

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

(affiliée à l'Organisation Internationale de Normalisation — ISO)

RAPPORT DE LA CEI

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

(affiliated to the International Organization for Standardization — ISO)

IEC REPORT

Publication 34-4A

1972

Premier complément à la Publication 34-4 (1967)

**Recommandations pour les machines électriques tournantes
(à l'exclusion des machines pour véhicules de traction)**

**Quatrième partie Méthodes pour la détermination à partir d'essais des grandeurs
des machines synchrones**

**Méthodes non confirmées pour la détermination à partir
d'essais des grandeurs des machines synchrones**

First supplement to Publication 34-4 (1967)

**Recommendations for rotating electrical machinery
(excluding machines for traction vehicles)**

Part 4 Methods for determining synchronous machine quantities from tests

**Unconfirmed test methods for determining
synchronous machine quantities**



Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale

1, rue de Varembé
Genève, Suisse

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

(affiliée à l'Organisation Internationale de Normalisation — ISO)

RAPPORT DE LA CEI

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

(affiliated to the International Organization for Standardization — ISO)

IEC REPORT

Publication 34-4A

1972

Premier complément à la Publication 34-4 (1967)

**Recommandations pour les machines électriques tournantes
(à l'exclusion des machines pour véhicules de traction)**

**Quatrième partie: Méthodes pour la détermination à partir d'essais des grandeurs
des machines synchrones**

**Méthodes non confirmées pour la détermination à partir
d'essais des grandeurs des machines synchrones**

First supplement to Publication 34-4 (1967)

**Recommendations for rotating electrical machinery
(excluding machines for traction vehicles)**

Part 4 Methods for determining synchronous machine quantities from tests

**Unconfirmed test methods for determining
synchronous machine quantities**



Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

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'éditeur

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 the publisher

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale

1, rue de Varembe

Genève, Suisse

SOMMAIRE

	Pages
PRÉAMBULE	6
PRÉFACE	6
Articles	
SECTION UN – DOMAINE D'APPLICATION	
1 Domaine d'application	8
SECTION DEUX – OBJET	
2 Objet	8
SECTION TROIS – GÉNÉRALITÉS	
3 Généralités	10
SECTION QUATRE – TERMINOLOGIE ET MÉTHODES D'ÉTUDES EXPÉRIMENTALES	
4 Courant d'excitation correspondant au courant d'induit nominal en court-circuit (i_{tk})	10
5 Réactance synchrone longitudinale X_d	10
6 Réactance synchrone transversale X_q	12
7 Réactance transitoire longitudinale X'_d	12
8 Réactance transitoire transversale X'_q	12
9 Réactance subtransitoire transversale X''_q	12
10 Réactance inverse X_2	14
11 Réactance de fuites d'induit X_σ	14
12 Impédance de démarrage initiale des moteurs synchrones Z_{st}	14
13 Constante de temps transitoire longitudinale à circuit ouvert τ'_{do}	14
14 Constante de temps transitoire longitudinale en court-circuit τ'_d	16
15 Constante de temps transitoire transversale à circuit ouvert τ'_{qo}	16
16 Constante de temps transitoire transversale en court-circuit τ'_q	16
17 Constante de temps subtransitoire longitudinale à circuit ouvert τ''_{do}	16
18 Constante de temps subtransitoire transversale à circuit ouvert τ''_{qo}	18
19 Constante de temps subtransitoire transversale en court-circuit τ''_q	18
20 Constante de temps longitudinale à circuit ouvert de l'enroulement d'excitation τ_{rdo}	18
21 Constante de temps longitudinale à circuit ouvert du circuit amortisseur équivalent τ_{kdo}	20
22 Constante de temps longitudinale en court-circuit de l'enroulement d'excitation τ_{rd}	20
23 Constante de temps longitudinale en court-circuit du circuit amortisseur équivalent τ_{kd}	20
24 Caractéristiques de réponse en fréquence	20
SECTION CINQ – DESCRIPTION DES ESSAIS ET DÉTERMINATION DES GRANDEURS ET DES CARACTÉRISTIQUES À PARTIR DES ESSAIS	
25 Essai de surexcitation à facteur de puissance nul et à tension d'induit variable	22
26 Détermination du courant d'excitation correspondant au courant d'induit nominal en court-circuit (i_{tk})	22
27 Essai avec angle interne variable	24
28 Détermination des grandeurs à partir d'un essai avec angle interne variable	24
29 Essai de suppression d'une basse tension appliquée à l'induit lors d'un essai à un très faible glissement	24
30 Détermination des grandeurs à partir de l'essai de suppression d'une basse tension appliquée à l'induit lors d'un essai à un très faible glissement	26
31 Essai de suppression d'une basse tension appliquée à l'induit, la machine tournant en asynchrone en charge	28
32 Détermination des grandeurs à partir de l'essai de suppression brusque d'une basse tension appliquée à l'induit, la machine tournant en asynchrone en charge	30

CONTENTS

	Page
FOREWORD	7
PREFACE	7
Clause	
SECTION ONE – SCOPE	
1 Scope	9
SECTION TWO – OBJECT	
2 Object	9
SECTION THREE – GENERAL	
3 General	11
SECTION FOUR – TERMINOLOGY AND METHODS OF EXPERIMENTAL STUDY	
4 Excitation current corresponding to the rated armature (primary) short-circuit current (i_{fk})	11
5 Direct-axis synchronous reactance X_d	11
6 Quadrature-axis synchronous reactance X_q	13
7 Direct-axis transient reactance X'_d	13
8 Quadrature-axis transient reactance X'_q	13
9 Quadrature-axis subtransient reactance X''_q	13
10 Negative-sequence reactance X_2	15
11 Armature-leakage reactance X_σ	15
12 Initial starting impedance of synchronous motors Z_{st}	15
13 Direct-axis transient open-circuit time constant τ_{do}	15
14 Direct-axis transient short-circuit time constant τ'_d	17
15 Quadrature-axis transient open-circuit time constant τ_{qo}	17
16 Quadrature-axis transient short-circuit time constant τ'_q	17
17 Direct-axis subtransient open-circuit time constant τ''_{do}	17
18 Quadrature-axis subtransient open-circuit time constant τ''_{qo}	19
19 Quadrature-axis subtransient short-circuit time constant τ''_q	19
20 Direct-axis open-circuit excitation winding time constant τ_{fd0}	19
21 Direct-axis open-circuit equivalent damper circuit time constant τ_{kdo}	21
22 Direct-axis short-circuit excitation winding time constant τ_{fd}	21
23 Direct-axis short-circuit equivalent damper winding time constant τ_{kd}	21
24 Frequency response characteristics	21
SECTION FIVE – DESCRIPTION OF THE TESTS AND DETERMINATION OF QUANTITIES AND CHARACTERISTICS FROM THESE TESTS	
25 Over-excitation test at zero power factor and variable armature voltage	23
26 Determination of the excitation current corresponding to the rated armature sustained short-circuit current (i_{fk})	23
27 Phase shifting test	25
28 Determination of quantities from the phase shifting test	25
29 Disconnecting applied low armature voltage at a very low-slip test	25
30 Determination of quantities from the disconnecting applied low armature voltage at a very low-slip test	27
31 Disconnecting applied low armature voltage test, the machine running asynchronously on load	29
32 Determination of quantities from the sudden disconnection of applied low armature voltage, the machine running asynchronously on load, test	31

