation au facteur de puissance nul	134
7.28	Caractéristiques de réponse en fréquence	134
7.28.1	Généralités	134
7.28.2	À partir du fonctionnement asynchrone à tension réduite	135
7.28.3	À partir de l'essai d'application à l'arrêt d'une tension de fréquence variable	136
7.28.4	À partir de l'essai de la décroissance du courant dans l'enroulement d'induit, à l'arrêt.....	137
7.29	Rapport de court-circuit.....	138
7.30	Variation de tension assignée	138
7.30.1	À partir de mesures directes	138
7.30.2	À partir de la caractéristique de saturation à vide et du courant d'excitation connu à la charge assignée	138
7.31	Impédance de démarrage initiale des moteurs synchrones	138
Annexe A (informative)	Correspondance pour les essais.....	140
Annexe B (informative)	Système de calcul des caractéristiques de réponse en fréquence	143
B.1	Bases	143
B.2	Calcul des paramètres	143
Annexe C (informative)	Modèle conventionnel de machine électrique	145
Bibliographie.....		147
Figure 1	– Schéma pour l'essai de la décroissance du courant à l'arrêt	100
Figure 2	– Schéma de circuit pour l'essai de court-circuit entre phases.....	102
Figure 3	– Schéma de circuit pour l'essai de court-circuit permanent entre phases et le neutre	103
Figure 4	– Installation de la bobine d'exploration le rotor étant retiré	104
Figure 5	– Puissance et courant en fonction du glissement (exemple).....	106
Figure 6	– Schéma pour l'essai à fréquence variable à l'arrêt	107
Figure 7	– Grandeurs enregistrées au cours de l'essai à fréquence variable à l'arrêt (exemple)	108
Figure 8	– Courbes combinées de saturation et de court-circuit	109
Figure 9	– Détermination des points intermédiaires sur les enveloppes.....	109
Figure 10	– Détermination de la composante transitoire du courant de court-circuit	111
Figure 11	– Détermination de la composante subtransitoire du courant de court-circuit.....	111
Figure 12	– Composantes transitoire et subtransitoire de la tension de rétablissement	113
Figure 13	– Représentation graphique semi-logarithmique des courants décroissants	114
Figure 14	– Application brusque de l'excitation avec enroulement d'induit en circuit ouvert	115
Figure 15	– F.é.m à vide et courant d'excitation pour glissement d'un pas polaire.....	119
Figure 16	– Enveloppe du courant à partir de l'essai à faible glissement.....	120
Figure 17	– Détermination de la réactance de Potier.....	125
Figure 18	– Diagramme de Potier	131
Figure 19	– Diagramme ASA.....	132

Figure 20 – Diagramme suédois	133
Figure 21 – Courant d'excitation à partir de l'essai de surexcitation au facteur de puissance nul.....	134
Figure 22 – Caractéristiques de réponse en fréquence à basses fréquences (exemple).....	136
Figure C.1 – Modèle de circuit équivalent d'une machine à pôles saillants	145
Tableau 1 – Tableau des méthodes d'essai et des correspondances	88
Tableau A.1 – Correspondance pour les essais	140

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60034-4-1:2018

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES –

**Partie 4-1: Méthodes pour la détermination, à partir d'essais,
des grandeurs des machines synchrones à excitation électrique**

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Électrotechnique Internationale (IEC) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de l'IEC). L'IEC a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. À cet effet, l'IEC – 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 l'IEC"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'IEC, participent également aux travaux. L'IEC 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 l'IEC concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de l'IEC intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de l'IEC se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de l'IEC. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que l'IEC s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; l'IEC 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 l'IEC s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de l'IEC dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de l'IEC et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) L'IEC elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de l'IEC. L'IEC n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à l'IEC, 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 l'IEC, 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 l'IEC ou de toute autre Publication de l'IEC, 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 l'IEC peuvent faire l'objet de droits de brevet. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale IEC 60034-4-1 a été établie par le comité d'études 2 de l'IEC: Machines tournantes.

La première édition de l'IEC 60034-4-1 annule et remplace la troisième édition de l'IEC 60034-4 parue en 2008. Cette édition constitue une révision technique.

Cette publication inclut les modifications techniques majeures suivantes par rapport à l'IEC 60034-4 édition 3:

- a) amélioration de plusieurs procédures quant aux évaluations des grandeurs;
- b) suppression des procédures exceptionnelles;
- c) applicabilité des procédures des machines à aimants permanents.

Le texte de cette Norme internationale est issu des documents suivants:

CDV	Rapport de vote
2/1829/CDV	2/1869/RVC

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

Ce document a été rédigé selon les Directives ISO/IEC, Partie 2.

NOTE Le tableau de bord du CE 2 de l'IEC sur le site web de l'IEC donne un tableau des correspondances de toutes les publications du CE 2 de l'IEC.

Le comité a décidé que le contenu de ce document ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives au document recherché. À cette date, le document sera

- reconduit,
- supprimé,
- remplacé par une édition révisée, ou
- amendé.

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

MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES –

Partie 4-1: Méthodes pour la détermination, à partir d'essais, des grandeurs des machines synchrones à excitation électrique

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 60034 est applicable aux machines synchrones triphasées dont la puissance assignée est supérieure ou égale à 1 kVA.

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 il convient de prendre des précautions particulières contre une démagnétisation irréversible.

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

Le présent document n'a pas pour objet de nécessiter la réalisation d'un ou de tous les essais qu'il décrit sur une machine quelconque. Les essais particuliers à réaliser font l'objet d'un accord entre le constructeur et le client.

2 Références normatives

Les documents suivants cités dans le texte constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences 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).

IEC 60034-1:2017, *Machine électriques tournantes – Partie 1: Caractéristiques assignées et caractéristiques de fonctionnement*

IEC 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)*

IEC 60051 (toutes les parties), *Appareils de mesure 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.

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <http://www.iso.org/obp>

3.1

<moteurs synchrones> impédance de démarrage initiale

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

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 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

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 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

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 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

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 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

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 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

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 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

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 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

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 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

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 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

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 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, 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, 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

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 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 d'induit sinusoïdal à fréquence assignée, par la valeur de ce courant, la machine tournant à sa vitesse assignée

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 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

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 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

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 411-50-21, modifié – "Courant de champ" a été changé en "courant d'excitation"]

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

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 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

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 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

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 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

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 411-48-30]

3.23

constante de temps transitoire transversale à circuit couvert

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

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 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

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 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

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 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 après une variation brusque des conditions de fonctionnement avec l'enroulement d'induit en circuit ouvert, l'enroulement d'excitation étant aussi en circuit 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 après une variation brusque des conditions de fonctionnement, l'enroulement d'induit en court-circuit, l'enroulement d'excitation étant en circuit 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

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 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

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 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

[SOURCE: IEC 60050-411:1996, 411-48-15]

3.31

constante d'énergie cinétique

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

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 de tension assignée

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 en circuit ouvert, 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 (phaseur) 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 1 à l'article: 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 le présent document.

3.37

caractéristique de réponse en fréquence de la réactance transversale

quotient complexe exprimé en fonction du glissement du terme fondamental de la tension d'induit produite par le flux transversal due au courant d'induit transversal et 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 de la tension d'induit établi, 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

4 Symboles et unités

f	Fréquence
f_N	Fréquence assignée
$G(j\omega)$	Caractéristique de réponse en fréquence complexe du coefficient d'excitation
H	Constante d'énergie cinétique
I, i	Courant
I_N	Courant assigné
I_{fk}	Courant d'excitation, pour courant assigné de l'induit en court-circuit
I_{fN}	Courant d'excitation assigné
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
Z_{st}	Impédance de démarrage initiale des moteurs synchrones
ΔU_N	Variation de tension assignée
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'_{q0}	Constante de temps transitoire transversale à circuit ouvert
τ''_d	Constante de temps subtransitoire longitudinale en court-circuit
τ''_{d0}	Constante de temps subtransitoire longitudinale à circuit ouvert
τ''_q	Constante de temps subtransitoire transversale en court-circuit
τ''_{q0}	Constante de temps subtransitoire transversale à circuit ouvert
τ_J	Temps d'accélération unitaire

5 Vue d'ensemble des essais

Le Tableau 1 est un tableau de correspondances des essais permettant de déterminer les grandeurs des machines synchrones. Il indique les méthodes préférentielles.