Articles	Pages
33 Essai de mise en court-circuit brusque de la machine, tournant en charge, alimentée à basse tension	32
34 Détermination des grandeurs au moyen d'un court-circuit brusque de la machine tournant en charge au cours d'un essai à basse tension	32
35 Essai de court-circuit brusque entre deux phases	34
36 Détermination de la réactance inverse à partir de l'essai de court-circuit brusque entre deux phases	34
37 Essai de court-circuit triphasé brusque appliqué à la machine après déconnexion de la ligne	36
38 Détermination des grandeurs à partir de l'essai de court-circuit triphasé brusque appliqué à la machine après déconnexion de la ligne	36
39 Essai d'application d'une tension avec le rotor enlevé	36
40 Détermination des grandeurs à partir de l'essai d'application d'une tension	36
41 Essai à rotor bloqué	38
42 Détermination de l'impédance de démarrage initiale au moyen de l'essai à rotor bloqué	40
43 Essai d'application brusque de l'excitation avec l'enroulement induit à circuit ouvert	40
44 Détermination de τ_{d0} à partir de l'essai d'application brusque de l'excitation avec l'enroulement induit à circuit ouvert	42
45 Essai d'application brusque de l'excitation avec l'enroulement induit en court-circuit	42
46 Détermination de τ'_d à partir de l'essai d'application brusque de l'excitation avec l'enroulement induit en court-circuit	42
47 Essai de rétablissement de la tension	42
48 Détermination des grandeurs à partir de l'essai de rétablissement de la tension	44
49 Essai d'extinction du champ avec l'enroulement induit à circuit ouvert	44
50 Détermination des grandeurs à partir de l'essai d'extinction du champ avec l'enroulement induit à circuit ouvert	44
51 Essai d'extinction du champ avec l'enroulement induit en court-circuit	48
52 Détermination des grandeurs à partir de l'essai d'extinction du champ avec l'enroulement induit en court-circuit	48
53 Essai de fonctionnement en asynchrone en charge	48
54 Détermination des caractéristiques de réponse en fréquence et des grandeurs à partir de l'essai de fonctionnement en asynchrone en charge	50
55 Essai de fonctionnement en asynchrone à basse tension	52
56 Détermination des caractéristiques de réponse en fréquence et des grandeurs à partir de l'essai de fonctionnement en asynchrone à basse tension	52
57 Essai d'application à l'arrêt d'une tension de fréquence variable	54
58 Détermination des caractéristiques de réponse en fréquence et des grandeurs à partir de l'essai d'application à l'arrêt d'une tension de fréquence variable	54
59 Essai de décroissance d'un courant continu dans l'enroulement induit à l'arrêt	58
60 Détermination des caractéristiques de réponse en fréquence et des grandeurs à partir de l'essai de décroissance d'un courant continu dans l'induit	60
61 Essai d'application brusque d'un courant continu à l'arrêt	66
62 Détermination des caractéristiques de réponse en fréquence à partir de l'essai d'application brusque à l'arrêt d'un courant continu	70
63 Détermination des grandeurs par calcul en utilisant des grandeurs connues au moyen d'essais	72
TABLEAU DE RENVOI	74
LISTE DE RÉFÉRENCES	80
FIGURES	84

Clause	Page
33 Sudden short-circuiting of machine, running on load at low-voltage, test	33
34 Determination of quantities from sudden short-circuiting, running on load at low voltage test	33
35 Sudden line-to-line short-circuit test	35
36 Determination of negative-sequence reactance from the sudden line-to-line short-circuit test	35
37 Suddenly applied short-circuit test following disconnection from line	37
38 Determination of quantities from the suddenly applied short-circuit test following disconnection from line	37
39 Applied voltage test with rotor removed	37
40 Determination of quantities from the applied voltage test	37
41 Locked rotor test	39
42 Determination of initial starting impedance from the locked rotor test	41
43 Suddenly applied excitation test with armature (primary) winding open-circuited	41
44 Determination of τ'_{do} from the suddenly applied excitation test with armature (primary) winding open-circuited	43
45 Suddenly applied excitation test with armature (primary) winding short-circuited	43
46 Determination of τ'_d from suddenly applied excitation test with armature (primary) winding short-circuited	43
47 Voltage recovery test	43
48 Determination of quantities from the voltage recovery test	45
49 Field extinguishing test with armature (primary) winding open-circuited	45
50 Determination of quantities from the field extinguishing test with armature (primary) winding open-circuited	45
51 Field extinguishing test with armature (primary) winding short-circuited	49
52 Determination of quantities from the field extinguishing test with armature (primary) winding short-circuited	49
53 Asynchronous operation on-load test	49
54 Determination of frequency response characteristics and quantities from the asynchronous operation on-load test	51
55 Asynchronous operation during the low-voltage test	53
56 Determination of the frequency response characteristics and quantities from the asynchronous low-voltage operation test	53
57 Applied variable frequency voltage test at standstill	55
58 Determination of the frequency response characteristics and quantities from the applied variable frequency voltage test at standstill	55
59 D C decay in the armature (primary) winding at standstill test	59
60 Determination of frequency response characteristics and quantities from the d c decay test	61
61 Suddenly applied d c at standstill test	67
62 Determination of frequency response characteristics from the suddenly applied d c at standstill test	71
63 Determination of quantities by calculation using known test quantities	73
CROSS-REFERENCE TABLE	75
REFERENCE LIST	81
FIGURES	85

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

PREMIER COMPLÉMENT À LA PUBLICATION 34-4 (1967)

Recommandations pour les machines électriques tournantes
(à l'exclusion des machines pour véhicules de traction)

Quatrième partie: Méthodes pour la détermination à partir d'essais des grandeurs
des machines synchrones

MÉTHODES NON CONFIRMÉES POUR LA DÉTERMINATION À PARTIR
D'ESSAIS DES GRANDEURS DES MACHINES SYNCHRONES

PRÉAMBULE

- 1) Les décisions ou accords officiels de la CEI en ce qui concerne les questions techniques, préparés par des Comités d'Etudes où sont représentés tous les Comités nationaux s'intéressant à ces questions, expriment dans la plus grande mesure possible un accord international sur les sujets examinés
- 2) Ces décisions constituent des recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux
- 3) Dans le but d'encourager cette unification internationale, la CEI exprime le vœu que tous les Comités nationaux ne possédant pas encore de règles nationales, lorsqu'ils préparent ces règles, prennent comme base fondamentale de ces règles les recommandations de la CEI dans la mesure où les conditions nationales le permettent
- 4) On reconnaît qu'il est désirable que l'accord international sur ces questions soit suivi d'un effort pour harmoniser les règles nationales de normalisation avec ces recommandations dans la mesure où les conditions nationales le permettent. Les Comités nationaux s'engagent à user de leur influence dans ce but

PRÉFACE

Le présent rapport a été établi par le Sous-Comité 2G: Grandeurs des machines synchrones et des machines à induction, du Comité d'Etudes N° 2 de la CEI: Machines tournantes

Un premier projet fut discuté lors des réunions tenues à Tokyo en 1965 et à Rome en 1967, à la suite de quoi un nouveau projet fut soumis à l'approbation des Comités nationaux suivant la Règle des Six Mois en octobre 1969

Les pays suivants se sont prononcés explicitement en faveur de la publication du présent rapport

Afrique du Sud	Italie
Allemagne	Japon
Australie	Pays-Bas
Autriche	Royaume-Uni
Belgique	Suède
Danemark	Suisse
Etats-Unis d'Amérique	Turquie
France	Union des Républiques Socialistes Soviétiques
Iran	Yougoslavie
Israël	

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

FIRST SUPPLEMENT TO PUBLICATION 34-4 (1967)

Recommendations for rotating electrical machinery
(excluding machines for traction vehicles)

Part 4: Methods for determining synchronous machine quantities from tests

UNCONFIRMED TEST METHODS FOR DETERMINING
SYNCHRONOUS MACHINE QUANTITIES

FOREWORD

- 1) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, prepared by Technical Committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with
- 2) They have the form of recommendations for international use and they are accepted by the National Committees in that sense
- 3) In order to promote this international unification, the IEC expresses the wish that all National Committees having as yet no national rules, when preparing such rules, should use the IEC recommendations as the fundamental basis for these rules in so far as national conditions will permit
- 4) The desirability is recognized of extending international agreement on these matters through an endeavour to harmonize national standardization rules with these recommendations in so far as national conditions will permit. The National Committees pledge their influence towards that end