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	
	7.2.3	Mesure en charge de l'angle de charge	6.9	
Réactance transitoire longitudinale X'_d	7.3.1	Court-circuit triphasé brusque	6.11	Préférentiel
	7.3.2	Rétablissement de tension	6.12	
	7.3.3	Décroissance du courant dans l'enroulement d'induit à l'arrêt	6.14	
	7.3.4	Calcul à partir des valeurs d'essai	-	
Réactance subtransitoire longitudinale X''_d	7.4.1	Court-circuit triphasé brusque	6.11	Préférentiel
	7.4.2	Rétablissement de tension	6.12	
	7.4.3	Essai d'application de tension avec rotor longitudinal et transversal	6.15	
	7.4.4	Tension appliquée avec le rotor en position arbitraire	6.16	
Réactance synchrone transversale X_q	7.5.1	Excitation négative	6.8	Préférentiel (non saturé)
	7.5.2	Glissement lent	6.10	
	7.5.3	Mesure en charge de l'angle de charge	6.9	
Réactance transitoire transversale X'_q	7.6.1	Essai de la décroissance du courant à l'arrêt	6.14	
	7.6.2	Calcul à partir des valeurs d'essai	-	
Réactance subtransitoire transversale X''_q	7.7.1	Essai d'application de tension avec rotor longitudinal et transversal	6.15	Préférentiel
	7.7.2	Tension appliquée avec le rotor en position arbitraire	6.16	
Réactance homopolaire $X_{(0)}$	7.8.1	Application de tension monophasée aux trois phases	6.17	Préférentiel
	7.8.2	Court-circuit permanent entre phases et le neutre	6.19	

Grandeur	Article	Description de l'essai	Essai	Préférence/ incertitude
Réactance inverse $X_{(2)}$	7.9.1	Court-circuit permanent entre phases	6.18	Préférentiel
	7.9.2	Séquence de phase négative	6.20	
	7.9.3	Calcul à partir des valeurs d'essai	-	
	7.9.4	Décroissance du courant dans l'enroulement d'induit à l'arrêt	6.14	
Réactance de fuite d'induit X_{σ}	7.10	Rotor retiré	6.22	
Réactance de Potier X_p	7.11	Saturation à vide, court-circuit triphasé permanent	6.4 et 6.5	
Résistances				
Résistance homopolaire $R_{(0)}$	7.12.1	Application de tension monophasée aux trois phases	6.17	Préférentiel
	7.12.2	Court-circuit permanent entre phases et le neutre	6.19	
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	6.18	Préférentiel
	7.14.2	Séquence de phase négative	6.20	
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	
Constantes de temps				
Constante de temps transitoire longitudinale en court-circuit τ'_d	7.16.1	Court-circuit triphasé brusque	6.11	Préférentiel
	7.16.2	Décroissance du courant dans l'enroulement d'induit à l'arrêt	6.14	
Constante de temps transitoire longitudinale en circuit ouvert τ'_{do}	7.17.1	Décroissance du courant d'excitation à la vitesse assignée avec l'enroulement d'induit en circuit ouvert	6.21.1	Préférentiel
	7.17.2	Décroissance du courant d'excitation à l'arrêt avec l'enroulement d'induit en circuit ouvert	6.21.2	
	7.17.3	Rétablissement de tension	6.12	
	7.17.4	Décroissance du courant dans l'enroulement d'induit à l'arrêt	6.14	
Constante de temps subtransitoire longitudinale en court-circuit τ''_d	7.18	Court-circuit triphasé brusque	6.11	
Constante de temps subtransitoire longitudinale en circuit ouvert τ''_{do}	7.19.1	Rétablissement de tension	6.12	Préférentiel
	7.19.2	Décroissance du courant dans l'enroulement d'induit à l'arrêt	6.14	
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 du courant dans l'enroulement d'induit à l'arrêt	6.14	
Constante de temps transitoire transversale en circuit ouvert τ'_{qo}	7.21	Décroissance du courant dans l'enroulement d'induit à l'arrêt	6.14	

Grandeur	Article	Description de l'essai	Essai	Préférence/ incertitude
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 du courant dans l'enroulement d'induit à l'arrêt	6.14	
Constante de temps subtransitoire transversale en circuit ouvert τ''_{qo}	7.23	Décroissance du courant dans l'enroulement d'induit à l'arrêt	6.14	
Constante de temps en court-circuit de l'induit τ_a	7.24.1	Court-circuit triphasé brusque	6.11	Préférentiel
	7.24.2	Calcul à partir des valeurs d'essai	-	
Autres grandeurs				
Temps d'accélération unitaire τ_J , constante d'énergie cinétique H	7.25	Ralentissement à vide	6.23	Préférentiel
Courant d'excitation assigné i_{fN}	7.26.1	Mesurage direct	6.2	Préférentiel
	7.26.2	Diagramme de Potier	-	
	7.26.3	Diagramme ASA	-	
	7.26.4	Diagramme suédois	-	
Courant d'excitation, avec courant d'induit assigné en court-circuit i_{fk}	7.27.1	Essai en court-circuit triphasé permanent	6.5	Préférentiel
	7.27.2	Surexcitation à facteur de puissance nul et à tension d'enroulement d'induit variable	6.26	
Caractéristiques de réponse en fréquence	7.28.2	Fonctionnement asynchrone à tension réduite	6.25	Préférentiel
	7.28.3	Application à l'arrêt d'une fréquence variable	6.27	
	7.28.4	Décroissance du courant dans l'enroulement d'induit à l'arrêt	6.14	
Rapport de court-circuit K_c	7.29	Saturation à vide	6.4	
		Court-circuit triphasé permanent	6.5	
Variation de tension assignée ΔU_N	7.30.1	Mesurage direct	6.2	Préférentiel
	7.30.2	Par diagramme à partir de la caractéristique de saturation à vide et du courant connu i_{fN}	6.4.2	
Impédance de démarrage initiale des moteurs synchrones Z_{st}	7.31	Rotor bloqué	6.24	

6 Procédures d'essai

6.1 Généralités

6.1.1 Exigences relatives aux appareils de mesure

Les appareils de mesure numériques doivent être utilisés dans toute la mesure du possible.

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 l'IEC 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.

Les instruments utilisés pour mesurer la fréquence d'alimentation doivent avoir une exactitude de $\pm 0,1$ % de la pleine échelle. Il convient que l'exactitude de mesure de la vitesse soit d'environ 0,1 tour par minute.

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. Par conséquent, 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 peuvent ne 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 mis hors tension sauf exigence contraire spécifiée dans la procédure d'essai. Il n'est pas nécessaire d'installer des appareils qui n'ont aucune influence sur les valeurs des paramètres.

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 avec 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 de commencer les essais seulement après que la machine a fonctionné à vide en refroidissement normal ou a été à l'arrêt pendant un temps suffisant pour assurer une faible température de démarrage. Il convient de surveiller ou de prédéterminer les températures de manière à pouvoir interrompre l'essai avant que la température ne devienne excessive.

Au cours de l'essai, il convient en règle générale 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 au présent document, doivent correspondre à un enroulement équivalent connecté en étoile.

6.1.4 Grandeurs en valeurs réduites

Toutes les formules 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 apparente assignée (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 le présent document. Les lettres minuscules désignent les grandeurs exprimées en valeurs réduites et les lettres majuscules désignent les grandeurs physiques.

Dans les formules données dans le présent document 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 leurs méthodes expérimentales de détermination, telles qu'elles figurent dans le présent document, reposent sur la théorie largement acceptée des deux axes des machines synchrones. Cette théorie donne une 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, l'un le long de l'axe longitudinal et l'autre le long de l'axe transversal en négligeant les résistances de l'induit ou en en tenant compte seulement d'une manière approximative.

Sur la base de cette représentation approximative d'une machine, le présent document prend en compte les éléments suivants: trois réactances (synchrone, transitoire et subtransitoire) et deux constantes de temps (transitoire et subtransitoire) 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 la fonction temps de la composante mesurée à l'étude ne décroît pas selon une exponentielle pure, 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 décroisse jusqu'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.