PREFACE

This Report has been prepared by Sub-Committee 2G, Synchronous and Induction Machine Quantities, of IEC Technical Committee No. 2, Rotating Machinery

A first draft was discussed at the meetings held in Tokyo in 1965 and in Rome in 1967, as a result of which a new draft was submitted to the National Committees for approval under the Six Months' Rule in October 1969

The following countries voted explicitly in favour of publication of this Report:

Australia	Netherlands
Austria	South Africa
Belgium	Sweden
Denmark	Switzerland
France	Turkey
Germany	Union of Soviet Socialist Republics
Iran	United Kingdom
Israel	United States of America
Italy	Yugoslavia
Japan	

PREMIER COMPLÉMENT À LA PUBLICATION 34-4 (1967)

Recommandations pour les machines électriques tournantes (à l'exclusion des machines pour véhicules de traction)

Quatrième partie: Méthodes pour la détermination à partir d'essais des grandeurs des machines synchrones

MÉTHODES NON CONFIRMÉES POUR LA DÉTERMINATION À PARTIR D'ESSAIS DES GRANDEURS DES MACHINES SYNCHRONES

SECTION UN — DOMAINE D'APPLICATION

1 Domaine d'application

Le présent rapport est applicable aux machines synchrones triphasées de puissance nominale égale à 1 kVA et plus et dont la fréquence nominale n'est ni supérieure à 500 Hz, ni inférieure à 10 Hz

Les méthodes d'essai ne sont pas destinées à être appliquées à des machines synchrones spéciales, telles que les machines à aimants inducteurs permanents, les machines du type magnéto, etc. Bien que les essais s'appliquent également de façon générale aux machines sans balais, certaines différences existent et des précautions particulières doivent être prises

SECTION DEUX — OBJET

2 Objet

L'objet de ce rapport est d'établir, en vue d'une étude plus approfondie, des méthodes permettant de déterminer, en partant d'essais, certaines caractéristiques et grandeurs des machines synchrones triphasées, qui n'ont pas pu être introduites dans la Publication 34-4 de la CEI en raison d'une vérification insuffisante à l'échelon international au moment de la préparation de ladite publication

Il n'entre pas dans les intentions de ce rapport qu'il puisse être interprété comme impliquant l'exécution sur une machine donnée de l'un quelconque ou de l'ensemble des essais qui y sont décrits. Les essais particuliers à effectuer doivent faire l'objet d'un accord spécial. Ils complètent les essais recommandés par la Publication 34-4 de la CEI

Ce rapport propose, en outre, en vue d'un complément d'études, plusieurs méthodes d'essai complétant celles qui sont déjà acceptées pour la Publication 34-4 de la CEI et permettant la détermination des caractéristiques et des grandeurs

A tous ceux qu'intéresse l'étude, en tout ou partie, des méthodes mentionnées ci-après, ou à ceux qui désireraient introduire de nouvelles méthodes, il est recommandé de porter leur attention sur les résultats obtenus avec ces nouvelles méthodes, comparativement à ceux obtenus avec des méthodes correspondantes bien établies, sur la simplicité d'exécution des essais et sur la concordance des résultats obtenus. Il est également souhaitable de déterminer des méthodes qui donnent les résultats les plus exacts possible pour chacune des applications pour lesquelles on a besoin des grandeurs ou des caractéristiques

Toute information relative aux essais effectués conformément à ce rapport et avec des méthodes acceptées doit être envoyée au Secrétariat du Sous-Comité 2G pour généralisation et diffusion aux Comités nationaux en vue de faciliter l'étude de nouvelles méthodes et le choix des méthodes recommandées

Cela ne constitue pas un engagement et les auteurs sont libres de publier les résultats de leurs travaux sous une forme quelconque (revues techniques périodiques, livres, etc.) s'ils le désirent

FIRST SUPPLEMENT TO PUBLICATION 34-4 (1967)

Recommendations for rotating electrical machinery (excluding machines for traction vehicles)

Part 4: Methods for determining synchronous machine quantities from tests

UNCONFIRMED TEST METHODS FOR DETERMINING SYNCHRONOUS MACHINE QUANTITIES

SECTION ONE — SCOPE

1 Scope

This Report applies to three-phase synchronous machines of 1 kVA rating and larger with rated frequency not more than 500 Hz and not lower than 10 Hz

The test methods are not intended to apply to special synchronous machines such as permanent magnet machines, inductor type machines, etc. Although the tests also apply in general to brushless machines, certain variations do exist and special precautions should be taken

SECTION TWO — OBJECT

2 Object

The object of this Report is to establish for further study, methods of determining those characteristics and quantities of three-phase synchronous machines from tests which were not included in IEC Publication 34-4 due to lack of international verification at the time of preparation of that publication

It is not intended that this Report should be interpreted as requiring the carrying out of any or all the tests described therein on any given machine. The particular tests to be carried out shall be subject to a special agreement. They shall supplement tests recommended by IEC Publication 34-4

This Report proposes also for further study, several methods of test procedure for obtaining characteristics and quantities additional to those that have already been accepted for IEC Publication 34-4

Those concerned with the study of the methods mentioned below in whole or in part, or those who would like to introduce some new methods, are requested to bear in mind the results obtained by these new methods in comparison with the corresponding well-established ones, the simplicity of the test performance and the consistency of the results obtained. It is also desirable to determine methods that give the most accurate results for each of the purposes for which the quantities or characteristics are required

Any information on comparative results of the tests performed according to this Report and of the accepted methods should be sent to the Secretariat of Sub-Committee 2G for further generalization and circulation to National Committees so as to facilitate the study of new methods and to select recommended ones

Such information would not constitute a binding agreement and authors may publish the results of their studies in any form (periodical technical magazines, books, etc.) if they so desire

SECTION TROIS — GÉNÉRALITÉS

3 Généralités

Les prescriptions et recommandations générales pour l'étude expérimentale, le choix des appareils de mesure et la désignation des circuits des machines synchrones sont les mêmes que celles données dans la Publication 34-4 de la CEI, section deux

- 3 1 Les définitions de la plupart des grandeurs et les méthodes expérimentales de leur détermination, telles qu'elles sont données dans le présent rapport, sont fondées sur la théorie des deux axes des machines synchrones, largement acceptée et prise pour base dans la Publication 34-4 de la CEI, paragraphe 3 6, avec représentation approximative de tous les circuits s'ajoutant à l'enroulement d'excitation et fixes par rapport à lui par deux circuits équivalents, l'un d'axe longitudinal et l'autre d'axe transversal, la résistance d'induit étant prise approximativement en considération. Toutefois, l'expérience a montré que, pour les machines à rotor massif en particulier, un nombre aussi limité de circuits, surtout d'axe transversal, rend difficile la détermination expérimentale des grandeurs et fait que les résultats des études analytiques des machines synchrones en régime transitoire ou asynchrone diffèrent dans ce cas de leur comportement réel. En outre, des machines à enroulement d'excitation d'axe longitudinal et d'axe transversal ont été introduites dans la pratique

C'est pourquoi on a pris en compte dans ce rapport deux circuits rotoriques et plus, pour chacun des deux axes longitudinal et transversal. Par exemple, la réactance transitoire transversale et les constantes de temps transitoires transversales sont introduites pour représenter un circuit rotorique additionnel équivalent d'axe transversal de manière à former deux circuits en tout, en déterminant les grandeurs à partir des caractéristiques de réponse en fréquence, il est possible de considérer plus de deux circuits rotoriques équivalents des deux axes longitudinal et transversal

Ces innovations ont été introduites dans ce rapport en vue de faire face au développement futur de la construction des machines synchrones et de la théorie utilisée pour les études des phénomènes transitoires et asynchrones

SECTION QUATRE — TERMINOLOGIE ET MÉTHODES D'ÉTUDES EXPÉRIMENTALES

4 Courant d'excitation correspondant au courant d'induit nominal en court-circuit (i_{TK})

Le courant dans l'enroulement d'excitation lorsque la machine tourne à sa vitesse nominale et avec le courant d'induit nominal établi, l'enroulement induit étant court-circuité

- 4 1 Le courant d'excitation correspondant au courant d'induit nominal en court-circuit, en complément aux méthodes spécifiées dans la Publication 34-4 de la CEI, article 27, peut être déterminé à partir de l'essai de surexcitation à facteur de puissance nul et à tension d'induit variable (voir articles 25 et 26)

5 Réactance synchrone longitudinale X_a

Pour la définition de la réactance synchrone longitudinale, voir la Publication 34-4 de la CEI, article 4

- 5 1 La réactance synchrone longitudinale X_a correspondant à l'état non saturé peut être déterminée, en complément à la méthode décrite dans la Publication 34-4 de la CEI, paragraphe 4.1, au moyen de l'essai avec angle interne variable (voir articles 27 et 28)

SECTION THREE — GENERAL

3 General

The general requirements and recommendations for experimental study, instrumentation and designation of synchronous machine circuits are the same as those given in IEC Publication 34-4, Section Two

- 3.1 The definition of the majority of quantities and their experimental methods of determination, as given in this Report, correspond to the widely accepted two-axis theory of synchronous machines, basically accepted for IEC Publication 34-4, Sub-clause 3.6, with approximate representation of all circuits additional to the excitation winding, and stationary circuits relative to it, by two equivalent circuits, one along the direct-axis and the other along the quadrature-axis with approximate consideration of armature resistance. Yet, experience has shown that, especially for solid rotor machines, such a limited number of circuits, particularly along the quadrature-axis, hampers experimental determination of quantities and makes results of analytical studies of synchronous machines in transient or asynchronous conditions differ from their actual performance in real behaviour. Moreover synchronous machines with excitation windings in the direct- and the quadrature-axes have been introduced in practice.

As a consequence two and more equivalent rotor circuits for each of two direct- and the quadrature-axes are also considered in this Report. For example, the quadrature-axis transient reactance and the quadrature-axis transient time constants are introduced to represent an additional equivalent rotor circuit along the quadrature-axis giving two in all, in determining quantities from frequency response characteristics it is possible to consider more than two equivalent rotor circuits along each direct- and quadrature-axes.

These innovations are introduced in this Report with the aim of keeping in step with further development of synchronous machine construction and the theory used for studies of transient and asynchronous phenomena.

SECTION FOUR — TERMINOLOGY AND METHODS OF EXPERIMENTAL STUDY

4 Excitation current corresponding to the rated armature (primary) short-circuit current (i_{rk})

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

- 4.1 The excitation current for the rated armature sustained short-circuit current, in addition to the method listed in IEC Publication 34-4, Clause 27, may be determined from the over-excitation test at zero power-factor and variable armature (primary) winding voltage (see Clauses 25 and 26)

5 Direct axis synchronous reactance X_d

For the definition of the direct-axis synchronous reactance, see IEC Publication 34-4, Clause 4

- 5.1 The direct-axis synchronous reactance X_d corresponding to the unsaturated state may be determined, in addition to the method listed in IEC Publication 34-4, Sub-clause 4.1, from the test with phase shifting (see Clauses 27 and 28)

6 Réactance synchrone transversale X_q

Pour la définition de la réactance synchrone transversale, voir la Publication 34-4 de la CEI, article 6

6.1 En plus des méthodes données au paragraphe 6.1 de la Publication 34-4 de la CEI, la réactance synchrone transversale X_q correspondant à l'état non saturé de la machine peut être déterminée par l'une des méthodes suivantes :

- a) Essai avec angle interne variable (voir articles 27 et 28),
- b) Essai de suppression d'une basse tension appliquée à l'induit lors d'un essai à un très faible glissement (voir articles 29 et 30),
- c) Essai de suppression d'une basse tension appliquée à l'induit, la machine tournant en asynchrone en charge (voir articles 31 et 32),
- d) Décroissance d'un courant continu à l'arrêt (voir articles 59 et 60)

7 Réactance transitoire longitudinale X_d'

Pour la définition de la réactance transitoire longitudinale, voir la Publication 34-4 de la CEI, article 7

7.1 La réactance transitoire longitudinale peut être déterminée au moyen de l'essai de décroissance d'un courant continu à l'arrêt (voir articles 59 et 60), en plus des méthodes données au paragraphe 7.1 de la Publication 34-4 de la CEI

8 Réactance transitoire transversale X_q'

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 nominale et les composantes à amortissement rapide pendant les premières périodes étant négligées

8.1 La réactance transitoire transversale est déterminée par les méthodes suivantes

- a) Suppression d'une tension appliquée à l'induit, la machine tournant en charge avec un très faible glissement (voir articles 29 et 30);
- b) Suppression d'une basse tension appliquée à l'induit, la machine tournant en régime asynchrone en charge (voir articles 31 et 32),
- c) Mise en court-circuit brusque d'une machine tournant en charge à basse tension (voir articles 33 et 34),
- d) Décroissance d'un courant continu dans l'induit à l'arrêt (voir articles 59 et 60)

9 Réactance subtransitoire transversale X_q''

Pour la définition de la réactance subtransitoire transversale, voir la Publication 34-4 de la CEI, article 9

9.1 La réactance subtransitoire transversale peut être déterminée par les méthodes suivantes, en plus des méthodes données dans la Publication 34-4 de la CEI, paragraphe 45.1,

6 Quadrature-axis synchronous reactance X_q

For the definition of the quadrature-axis synchronous reactance, see IEC Publication 34-4, Clause 6

6.1 The quadrature-axis synchronous reactance X_q corresponding to the unsaturated state may be determined, in addition to the methods listed in IEC Publication 34-4, Sub-clause 6.1, by one of the following methods:

- a) Test with phase shifting (see Clauses 27 and 28),
- b) Disconnecting applied low armature voltage at a very low slip (see Clauses 29 and 30),
- c) Disconnecting applied low armature voltage, the machine running asynchronously on load (see Clause 31 and 32);
- d) Direct-current decay at standstill (see Clause 59 and 60)

7 Direct-axis transient reactance X'_d

For the definition of the direct-axis transient reactance see IEC Publication 34-4, Clause 7

7.1 The direct-axis transient reactance in addition to the methods listed in IEC Publication 34-4, Sub-clause 7.1, may be determined by the method of direct current decay at standstill (see Clauses 59 and 60)

8 Quadrature-axis transient reactance X'_q

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

8.1 Quadrature-axis transient reactance is determined by the following methods

- a) Disconnecting applied low armature voltage, at a very low slip (see Clauses 29 and 30);
- b) Disconnecting applied low armature voltage, the machine running asynchronously on load (see Clauses 31 and 32);
- c) Sudden short-circuiting of machine running on load at low voltage (see Clauses 33 and 34);
- d) Direct-current decay at standstill (see Clauses 59 and 60)

9 Quadrature-axis subtransient reactance X''_q

For the definition of the quadrature-axis subtransient reactance, see IEC Publication 34-4, Clause 9

9.1 The quadrature-axis subtransient reactance, in addition to the methods listed in IEC Publication 34-4, Sub-clause 45.1, may be determined by the following methods:

- a) Suppression d'une basse tension appliquée à l'induit à un très faible glissement (voir articles 29 et 30),
- b) Suppression d'une basse tension appliquée à l'induit, la machine tournant en asynchrone en charge (voir articles 31 et 32),
- c) Mise en court-circuit brusque de la machine tournant en charge à basse tension (voir articles 33 et 34)