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. Cela s'applique aux machines de type turbo pour lesquelles 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 l'Annexe B).

NOTE Le présent document fournit des méthodes de détermination des paramètres transitoires transversaux $X'_q, \tau'_q, \tau'_{q0}$ (voir 6.14), bien qu'ils soient rarement pris en compte dans les calculs conventionnels prenant pour hypothèse $X'_q = X_q$.

6.1.6 Examen de la saturation magnétique

Les grandeurs des machines synchrones varient en fonction de la saturation des circuits magnétiques. Dans les calculs pratiques, les valeurs saturées et non saturées sont utilisées.

Dans le présent document, sauf indication contraire, la “valeur saturée” des réactances et des résistances est comprise comme la valeur de la tension assignée (d'induit) de la grandeur et la “valeur non saturée” comme la valeur du courant assigné (induit), à l'exception des réactances synchrones, dont les valeurs non saturées sont 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 dépendent du mode de fonctionnement.

La valeur de la tension assignée (induit) d'une grandeur (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) d'une grandeur correspond à un état dans lequel la composante fondamentale alternative 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 réalisés pour les valeurs non saturées de X_d . L'essai de moteur à vide permet de déterminer les valeurs non saturées et saturées de X_d . Cependant, 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 réalisés pour les valeurs non saturées.

La méthode préférentielle est celle du court-circuit triphasé brusque. Elle permet de déterminer les valeurs saturées et non saturées de X'_d .

L'essai de court-circuit triphasé brusque ainsi que les essais 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.

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 appliquées pour les valeurs non saturées de X''_d et 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 de déterminer τ'_d à partir du même essai. Si la constante de temps τ_a est inférieure à un cycle fondamental,

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.

Lors de la détermination du courant d'excitation assigné par mesurage direct pendant le 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 un 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

La résistance doit être mesurée conformément à l'IEC 60034-2-1.

Au cours des mesures, il convient de déterminer la température de l'enroulement au moyen de détecteurs thermiques incorporés ou le cas échéant, intégrés.

6.4 Essai de saturation à vide

6.4.1 Procédure d'essai

L'essai de saturation à vide est effectué:

- 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 alternative triphasée symétrique (pour la symétrie de la tension, voir 7.2 de l'IEC 60034-1:2017); 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.

Pour des machines ayant des caractéristiques assignées supérieures ou égales à 10 MVA, il convient de limiter la tension assignée à 1,2.

Mesurer la tension résiduelle de la génératrice lorsque le courant d'excitation est abaissé à zéro.

Il est préférable de réaliser l'essai a) avec un moteur étalonné en courant continu ou un couplemètre, dans la mesure où cela permet également de déterminer les pertes à vide au cours de l'essai.

S'agissant de l'essai b), il est aussi nécessaire de mesurer le courant d'induit. À chaque échelon de tension, les valeurs lues doivent être enregistrées pour un courant d'induit minimal qui correspond au facteur de puissance égal à l'unité.

S'agissant de 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 présente 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 d'alimentation;
- 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.

Cet essai n'est pas applicable aux machines à aimants permanents.

6.4.2 Détermination de la caractéristique de saturation à vide

Représenter 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. À cet effet, la partie rectiligne de la courbe à vide qui est généralement appelée droite 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 qui doit être ajoutée à toutes les valeurs mesurées du courant d'excitation.

Lorsque la fréquence d'essai est différente de la valeur assignée, toutes les valeurs des tensions mesurées doivent être rapportées à la fréquence assignée, en multipliant les tensions mesurées par le rapport fréquence assignée sur fréquence d'essai.

6.5 Essai en court-circuit triphasé permanent

6.5.1 Procédure 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.

S'agissant de 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 réaliser l'essai a) avec un moteur 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 de ligne de l'induit.

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.

S'agissant de 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 présente un taux de décélération supérieur à 0,04 fois la vitesse assignée par seconde, l'excitation doit être fournie par une source séparée.

S'agissant de 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.

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 décroissant (pour des températures de bobine de stator plus uniformes), enregistrer le courant d'induit, la tension d'induit et le courant d'excitation.

Cet essai n'est pas applicable aux machines à aimants permanents.

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).

Représenter le courant de 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 d'alimentation;
- la fréquence (ou vitesse).

6.7 Essai de surexcitation au facteur de puissance nul

L'essai de surexcitation au 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, si le courant d'excitation assigné n'est pas largement dépassé.

Cet essai n'est pas applicable aux machines à aimants permanents.

6.8 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, puis il est augmenté jusqu'au moment où la machine glisse d'un pôle.

Enregistrer: la tension, le courant d'induit et le courant d'excitation jusqu'au moment où la machine commence à glisser.

Cet essai n'est pas applicable aux machines à aimants permanents.

6.9 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 d'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.

6.10 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 décroche pas. L'enroulement d'excitation doit être mis en circuit ouvert, le rotor être entraîné par un moteur à un glissement inférieur à 0,01 et dans le cas de machines à rotor massif avec un glissement beaucoup plus faible de sorte que les courants induits dans les circuits amortisseurs en marche synchrone aient une influence négligeable sur les mesures.

Pendant la mise en tension et hors tension 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, la tension aux bagues collectrices et le glissement sont mesurés. Si la tension résiduelle mesurée avant l'essai est supérieure à 0,3 fois la tension d'essai d'alimentation, il convient de démagnétiser le rotor. La démagnétisation peut 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).

Cet essai n'est pas applicable 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.

6.11 Essai de court-circuit triphasé brusque

Cet essai est réalisé avec la machine fonctionnant, au départ, 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.

Lorsque l'excitatrice de la machine ne peut être utilisée, une excitatrice séparée et des bagues collectrices temporaires peuvent être utilisées, dans le cas d'une machine sans balais. Il convient cependant 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, utiliser des shunts non inductifs ou des transformateurs de courant appropriés. Il convient d'utiliser les transformateurs de courant uniquement pour la mesure des composantes en courant alternatif et de les choisir de sorte que la valeur initiale de la composante subtransitoire du courant de court-circuit soit située sur la partie rectiligne de la caractéristique du transformateur.

NOTE Pour les machines dont les fréquences assignées sont inférieures à 60 Hz, des shunts à courant continu peuvent être utilisés.

Il convient de continuer l'enregistrement pendant une durée au moins égale à $3\tau_d$ après le court-circuit et d'enregistrer également les valeurs permanentes après l'établissement des conditions permanentes. 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 représentées sur une courbe en fonction des valeurs initiales des courants d'induit alternatifs transitoires ou subtransitoires. Sur la base 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 de réaliser les essais à plusieurs tensions d'induit (par exemple, 30 %, 50 % et 70 % de la tension d'induit assignée) et de déterminer les grandeurs pour chaque essai. Les résultats sont ensuite représentés 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 en fonctions temps, le courant d'induit dans chaque phase et le courant d'excitation au cours de la durée du court-circuit. Les données sont analysées selon 7.1.2.

Cet essai peut être réalisé sur des machines à aimants permanents, si la conception assure une protection contre la démagnétisation des aimants.

6.12 Essai de rétablissement de la tension

Faire fonctionner la machine d'essai à sa vitesse assignée, l'enroulement d'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 des fonctions temps d'un rétablissement de la tension entre phases et d'un courant d'induit sont exigés.

NOTE Cet essai peut être réalisé sur 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 en fonction temps, le courant d'induit dans chaque phase et le courant d'excitation après coupure du court-circuit.

Les données sont analysées selon 7.1.3.

Cet essai est adapté mais non pertinent pour les machines à aimants permanents.

6.13 Essai de court-circuit brusque après déconnexion de la ligne

L'essai de court-circuit triphasé brusque peut être réalisé pendant le ralentissement de la machine en essai à condition que son taux de décélération ne soit pas supérieur à 0,05 fois sa vitesse assignée par seconde. Avant d'être déconnectée de 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.

Dès que possible après la déconnexion, et au plus tard au bout de 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 6.11.

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.

6.14 Essai de la décroissance du courant dans l'enroulement d'induit à l'arrêt

L'essai de la décroissance du courant dans l'enroulement d'induit est réalisé à l'arrêt. Une tension en courant continu est appliquée à l'enroulement d'induit (entre deux bornes, la troisième étant à circuit ouvert, 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. Tout le processus de décroissance du courant est enregistré.