10 Réactance inverse X_2

Pour la définition de la réactance inverse, voir la Publication 34-4 de la CEI, article 10

10 1 La réactance inverse peut être déterminée, en plus des méthodes données au paragraphe 11 1 de la Publication 34-4 de la CEI par les méthodes suivantes:

- a) Court-circuit brusque entre deux phases (voir articles 35 et 36),
- b) Décroissance d'un courant continu à l'arrêt (voir articles 59 et 60)

11 Réactance de fuites d'induit X_σ

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 la vitesse nominale

11 1 La réactance de fuites d'induit peut être déterminée par la méthode d'application d'une tension triphasée symétrique avec le rotor enlevé (voir articles 39 et 40)

12 Impédance de démarrage initiale des moteurs synchrones Z_{st}

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

12 1 L'impédance de démarrage initiale peut être déterminée directement à partir de l'essai avec le rotor fermé (voir articles 41 et 42)

Dans le cas où la résistance d'induit en courant alternatif qui tient compte des pertes dans l'induit en rotation directe peut être négligée, l'impédance de démarrage initiale est prise approximativement égale à la moitié de la somme des réactances subtransitoires longitudinale et transversale

13 Constante de temps transitoire longitudinale à circuit ouvert τ'_{do}

Pour la définition de la constante de temps transitoire longitudinale à circuit ouvert, voir la Publication 34-4 de la CEI, article 17

13 1 La constante de temps transitoire longitudinale à circuit ouvert peut être déterminée, en plus de méthodes de détermination données au paragraphe 17 1 de la Publication 34-4 de la CEI, par les méthodes suivantes

- a) Application brusque de l'excitation avec l'enroulement d'induit à circuit ouvert (voir articles 43 et 44),
- b) Décroissance d'un courant continu à l'arrêt (voir articles 59 et 60)

- a) Disconnecting applied low armature voltage at a very low slip (see Clauses 29 and 30),
- b) Disconnecting applied low armature voltage, the machine running asynchronously on load (see Clauses 31 and 32),
- c) Sudden short-circuiting of machine running on load at low voltage (see Clauses 33 and 34)

10 **Negative-sequence reactance X_2**

For the definition of the negative-sequence reactance, see IEC Publication 34-4, Clause 10

- 10.1 The negative-sequence reactance in addition to the methods listed in IEC Publication 34-4, Sub-clause 11.1, may be determined by the following methods:

- a) Sudden line-to-line short-circuit (see Clauses 35 and 36),
- b) Direct-current decay at standstill (see Clauses 59 and 60)

11 **Armature-leakage reactance X_σ**

The quotient of the reactive fundamental component of armature voltage due to the leakage flux of armature (primary) winding with respect to the rotor circuits and the fundamental component of armature current, the machine running at rated speed

- 11.1 Armature-leakage reactance may be determined by the method of applying symmetrical three-phase voltage to the armature (primary) winding with rotor removed (see Clauses 39 and 40)

12 **Initial starting impedance of synchronous motors Z_{st}**

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

- 12.1 The initial starting impedance of the machine may be determined directly from the locked rotor test (see Clauses 41 and 42).

In cases when a.c. armature resistance, which takes into account the positive phase-sequence losses in the rotor, may be neglected, initial starting impedance may be considered as approximately equal to the half sum of the direct- and the quadrature-axes subtransient reactances

13 **Direct-axis transient open-circuit time constant τ'_{do}**

For the definition of the direct-axis transient open-circuit time constant, see IEC Publication 34-4, Clause 17

- 13.1 The direct-axis transient open-circuit time constant in addition to the methods of determination listed in IEC Publication 34-4, Sub-clause 17.1, may be determined by the following methods:

- a) Suddenly applying excitation with armature (primary) winding open-circuited (see Clauses 43 and 44);
- b) Direct-current decay at standstill (see Clauses 59 and 60)

14 Constante de temps transitoire longitudinale en court-circuit τ'_d

Pour la définition de la constante de temps transitoire longitudinale en court-circuit, voir la Publication 34-4 de la CEI, article 18

14.1 La constante de temps transitoire longitudinale en court-circuit peut être déterminée, en plus des méthodes de détermination expérimentale données à l'article 18.1 de la Publication 34-4 de la CEI, par les méthodes suivantes:

- a) Application brusque du courant d'excitation avec l'enroulement d'induit en court-circuit (voir articles 45 et 46);
- b) Décroissance d'un courant continu à l'arrêt (voir articles 59 et 60)

15 Constante de temps transitoire transversale à circuit ouvert τ'_{q0}

Temps nécessaire pour que la composante à amortissement lent de la tension d'induit à circuit ouvert, due au flux transversal, décroisse jusqu'à $1/\varepsilon \approx 0,368$ fois sa valeur initiale à la suite d'une variation brusque des conditions de fonctionnement, la machine tournant à sa vitesse nominale

15.1 La constante de temps transitoire transversale à circuit ouvert peut être déterminée par l'une des méthodes suivantes:

- a) Suppression d'une basse tension appliquée à l'induit à un très faible glissement (voir articles 29 et 30),
- b) Suppression d'une basse tension appliquée à l'induit, la machine tournant en asynchrone en charge (voir articles 31 et 32);
- c) Décroissance d'un courant continu à l'arrêt (voir articles 59 et 60)

16 Constante de temps transitoire transversale en court-circuit τ'_q

Temps nécessaire pour que la composante à amortissement lent du courant transversal dans l'induit en court-circuit décroisse jusqu'à $1/\varepsilon \approx 0,368$ fois sa valeur initiale, à la suite d'une variation brusque des conditions de fonctionnement, la machine tournant à sa vitesse nominale

16.1 La constante de temps transitoire transversale en court-circuit est déterminée par les méthodes suivantes:

- a) Mise en court-circuit brusque d'une machine tournant en charge à basse tension (voir articles 33 et 34),
- b) Par le calcul en partant des valeurs expérimentales de X_q (voir article 6 de la Publication 34-4 de la CEI), X'_q (voir article 8) et τ'_{q0} (voir article 15); le calcul s'effectue au moyen de la formule donnée à l'article 63
- c) Par la décroissance d'un courant continu à l'arrêt (voir articles 59 et 60)

17 Constante de temps subtransitoire longitudinale à circuit ouvert τ''_{d0}

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 $1/\varepsilon \approx 0,368$ fois sa valeur initiale, la machine tournant à sa vitesse nominale

14 Direct-axis transient short-circuit time constant τ'_d

For the definition of the direct-axis transient short-circuit time constant, see IEC Publication 34-4, Clause 18

14.1 The direct-axis transient short-circuit time constant in addition to the methods of determination listed in IEC Publication 34-4, Sub-clause 18.1, may be determined by the following methods:

- a) Suddenly applying excitation with armature (primary) winding short-circuited (see Clauses 45 and 46),
- b) Direct-current decay at standstill (see Clauses 59 and 60)

15 Quadrature-axis transient open-circuit time constant τ'_{qo}

The time required for the slowly changing component of the open-circuit armature (primary) winding voltage which is due to quadrature-axis flux, following a sudden change in operating conditions, to decrease to $1/e \approx 0.368$ of its initial value, the machine running at rated speed

15.1 The quadrature-axis transient open-circuit time constant may be determined by the following methods:

- a) Disconnecting applied low armature voltage at a very low slip (see Clauses 29 and 30),
- b) Disconnecting applied low armature voltage, the machine running asynchronously on load (see Clauses 31 and 32);
- c) Direct-current decay at standstill (see Clauses 59 and 60)

16 Quadrature-axis transient short-circuit time constant τ'_q

The time required for the slowly changing component of quadrature-axis short-circuit armature (primary) winding current following a sudden change in operating conditions, to decrease to $1/e \approx 0.368$ of its initial value, the machine running at rated speed