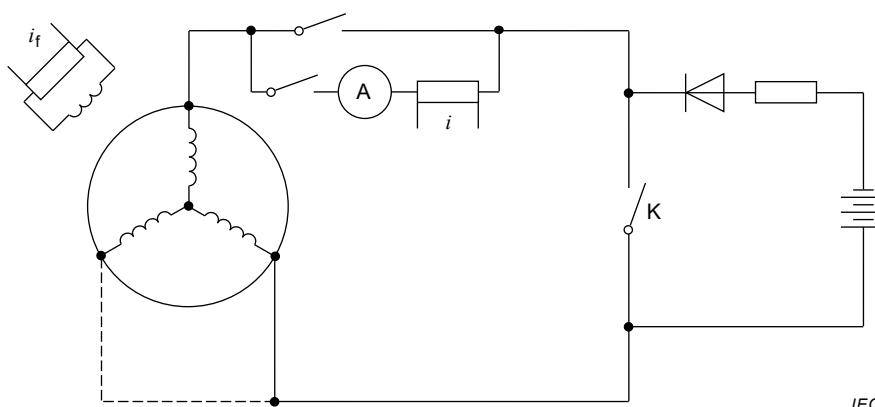


Figure 1 – Schéma pour l'essai de la décroissance du courant à l'arrêt

La résistance du contacteur K doit être sensiblement inférieure à celle de l'enroulement d'induit. La résistance connectée en série avec la source de tension doit être choisie de sorte que la fermeture du contacteur n'affecte pas sensiblement 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 produit la saturation. Une démagnétisation progressive est ensuite réalisée en descendant jusqu'à la valeur du courant d'essai et la source est mise en court-circuit ou déconnectée après la fermeture du contacteur K.

Il convient de procéder à l'enregistrement de tout le courant de décroissance.

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 en fonction du temps. 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 en fonction du temps. 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 sont analysées selon 7.1.4.

Cet essai est en partie adapté aux machines à aimants permanents.

6.15 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 de limiter la durée de l'application de la tension pour éviter un échauffement important.

Le rotor est tourné lentement de manière à déterminer les positions angulaires correspondant aux valeurs maximales et pratiquement nulles 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'enroulement d'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 ($0,2 I_N$ à $0,7 I_N$).

Les grandeurs sont représentées 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.

Dans les machines sans balais, il convient de déconnecter l'enroulement d'excitation du redresseur tournant et qu'il soit court-circuité.

Cet essai n'est pas applicable aux machines à aimants permanents.

6.16 Essai d'application de tension 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.

Si cela est nécessaire, il convient de freiner le rotor. Il convient de limiter la durée de l'application de la tension 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 de 6.15.

Dans les machines sans balais, il convient de déconnecter l'enroulement d'excitation du redresseur tournant et qu'il soit court-circuité.

Cet essai est adapté mais non pertinent pour les machines à aimants permanents.

6.17 Essai de tension monophasée appliquée aux trois phases

Pour réaliser l'essai, une tension monophasée est appliquée aux bornes des trois phases connectées 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 .

Cet essai n'est pas applicable aux machines à aimants permanents.

6.18 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.

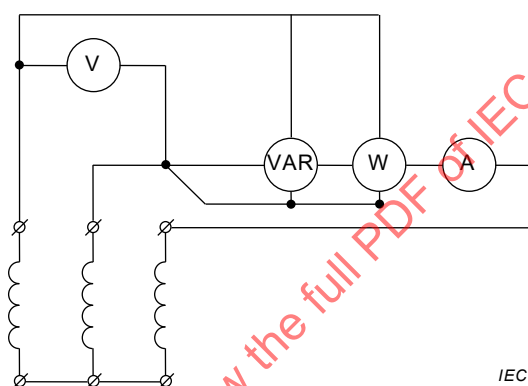


Figure 2 – Schéma de circuit pour l'essai de court-circuit entre phases

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 l'exactitude de mesure 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 effectuées à 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.

Cet essai est en partie adapté aux machines à aimants permanents.

6.19 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).

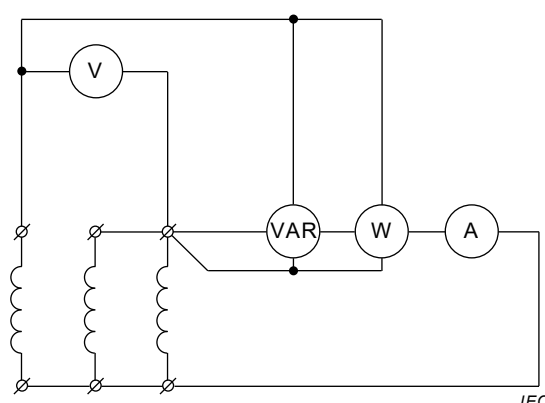


Figure 3 – Schéma de circuit pour l'essai de court-circuit permanent entre phases et le neutre

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, la puissance active et la puissance réactive sont mesurées.

Les mesures sont effectuées 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.

Cet essai est en partie adapté aux machines à aimants permanents.

6.20 Essai de rotation inverse

L'essai est effectué en appliquant une tension symétrique réduite de $0,02 U_N$ à $0,2 U_N$ à la machine entraînée à sa vitesse assignée, connectée à une source extérieure avec un ordre de succession des phases inverse, c'est-à-dire que la machine fonctionne comme un frein électromagnétique avec un glissement égal à 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 de démagnétiser le rotor 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.

Cet essai n'est pas applicable aux machines à aimants permanents.

6.21 Essai de la décroissance du courant d'excitation, avec l'enroulement d'induit en circuit ouvert

6.21.1 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 ensuite mis brusquement en court-circuit. La source d'alimentation de l'enroulement d'excitation peut exiger une déconnexion 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 en fonction temps, la tension de l'enroulement d'induit, le courant dans l'enroulement d'excitation et la tension aux bagues collectrices. Cette dernière permet de déterminer plus précisément le début de la décroissance du courant d'excitation (instant zéro) et la tension initiale à cet instant.

La différence entre la tension transitoire relevée de la fonction temps et la tension résiduelle de la machine est représentée graphiquement en fonction du temps sur une échelle semi-logarithmique.

Cet essai n'est pas applicable aux machines à aimants permanents.

6.21.2 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 déconnexion 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.

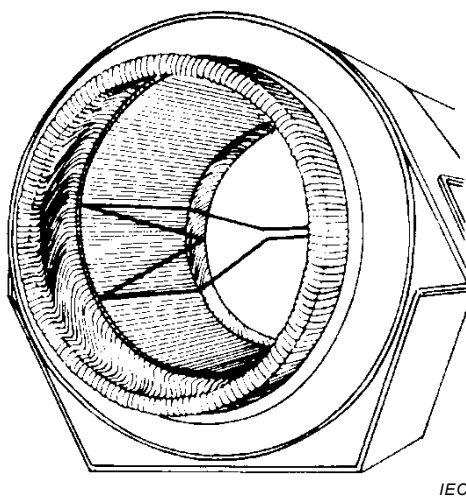
Enregistrer en fonction temps, le courant de l'enroulement d'excitation et représenter en fonction du temps sur une échelle semi-logarithmique.

Cet essai n'est pas applicable aux machines à aimants permanents.

6.22 Essai d'application de tension le rotor étant retiré

Cet essai est effectué en appliquant à l'enroulement d'induit une tension triphasée symétrique à fréquence assignée, le rotor étant retiré.

Une bobine d'exploration 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 noyau d'induit; 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 noyau d'induit de manière à les soustraire à l'influence des flux de fuites autour des têtes de bobine de l'induit (voir Figure 4).



IEC

Figure 4 – Installation de la bobine d'exploration le rotor étant retiré

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 la tension appliquée U , le courant magnétisant dans l'enroulement d'induit I , la puissance absorbée P et la tension de la bobine d'exploration U_c sont mesurés. La tension de la bobine d'exploration doit être mesurée avec un voltmètre à forte résistance interne.

Cet essai est adapté aux machines à aimants permanents.

6.23 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 ne varie pas 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 0,90 par unité ou entre 1,05 et 0,95 par unité.

Cet essai est adapté aux machines à aimants permanents.

6.24 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 de démarrage 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 de réaliser l'essai.

Dans ce cas, une série d'essais à tension réduite peut être réalisée 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 exacte. 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).

Cet essai n'est pas applicable aux machines à aimants permanents.

6.25 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 de démagnétiser le rotor avant de procéder à l'essai de la machine. La tension entre phases, le courant de ligne et la puissance absorbée sont mesurés et enregistrés pendant l'essai. Les calculs tiennent compte des 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 la plage 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 transitoire peut être réalisé avec un faible ralentissement (pas plus de 0,04 fois la vitesse assignée par seconde pour les petites machines; pour des machines de grandes dimensions, le ralentissement est 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).

Cet essai n'est pas applicable aux machines à aimants permanents.

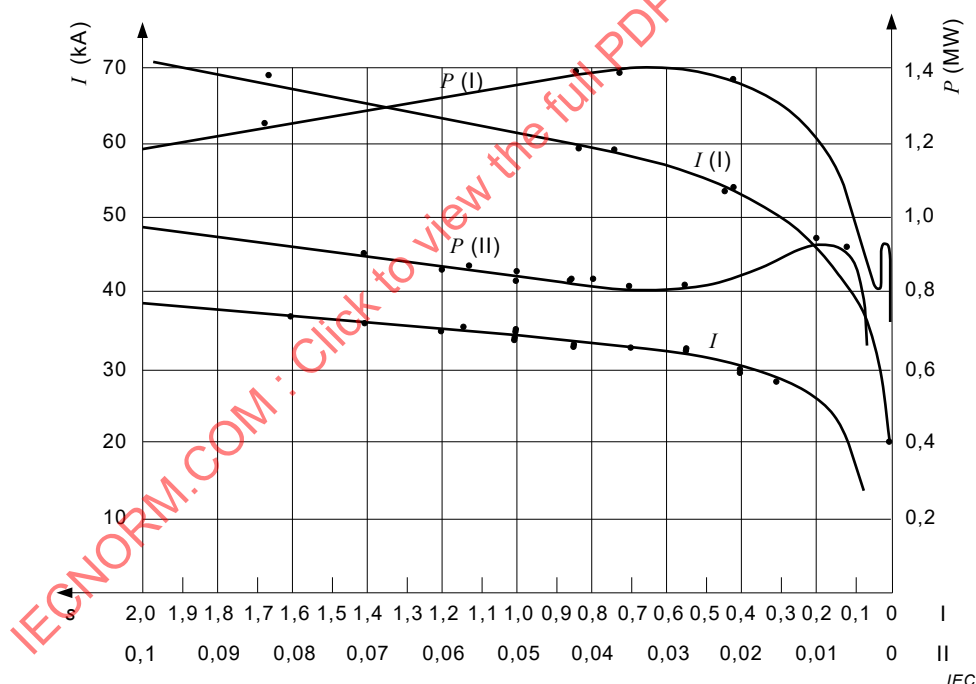


Figure 5 – Puissance et courant en fonction du glissement (exemple)

6.26 Essai de surexcitation au facteur de puissance nul et à tension d'induit variable

L'essai est réalisé avec la machine fonctionnant en génératrice 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.

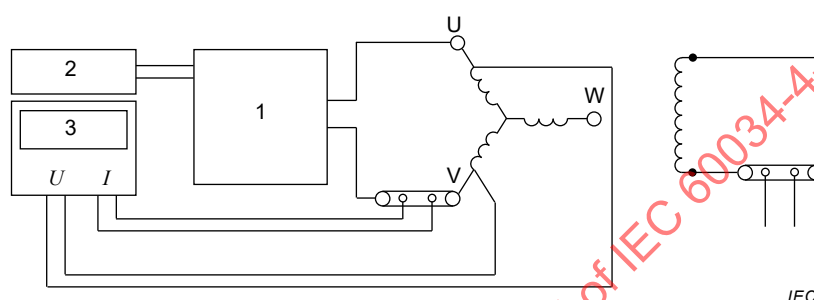
Au cours de l'essai, le courant dans l'enroulement d'induit est maintenu constant et égal à la valeur assignée, la tension d'induit varie depuis au moins la valeur assignée jusqu'à la valeur la plus faible à laquelle la machine reste stable. Pour obtenir une exactitude raisonnable, il convient de réduire la tension d'induit à une valeur inférieure à 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.

Cet essai n'est pas applicable aux machines à aimants permanents.

6.27 Essai d'application de tension à 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 de puissance 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 à fréquence variable à l'arrêt

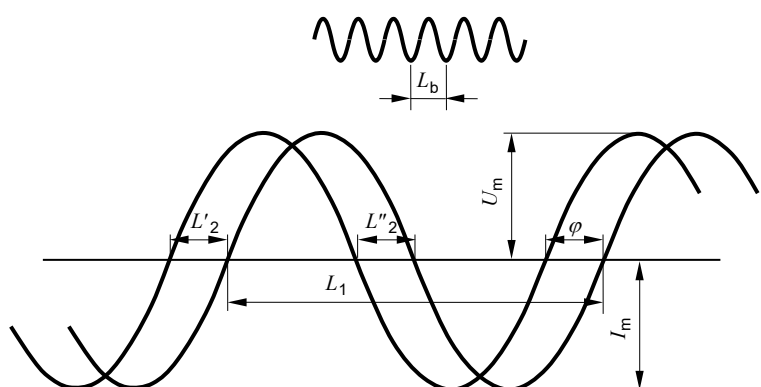
Au cours de l'essai, le rotor est orienté une fois de manière à avoir le courant d'induit maximal dans l'enroulement d'excitation (axe longitudinal) et une fois de manière à avoir le courant d'induit minimal (pratiquement zéro) (axe transversal).

La tension d'alimentation, le courant dans l'enroulement d'induit et leur déphasage mutuel sont mesurés et enregistrés. Pour une détermination par une fonction temps, voir la Figure 7.

Le courant dans l'enroulement d'excitation est enregistré uniquement dans le but d'évaluer la position du rotor. Pour les machines à aimants permanents, la position du rotor doit être déterminée par d'autres moyens.

Le déphasage peut également être 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. À toutes les fréquences, il convient que les valeurs du courant alternatif et du courant continu soient à peu près les mêmes.



IEC

Légende

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

où

L_b = durée de la fréquence d'étalonnage;

L_1 = durée de la fréquence de glissement;

f_b = fréquence d'étalonnage;

f_t = fréquence d'essai;

f_N = fréquence assignée

Figure 7 – Grandeurs enregistrées au cours de l'essai à fréquence variable à l'arrêt (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 l'angle.

Les imprécisions peuvent être considérablement réduites si la chute de tension dans la résistance de l'induit est compensée au cours de l'essai.

La chute de tension dans le shunt et dans la résistance auxiliaire, proportionnelle au courant à mesurer, doit ensuite être soustraite de la tension aux bornes de l'enroulement d'induit.

7 Détermination des grandeurs

7.1 Analyse des données enregistrées

7.1.1 Courbes de saturation à vide et de court-circuit triphasé permanent

Les données obtenues à partir de 6.4.2 (caractéristique de saturation à vide) et 6.5.2 (caractéristique de court-circuit permanent) sont représentées dans une série de courbes conformes à la Figure 8.

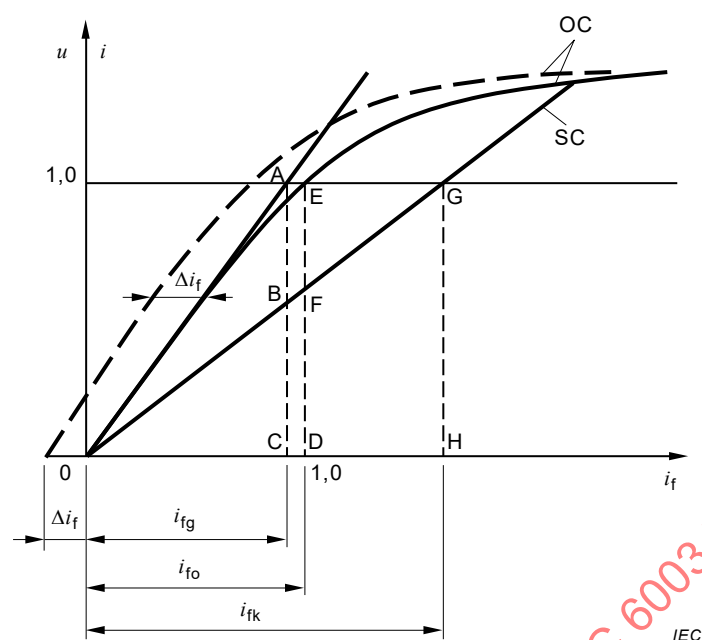


Figure 8 – Courbes combinées de saturation et de court-circuit

Les courbes sont utilisées pour déterminer le rapport de la réactance synchrone longitudinale (7.2.1, 7.2.2) et du court-circuit (7.29).