16.1 The quadrature-axis transient short-circuit time constant may be determined by the following methods:

- a) Sudden short-circuiting of machine running on load at low voltage (see Clauses 33 and 34),
- b) Calculation from the test values of X_q (see Clauses 6 of IEC Publication 34-4), X'_q (see Clause 8) and τ'_{qo} (see Clause 15) The calculation is made using the formula given in Clause 63;
- c) Direct-current decay at standstill (see Clauses 59 and 60)

17 Direct-axis subtransient open-circuit time constant τ''_{do}

The time required for the rapidly changing component, present during the first few cycles in the open-circuit armature (primary) winding voltage which is due to the direct-axis flux, following a sudden change in operating conditions, to decrease to $1/e \approx 0.368$ of its initial value, the machine running at rated speed

17 1 La constante de temps subtransitoire longitudinale à circuit ouvert peut être déterminée par les méthodes suivantes:

- a) Rétablissement de la tension (voir articles 47 et 48),
- b) Décroissance d'un courant continu à l'arrêt (voir articles 59 et 60)

18 **Constante de temps subtransitoire transversale à circuit ouvert τ''_{q0}**

Temps nécessaire pour que la composante à amortissement rapide de la tension de l'induit à circuit ouvert due au flux transversal, présente dans les toutes premières périodes qui suivent une variation brusque des conditions de fonctionnement, décroisse jusqu'à $1/\varepsilon \approx 0,368$ fois sa valeur initiale, la machine tournant à sa vitesse nominale

18 1 La constante de temps subtransitoire transversale à circuit ouvert peut être déterminée par les méthodes suivantes

- a) Suppression d'une basse tension appliquée à l'induit à un très faible glissement (voir articles 29 et 30);
- b) Suppression d'une basse tension appliquée à l'induit, la machine tournant en asynchrone en charge (voir articles 31 et 32);
- c) Décroissance d'un courant continu à l'arrêt (voir articles 59 et 60)

19 **Constante de temps subtransitoire transversale en court-circuit τ''_q**

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 $1/\varepsilon \approx 0,368$ fois sa valeur initiale, la machine tournant à sa vitesse nominale

19 1 La constante de temps subtransitoire transversale en court-circuit peut être déterminée par les méthodes suivantes

- a) Par la mise en court-circuit brusque de la machine, tournant en charge à basse tension (voir articles 33 et 34);
- b) Par le calcul en partant des valeurs expérimentales de X'_q (voir article 8), X''_q (voir article 9 de la Publication 34-4 de la CEI) et τ''_{q0} (voir article 18) Le calcul s'effectue au moyen de la formule donnée à l'article 63;
- c) Par la décroissance d'un courant continu dans l'induit à l'arrêt (voir articles 59 et 60)

20 **Constante de temps longitudinale à circuit ouvert de l'enroulement d'excitation τ_{ld0}**

Temps nécessaire pour que la composante de courant induite dans l'enroulement d'excitation décroisse jusqu'à $1/\varepsilon \approx 0,368$ fois sa valeur initiale à la suite d'une variation brusque des conditions de fonctionnement, l'enroulement d'induit étant à circuit ouvert et en admettant que tous les autres circuits du rotor sont aussi ouverts, la machine tournant à sa vitesse nominale

20 1 La constante de temps longitudinale à circuit ouvert de l'enroulement d'excitation est déterminée à partir de l'essai d'extinction de champ avec l'induit à circuit ouvert (voir articles 49 et 50)

17 1 The direct-axis subtransient open-circuit time constant may be determined by the following methods:

- a) Voltage recovery (see Clauses 47 and 48);
- b) Direct-current decay at standstill (see Clauses 59 and 60)

18 **Quadrature-axis subtransient open-circuit time constant τ''_{qo}**

The time required for the rapidly changing component present during the first few cycles in the open-circuit armature (primary) winding voltage which is due to the quadrature-axis flux, following a sudden change in operating conditions, to decrease to $1/\varepsilon \approx 0.368$ of its initial value, the machine running at rated speed

18 1 The quadrature-axis subtransient open-circuit time constant may be determined by the following methods:

- a) Disconnecting applied low armature voltage, at a very low slip (see Clauses 29 and 30),
- b) Disconnecting applied low armature voltage, the machine running asynchronously on load (see Clauses 31 and 32);
- c) Direct-current decay at standstill (see Clauses 59 and 60)

19 **Quadrature-axis subtransient short-circuit time constant τ''_q**

The time required for the rapidly changing component, present during the first few cycles in the quadrature-axis short-circuit armature (primary) winding current following a sudden change in operating conditions, to decrease to $1/\varepsilon \approx 0.368$ of its initial value, the machine running at rated speed

19 1 The quadrature-axis subtransient short-circuit time constant may be determined by the following methods:

- a) Sudden short-circuiting of machine, running on load at a low voltage (see Clauses 33 and 34),
- b) Calculation from the test values of X'_q (see Clause 8), X''_q (see IEC Publication 34-4, Clause 9), and τ''_{qo} (see Clause 18) Calculation is made by means of the formula given in Clause 63,
- c) Direct-current decay at standstill (see Clauses 59 and 60)

20 **Direct-axis open-circuit excitation winding time constant τ_{ido}**

The time required for the induced current component in the excitation winding to decrease to $1/\varepsilon \approx 0.368$ of its initial value, following a sudden change in operating conditions with open-circuited armature (primary) winding all other motor circuits being also open, the machine running at rated speed

20 1 The direct-axis open-circuit excitation winding time constant is determined from the field extinguishing test with armature (primary) winding open (see Clauses 49 and 50)

21 **Constante de temps longitudinale à circuit ouvert du circuit amortisseur équivalent τ_{kdo}**

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

21 1 La constante de temps longitudinale à circuit ouvert du circuit amortisseur peut être déterminée au moyen d'essai d'extinction du champ avec l'induit à circuit ouvert (voir articles 49 et 50)

22 **Constante de temps longitudinale en court-circuit de l'enroulement d'excitation τ_{fd}**

Temps nécessaire pour que la composante de courant induite dans l'enroulement d'excitation décroisse jusqu'à $1/e \approx 0,368$ fois sa valeur initiale à la suite d'une variation brusque des conditions de fonctionnement, l'induit étant en court-circuit et en admettant que tous les autres circuits du rotor sont ouverts, la machine tournant à sa vitesse nominale

22 1 La constante de temps longitudinale en court-circuit de l'enroulement d'excitation peut être déterminée au moyen de l'essai d'extinction du champ avec l'induit en court-circuit (voir articles 51 et 52)

23 **Constante de temps longitudinale en court-circuit du circuit amortisseur équivalent τ_{kd}**

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

23 1 La constante de temps longitudinale en court-circuit du circuit amortisseur équivalent peut être déterminée au moyen d'essais d'extinction du champ avec l'induit en court-circuit (voir articles 51 et 52)

24 **Caractéristiques de réponse en fréquence**

Les caractéristiques de réponse en fréquence d'une machine sont représentées par un ensemble de courbes caractéristiques ou d'expressions analytiques donnant l'admittance complexe ou son inverse, impédance complexe (ou des composantes de l'une ou de l'autre) en fonction du glissement à la fréquence nominale d'alimentation, sauf spécification contraire

Dans ce rapport les caractéristiques de réponse en fréquence suivantes sont considérées :

Caractéristiques de réponse en fréquence de la réactance longitudinale $X_d(j\omega)$ ¹⁾

Quotient, exprimé en fonction du glissement, du vecteur complexe établi du terme fondamental de la composante de la tension d'induit produite par le flux longitudinal dû au courant d'induit longitudinal, par le vecteur complexe du terme fondamental de ce courant, la machine tournant à un glissement donné, l'enroulement d'excitation étant court-circuité ²⁾