7.1.2 Essai de court-circuit triphasé brusque

Les variations dans le temps de la composante périodique et de la composante apériodique du courant d'induit dans chacune des phases sont déterminées d'après les enregistrements des courants de court-circuit triphasés en fonction du temps (voir 6.11).

Par conséquent, les enveloppes des courants de court-circuit passant par les crêtes des courants oscillants de phase doivent être déterminées.

Les crêtes sur les enveloppes supérieure et inférieure ne correspondent pas (voir Figure 9). Les points intermédiaires correspondants doivent être calculés sur les deux enveloppes. Pour calculer les points intermédiaires correspondants sur les enveloppes, il convient d'utiliser un algorithme d'interpolation approprié.

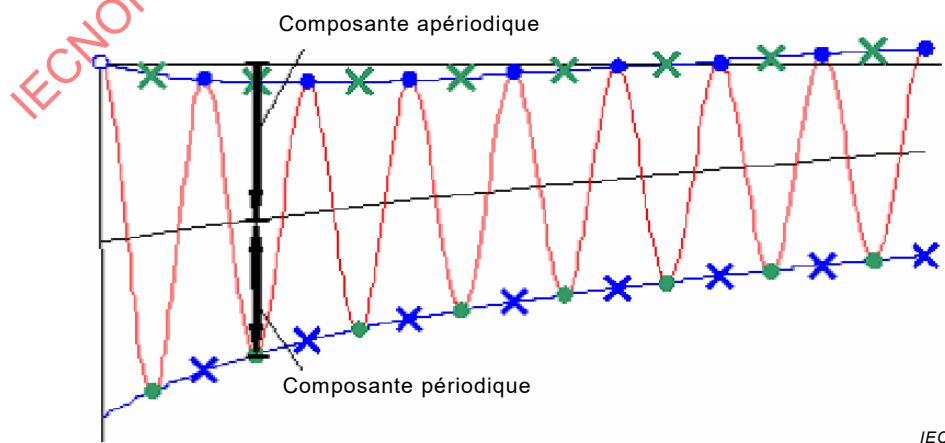


Figure 9 – Détermination des points intermédiaires sur les enveloppes

La courbe de la composante apériodique d'un courant de phase est obtenue en additionnant les valeurs du courant des enveloppes supérieure et inférieure et en divisant par 2. Les valeurs initiales sont déterminées par extrapolation jusqu'au moment du court-circuit, $t = 0$.

La courbe de la composante périodique d'un courant de phase est obtenue en soustrayant les valeurs du courant des enveloppes supérieure et inférieure et en divisant par 2. Les valeurs initiales sont déterminées par extrapolation jusqu'au moment du court-circuit, $t = 0$.

La composante périodique du courant de court-circuit de l'induit est prise comme la moyenne arithmétique des composantes périodiques des enveloppes du courant des trois phases.

Le courant de court-circuit permanent $i(\infty)$ doit être évalué comme une valeur moyenne de plusieurs amplitudes successives du courant de court-circuit périodique à forte décroissance ou à partir de l'essai de court-circuit triphasé permanent (voir 6.5).

Pour déterminer la composante du courant transitoire ($\Delta i'_k$) la valeur du courant de court-circuit permanent $i(\infty)$ est soustraite de la composante périodique du courant d'induit.

Pour déterminer la composante transitoire ($\Delta i'_k$), le logarithme népérien est appliqué sur l'enveloppe transitoire restante des valeurs du courant périodique pendant un intervalle de temps compris entre 5 fois la constante de temps subtransitoire approximative τ''_d (ou 0,2 s) et la constante de temps transitoire approximative τ'_d . La constante de temps transitoire est l'inverse du gradient initial représentatif du courant transitoire logarithmique. Le point d'intersection de la ligne droite représentative avec le gradient initial et de l'axe des ordonnées du diagramme permet de calculer le courant transitoire initial ($\Delta i'_k$) (voir la Figure 10).

Pour déterminer la composante subtransitoire ($\Delta i''_k$), les valeurs du courant de court-circuit transitoire ($\Delta i'_k$) et du courant de court-circuit permanent ($i(\infty)$), sont soustraites de la composante périodique du courant de l'induit.

Pour déterminer la composante subtransitoire ($\Delta i''_k$), le logarithme népérien est appliqué à l'enveloppe subtransitoire restante des valeurs du courant périodique dans un délai limité par le temps maximal de $2 \times \tau''_d$. La constante de temps subtransitoire est l'inverse du gradient initial représentatif les valeurs du courant subtransitoire logarithmique. Le point d'intersection de la ligne droite représentative avec le gradient initial et de l'axe des ordonnées du diagramme permet de calculer le courant subtransitoire initial ($\Delta i''_k$) (voir Figure 11).

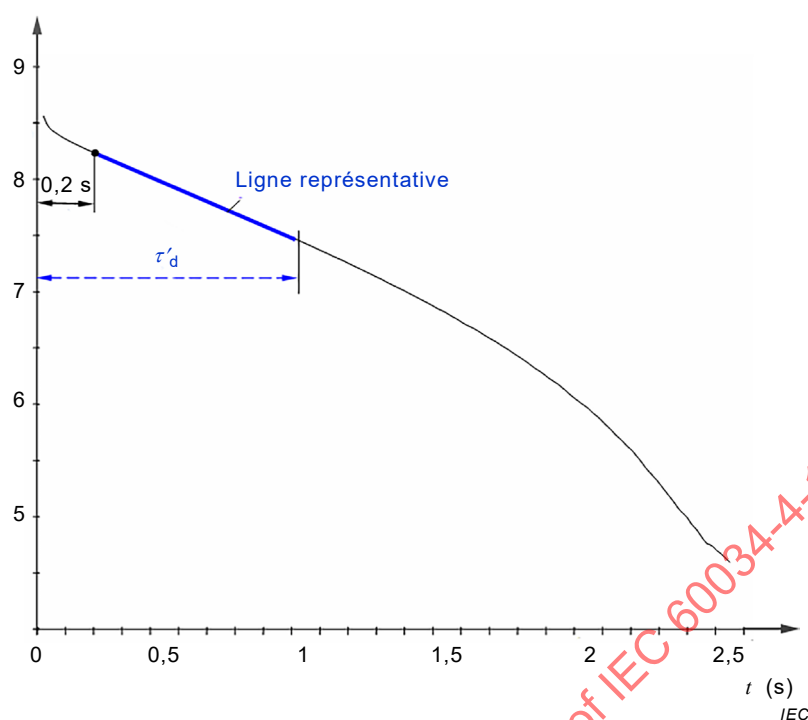


Figure 10 – Détermination de la composante transitoire du courant de court-circuit

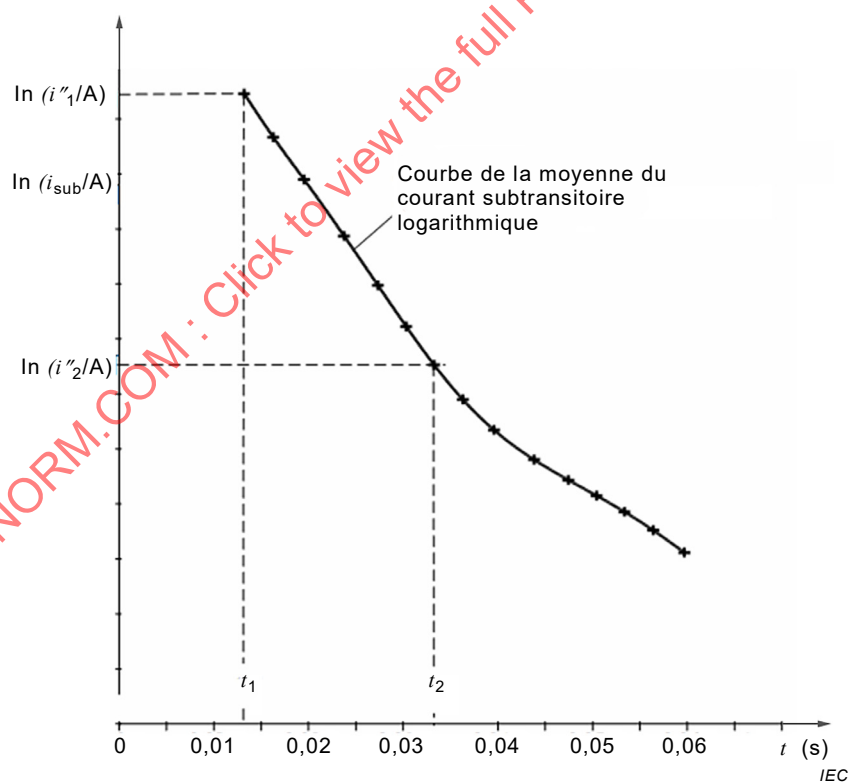


Figure 11 – Détermination de la composante subtransitoire du courant de court-circuit

La plus grande valeur possible de la composante apériodique est déterminée par analyse au moyen de la formule suivante:

$$i_{amax} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{i_{a1}^2 + i_{a2}^2 + i_{a1}i_{a2}}$$

où

i_{a1} , i_{a2} sont les composantes apériodiques initiales du courant de deux des trois phases.

Les valeurs i_{a1} , i_{a2} doivent être insérées avec leur signe, telles qu'obtenues par la procédure de détermination des valeurs des composantes apériodiques initiales.

NOTE La formule est valide lorsque $i_{a1} + i_{a2} + i_{a3} = 0$, et que le déphasage des vecteurs du courant est de $2\pi/3$, respectivement.

La courbe de la composante périodique du courant d'excitation en fonction du temps est déterminée à partir de l'enregistrement du courant d'excitation. L'extrapolation de cette courbe jusqu'au temps zéro donne la valeur initiale de la composante périodique du courant.

Pour les machines sans balais, si le courant d'excitation ne peut pas être enregistré, il convient de déterminer la constante de temps d'induit en court-circuit à partir de la décroissance de la composante apériodique du courant de l'induit.

7.1.3 Essai de rétablissement de la tension

À partir des enregistrements (voir 6.12), la différence entre la tension permanente et la tension déterminée par l'enveloppe de la tension de rétablissement est calculée. Le logarithme népérien est appliqué à l'enveloppe restante des valeurs du courant périodique et extrapolé jusqu'au 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.

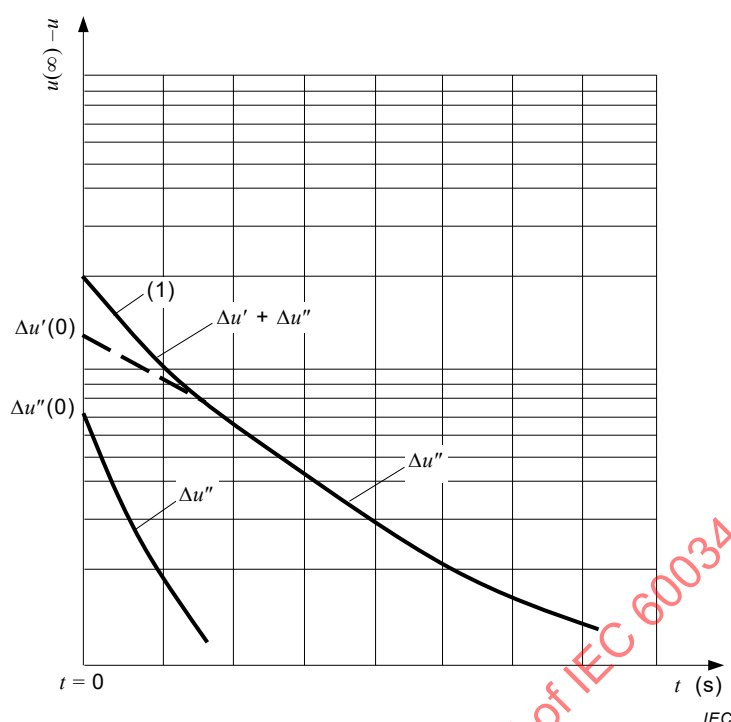


Figure 12 – Composantes transitoire et subtransitoire de la tension de rétablissement

7.1.4 Décroissance du courant dans l'enroulement d'induit à l'arrêt

L'essai (voir 6.14) peut être réalisé avec le rotor dans la position longitudinale ou transversale. La valeur de décroissance du courant 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 pris comme le rapport du courant décroissant induit et du courant induit initial. Ces valeurs de courants décroissants sont représentées graphiquement en fonction du temps sur une échelle semi-logarithmique.

Les valeurs initiales transitoires et subtransitoires et les constantes de temps de ces courants décroissants sont déterminées à l'aide d'une extrapolation linéaire des points d'extrémité (Figure 13 a). L'intersection de l'extrapolation 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.

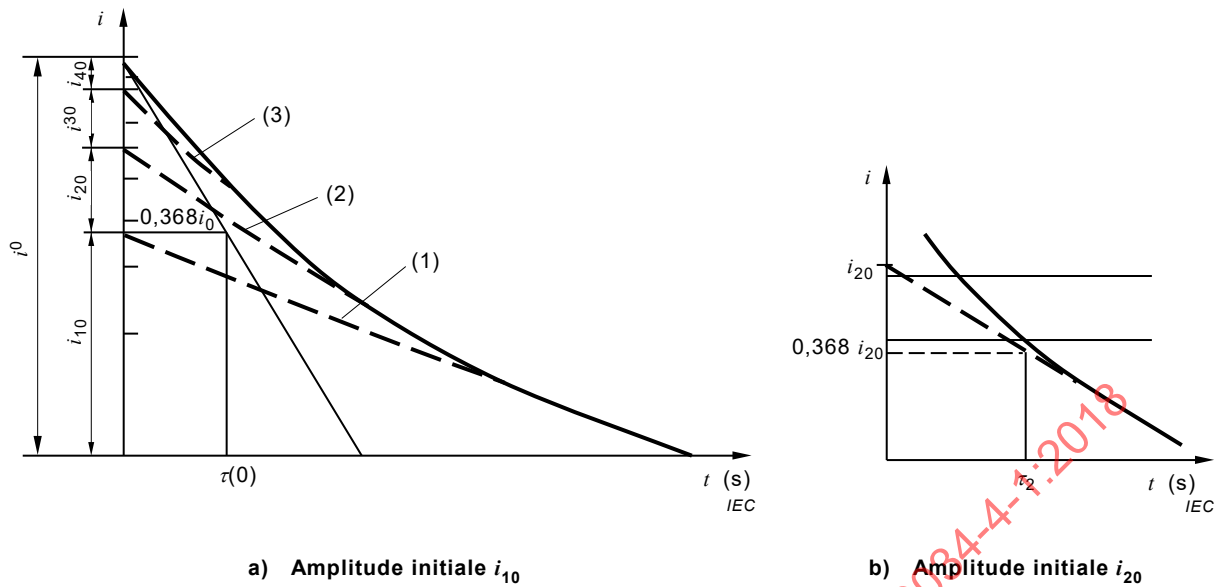


Figure 13 – Représentation graphique semi-logarithmique des courants décroissants

La différence entre la courbe initiale et la première exponentielle est représentée de nouveau en fonction du temps 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 des données se poursuit de cette manière jusqu'au moment où la non-linéarité de la courbe décroissante est négligeable.

Il convient de réaliser simultanément l'analyse du courant décroissant dans l'enroulement d'induit et 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 τ_{kf} pour les rotors massifs. En procédant ainsi, une meilleure exactitude est obtenue pour les caractéristiques de réponse en fréquence. Pour obtenir une meilleure exactitude dans l'analyse des données d'essai en fonction des exponentielles, un programme informatique approprié doit être utilisé.