¹⁾ Au lieu des caractéristiques longitudinale et transversale, une caractéristique de compromis $X(j\omega)$ est parfois considérée. Il y a plusieurs méthodes de dérivation de la valeur approximative, par exemple valeur moyenne, valeur réciproque moyenne

²⁾ La caractéristique peut être obtenue avec l'enroulement d'excitation fermé par l'intermédiaire d'une impédance spécifiée

21 Direct-axis open-circuit equivalent damper circuit time constant τ_{kdo}

The time required for the induced current component in the equivalent damper circuit to decrease to $1/\varepsilon \approx 0.368$ of its initial value following a sudden change in operating conditions with open-circuited armature (primary) winding and the excitation winding being also open, the machine running at rated speed

21.1 The direct-axis open-circuit equivalent damper winding time constant may be determined from the field extinguishing test with armature (primary) winding open (see Clauses 49 and 50)

22 Direct-axis short-circuit excitation winding time constant τ_{ed}

The time required for the induced current component of the excitation winding to decrease to $1/\varepsilon \approx 0.368$ of its initial value following a sudden change in operating conditions with short-circuited armature (primary) winding, all other rotor circuits being open, the machine running at rated speed

22.1 The direct-axis short-circuit excitation winding time constant may be determined from the field extinguishing test with armature (primary) winding short-circuited (see Clauses 51 and 52)

23 Direct-axis short-circuit equivalent damper winding time constant τ_{kd}

The time required for the induced current component of the equivalent damper winding to decrease to $1/\varepsilon \approx 0.368$ of its initial value following a sudden change in operating conditions with short-circuited armature (primary) winding the excitation winding being open, and the machine running at rated speed

23.1 The direct-axis short-circuit equivalent damper winding time constant may be determined from the field extinguishing test with armature (primary) winding short-circuited (see Clauses 51 and 52)

24 Frequency response characteristics

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

In this Report the following frequency response characteristics are considered:

Frequency response characteristic of direct-axis reactance $X_d(j\omega)$ ¹⁾

The quotient expressed as a slip function of the sustained complex value (phasor) of that fundamental a.c. component of armature voltage which is produced by the d-axis armature current, and the complex value (phasor) of the fundamental a.c. component of this current, the machine running at a given slip, with the excitation winding short-circuited²⁾

¹⁾ Instead of d-axis and q-axis characteristics, a compromise characteristic $X(j\omega)$ is sometimes considered, and there are several methods of deriving this approximate value, e.g. mean value, or mean reciprocal value

²⁾ Characteristics may be obtained with the excitation winding closed through a specified impedance,

Caractéristique de réponse en fréquence de la réactance transversale $X_q(j\omega)$ ¹⁾

Quotient, exprimé en fonction du glissement, du vecteur complexe établi du terme fondamental de la composante de la tension d'induit produite par le flux transversal dû au courant d'induit transversal, par le vecteur complexe du terme fondamental de ce courant, la machine tournant à un glissement donné, l'enroulement d'excitation étant court-circuité ²⁾

Caractéristique de réponse en fréquence du coefficient de l'excitation $G(j\omega)$

Quotient exprimé en fonction du glissement du vecteur complexe établi de la tension d'induit produite par le flux magnétique dû au courant dans l'enroulement d'excitation à la fréquence ω , par le vecteur complexe de la tension appliquée à l'enroulement d'excitation en vue d'établir ce courant, la machine tournant à sa vitesse nominale

- 24 1 Les caractéristiques de réponse en fréquence peuvent être déterminées par les méthodes suivantes:
- a) Fonctionnement en asynchrone et charge (voir articles 53 et 54),
 - b) Fonctionnement en asynchrone à tension réduite (voir articles 55 et 56),
 - c) Application d'une tension à fréquence variable à l'enroulement d'induit, la machine étant à l'arrêt (voir articles 57 et 58),
 - d) Décroissance d'un courant continu, la machine étant à l'arrêt (voir articles 59 et 60);
 - e) Application brusque d'un courant continu à l'induit, la machine étant à l'arrêt (voir articles 61 et 62)

Note — Il est à signaler que les méthodes stationnaires peuvent donner des résultats qui diffèrent des résultats obtenus sur les machines tournantes, par exemple quand les caractéristiques de l'enroulement amortisseur sont influencées par les forces centrifuges

SECTION CINQ — DESCRIPTION DES ESSAIS ET DÉTERMINATION
DES GRANDEURS ET DES CARACTÉRISTIQUES À PARTIR DES ESSAIS

25 **Essai en surexcitation à facteur de puissance nul et à tension d'induit variable**

L'essai est exécuté avec la machine fonctionnant en générateur ou en moteur. Lorsque la machine fonctionne en génératrice, la puissance active doit être nulle. Lorsque la machine fonctionne en moteur, la charge sur l'arbre doit être nulle.

Pendant l'essai, le courant d'induit est gardé constant et égal à sa valeur nominale, et on fait varier la tension appliquée à l'induit depuis au moins sa valeur nominale jusqu'à la moindre valeur à laquelle la machine reste stable. Afin d'augmenter raisonnablement la précision, il est recommandé que la tension appliquée à l'induit décroisse au-dessous de 0,5 fois sa valeur nominale.

Des précautions doivent être prises pour que l'enroulement d'excitation ne s'échauffe pas excessivement.

26 **Détermination du courant d'excitation correspondant au courant d'induit nominal en court-circuit (I_{rk})**

Les points obtenus expérimentalement sont portés sur un diagramme et réunis par une courbe, formant la portion supérieure de la courbe de facteur de puissance nul. On trace sur le même diagramme la courbe de saturation à vide. Ensuite la courbe à facteur de puissance nul est extrapolée

¹⁾ Au lieu des caractéristiques longitudinale et transversale, une caractéristique de compromis $X(j\omega)$ est parfois considérée. Il y a plusieurs méthodes de dérivation de la valeur approximative, par exemple valeur moyenne, valeur réciproque moyenne.

²⁾ La caractéristique peut être obtenue avec l'enroulement d'excitation fermé par l'intermédiaire d'une impédance spécifiée.

Frequency response characteristic of quadrature axis reactance $X_q(js)$ ¹⁾

The quotient expressed as a slip function of the sustained complex value (phasor) of that fundamental a c component of armature voltage which is produced by the q-axis armature flux due to q-axis armature current and the complex value (phasor) of the fundamental a c component of this current, the machine running at a given slip, with the excitation winding short-circuited²⁾

Frequency response characteristic of excitation factor $G(js)$

The quotient of the sustained complex value (phasor) of the armature voltage, produced by the current in the excitation winding at frequency sf , and the complex value of the voltage applied to the excitation winding, the machine running at a rated speed

24.1 Frequency response characteristics may be determined by the following methods:

- a) Asynchronous operation on load (see Clauses 53 and 54);
- b) Asynchronous operation at reduced voltage (see Clauses 55 and 56);
- c) Application of variable frequency voltage to armature (primary) winding, the machine being at standstill (see Clauses 57 and 58),
- d) Direct current decay in the armature (primary) winding, the machine being at standstill (see Clauses 59 and 60),
- e) Suddenly applied direct current to the armature (primary) winding, the machine being at standstill (see Clauses 61 and 62)

Note — It is necessary to underline that stationary methods may give results different from those received on rotating machines, for example when damper winding quantities are dependent upon centrifugal forces

SECTION FIVE — DESCRIPTION OF THE TESTS AND DETERMINATION OF QUANTITIES AND CHARACTERISTICS FROM THESE TESTS

25 **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 should be zero.

During the test, armature (primary) 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.

26 **Determination of the excitation current corresponding to the rated armature sustained short-circuit current (i_{rk})**

The experimental points are plotted on a diagram and joined by a curve, forming the upper portion of the zero power-factor curve. On the same diagram the no-load saturation curve is also drawn.