Les constantes de temps longitudinales des machines synchrones sont déterminées en utilisant des racines connues α_{kd} , α'_{kd} des formules caractéristiques $D_d(p) = 0$ et $D'_d(p) = 0$ (voir l'Annexe B) comme:

$$\begin{aligned} \tau'_d &= \frac{1}{\omega \alpha'_{1d}}; & \tau''_d &= \frac{1}{\omega \alpha'_{2d}}; & \tau'''_d &= \frac{1}{\omega \alpha'_{3d}}; \\ \tau'_{do} &= \frac{1}{\omega \alpha_{1d}}; & \tau''_{do} &= \frac{1}{\omega \alpha_{2d}}; & \tau'''_{do} &= \frac{1}{\omega \alpha_{3d}}; \end{aligned}$$

où

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

De même, les constantes de temps transversales sont déterminées en utilisant des racines connues α_{kq} , α'_{kq} des équations $D_q(p) = 0$ et $D'_q(p) = 0$ (voir l'Annexe B) comme:

$$\begin{aligned} \tau'_q &= \frac{1}{\omega \alpha'_{1q}}; & \tau''_q &= \frac{1}{\omega \alpha'_{2q}}; & \tau'''_q &= \frac{1}{\omega \alpha'_{3q}} \\ \tau'_{qo} &= \frac{1}{\omega \alpha_{1q}}; & \tau''_{qo} &= \frac{1}{\omega \alpha_{2q}}; & \tau'''_{qo} &= \frac{1}{\omega \alpha_{3q}} \end{aligned}$$

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. Ces données sont extrapolées jusqu'au moment de la fermeture de l'interrupteur de la connexion d'excitation (voir Figure 14) par un algorithme d'interpolation approprié. L'extrapolation linéaire 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 machines de grandes dimensions, la tension résiduelle peut généralement être négligée.

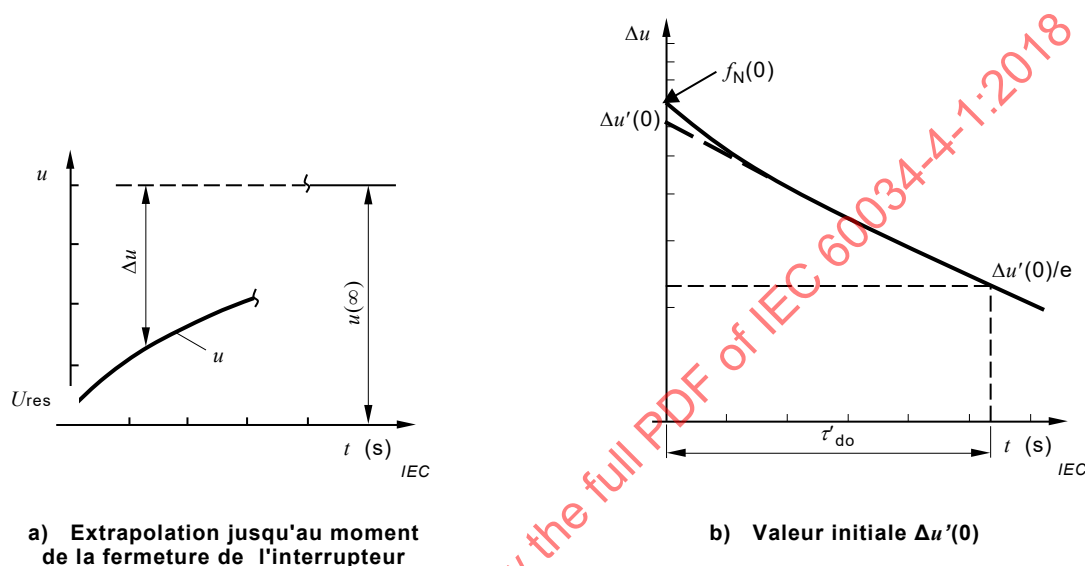


Figure 14 – Application brusque de l'excitation avec enroulement d'induit en circuit ouvert

7.2 Réactance synchrone longitudinale

7.2.1 À 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 droite 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 À partir de l'essai de moteur à vide

Une valeur non saturée de X_d est déterminée à partir de:

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

où la tension aux bornes U et le courant de l'enroulement d'induit I sont issus de 6.6.

7.2.3 À partir de l'essai en charge avec mesure de l'angle de charge

La détermination de X_d par la méthode de mesure de l'angle de charge (voir 6.9) est réalisée grâce à 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 prise (comme à la Figure 8), et 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 charge mesuré.

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. Le 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 À partir de l'essai de court-circuit triphasé brusque

Une valeur de X'_d est déterminée à partir de

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

où

$U(0)$ est la tension à vide, mesurée immédiatement avant le court-circuit (voir 6.11);

$I(\infty), \Delta I'_k(0)$ sont déterminés selon 7.1.2.

7.3.2 À 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 (6.12) telles qu'elles sont analysées selon 7.1.3.

7.3.3 À partir de l'essai de la décroissance du courant dans l'enroulement d'induit à l'arrêt

Calculer:

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

Où C_{1d} est tel que spécifié dans 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 À 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 la fonction temps (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 À 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 6.12) telles qu'elles sont analysées selon 7.1.3.

7.4.3 À partir de l'essai d'application de tension avec rotor longitudinal et transversal

La réactance subtransitoire X''_d obtenue à partir de l'essai d'application de tension est déterminée grâce à la formule:

$$X''_d = \sqrt{Z''_d^2 - R''_d^2}$$

$$\text{où } Z''_d = \frac{U}{2I} ; \quad R''_d = \frac{P}{2I^2} ; \quad \left[x''_d = \sqrt{z''_d^2 - r''_d^2} ; \quad z''_d = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{u}{i} ; \quad r''_d = \frac{3}{2} \cdot \frac{p}{i^2} \right]$$

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 6.15.

7.4.4 À 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 6.16) 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 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 À partir de l'essai d'excitation négative

La détermination de X_q à partir de l'essai d'excitation négative de 6.8 est réalisée 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 pas polaire; 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 pas polaire (voir Figure 15);

u_r est la tension au moment où la machine glisse d'un pas polaire;

(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 pas polaire est mesuré au cours de l'essai, x_q est déterminé grâce à la formule:

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

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 généralement être réduite à 0,6 de la valeur assignée ou à une valeur inférieure.

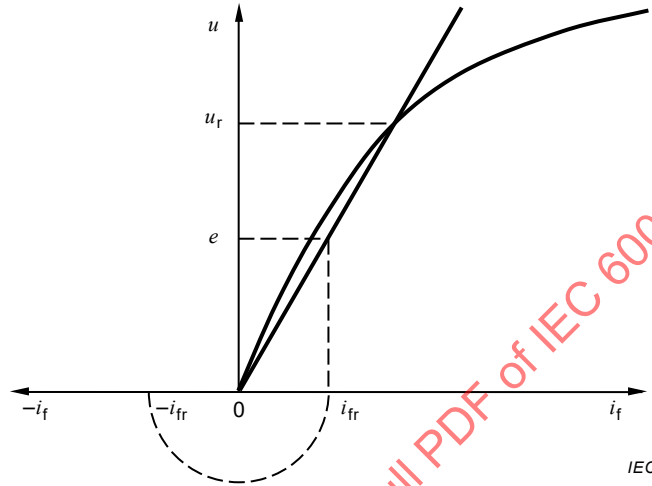


Figure 15 – F.é.m à vide et courant d'excitation pour glissement d'un pas polaire

7.5.2 À partir de l'essai à faible glissement

Pour déterminer X_q à partir de l'essai à faible glissement (voir 6.10), le courant et la tension d'induit sont mesurés à la tension maximale de l'enroulement d'excitation U_{fo} , et X_q est calculée grâce à la formule suivante:

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

Si $I_{\max}$ ne coïncide pas avec $U_{\min}$, utiliser $I_{\max}$ comme base dans les calculs avec sa tension correspondante.

Si, au cours de l'essai, la tension résiduelle de la machine U_{res} est comprise entre 0,1 et 0,3 de la tension d'alimentation pour l'essai, la valeur du courant est déterminée grâce à la formule:

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

où I_{av} est la demi-somme de deux valeurs maximales consécutives de la courbe enveloppe du courant (voir Figure 16).