¹⁾ Instead of d-axis and q-axis characteristics, a compromise characteristic $X(js)$ is sometimes considered, and there are several methods of deriving this approximative value, e.g. mean value, or mean reciprocal value.

²⁾ Characteristics may be obtained with the excitation winding closed through a specified impedance,

parallèlement à la courbe de saturation à vide jusqu'à son intersection avec l'axe des abscisses. L'abscisse du point d'intersection représente le courant d'excitation correspondant au courant d'induit nominal en court-circuit (i_{Ik})

27 Essai avec angle interne variable

On procède à cet essai de l'une ou de l'autre des manières suivantes:

- a) En entraînant la machine essayée par un moteur synchrone ordinaire et en connectant l'enroulement induit de la machine à une source d'alimentation à basse tension et ayant la même fréquence que le moteur synchrone, par l'intermédiaire d'un déphaseur,
- b) En entraînant la machine essayée par un moteur synchrone muni d'enroulements d'excitation d'axe longitudinal et transversal, l'enroulement induit de la machine entraînée est connecté à une source d'alimentation à basse tension symétrique et ayant la même fréquence que le moteur synchrone

Le courant dans la machine essayée varie selon la position de l'axe des pôles entre une valeur minimale fonction de X_d et une valeur maximale fonction de X_q

On passe d'une position à l'autre, soit en agissant sur le déphaseur [méthode a)], soit en faisant varier les excitations dans les deux axes du moteur synchrone [méthode b)]. On mesure les valeurs maximale et minimale du courant d'induit et les valeurs correspondantes de la tension appliquée aux bornes de la machine

L'essai est conduit avec l'enroulement d'excitation à circuit ouvert. Toutefois, pendant la mise en circuit ou hors circuit de la source à basse tension, l'enroulement d'excitation devra être court-circuité (ou fermé par l'intermédiaire d'une résistance de décharge) afin d'éviter des dommages éventuels lorsque les mesures ne sont pas faites

Dans la méthode a), le déphaseur doit permettre de faire subir à la tension appliquée à l'induit une variation de phase de 180 degrés électriques

Dans la méthode b), la puissance du moteur d'entraînement dépend de la tension appliquée à l'enroulement d'induit de la machine essayée, qui développe un couple quand on passe d'une position à l'autre

28 Détermination des grandeurs à partir d'un essai avec angle interne variable ¹⁾

La réactance synchrone longitudinale (voir article 5, telle qu'elle est déterminée au moyen de cet essai), est calculée en utilisant les formules suivantes:

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

28.1 La réactance synchrone transversale (voir article 6), telle qu'elle est déterminée au moyen de cet essai, est calculée en utilisant les formules suivantes:

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

29 Essai de suppression d'une basse tension appliquée à l'induit lors d'un essai à un très faible glissement

L'essai de suppression brusque d'une basse tension appliquée à l'induit au cours d'un essai à faible glissement est effectué sur la machine tournant avec un glissement notablement inférieur à 0,01, l'induit étant relié à une source de courant triphasé symétrique de fréquence nominale et

¹⁾ Si la tension résiduelle de la machine essayée est de l'ordre de 0,1 à 0,3 fois la tension d'alimentation, des corrections similaires à celle de l'article 37 de la Publication 34-4 de la CEI devront être introduites

Then the zero power factor curve is extrapolated parallel to the no-load curve until it intersects with the abscissa axis. The abscissa of this point represents the excitation current corresponding to the rated armature sustained short-circuit current (i_{rk})

27 Phase shifting test

The phase shifting test is conducted in accordance with either one of the following methods:

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

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

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

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

In method *a*), the phase shifter must be able to shift the armature applied voltage by not less than 180 electrical degrees

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

28 Determination of quantities from the phase shifting test ¹⁾

The direct-axis synchronous reactance (see Clause 5), as determined from this test, is calculated using the following formula

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

- 28.1 The quadrature-axis synchronous reactance (see Clause 6), as determined from this test, is calculated using the following formula:

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

29 Disconnecting applied low armature voltage at a very low-slip test

The sudden disconnection of the applied low armature voltage during a low-slip test is performed on a machine running at a slip considerably less than 0.01, with the armature (primary) winding connected to a rated frequency symmetrical three-phase low-voltage supply (0.05 U_n to 0.10 U_n)

¹⁾ If residual voltage of machine under test is of the order 0.1 to 0.3 of the supplied test voltage, correction should be made similar to that in Clause 37, IEC Publication 34-4

à basse tension ($0,05 U_n$ à $0,10 U_n$) L'enroulement d'excitation est mis en court-circuit Pendant la détermination des grandeurs correspondant à l'axe transversal, l'enroulement d'excitation peut être à circuit ouvert La tension appliquée est supprimée brusquement au moment où le rotor est magnétisé suivant l'axe longitudinal ou suivant l'axe transversal La position du rotor est vérifiée en mesurant l'angle compris entre la tension d'induit et l'axe transversal (ou longitudinal) du rotor (voir article 31 ou employer une autre méthode équivalente) Le courant et la tension dans l'induit et la position du rotor sont mesurés et enregistrés

Au moment de la mise hors circuit de la machine, la tension d'induit tombe brusquement à une certaine valeur, puis décroît graduellement (figure 1, page 84)

Cette chute initiale de tension est indépendante de la tension résiduelle Pour déterminer les constantes de temps, la tension résiduelle doit être inférieure à 0,2 fois la tension appliquée, sa valeur n'a pas besoin d'être prise en compte avec une précision requise pour l'obtention des constantes de temps transversales Si elle est supérieure, le rotor de la machine doit être démagnétisé

La tension d'induit déterminée d'après les oscillogrammes est reportée en fonction du temps sur un diagramme à échelle semi-logarithmique (figure 2, page 84) Pour déterminer les constantes de temps longitudinales, la valeur de la tension résiduelle $U(\infty)$ est soustraite de la tension d'induit, et cette différence est reportée en fonction du temps

Note 1 — Etant donné la faible valeur de la tension appliquée à l'induit lors de ces essais, le magnétisme rémanent est entièrement déterminé, en amplitude et en phase La méthode qui consiste à soustraire arithmétiquement la tension $U(\infty)$ n'est donc pas rigoureuse, car le déphasage de $U(\infty)$ par rapport à U_d ou U_q peut avoir une valeur quelconque La méthode précise consiste à retrancher vectoriellement $U(\infty)$ en tous points de la courbe de la figure 1 L'angle de phase peut être aisément déterminé à l'aide d'un alternateur de phase en bout d'arbre Une méthode alternative consisterait à démagnétiser entièrement la machine avant l'essai

La partie rectiligne de la courbe de décroissance de la tension d'induit extrapolée jusqu'à l'axe des ordonnées détermine la composante transitoire de tension, avec la valeur initiale $U'(0) + U(\infty)$ (figure 1) En retranchant cette composante transitoire de la tension U décroissante, on obtient une composante subtransitoire de tension dont la valeur initiale est $U''(0)$

Note 2 — Dans de nombreux types de machines, il est difficile de séparer les composantes transitoires et subtransitoires de la tension suivant l'axe transversal, parce que les composantes à décroissance rapide peuvent ne pas être séparées nettement du reste

30 Détermination des grandeurs à partir de l'essai de suppression d'une basse tension appliquée à l'induit lors d'un essai à un très faible glissement

La réactance synchrone transversale (voir article 6) est déterminée à partir de l'essai de suppression brusque d'une tension appliquée à l'induit au cours de l'essai à faible glissement, avec la machine essayée dans la position de l'axe transversal comme étant le quotient de la différence entre la tension initiale $U(0)$ et la tension résiduelle $U(\infty)$ (voir article 29, Note 1) par le courant $I(0)$ juste avant l'instant de la mise hors circuit:

$$X_q = \frac{U(0) - U(\infty)}{\sqrt{3} I(0)} \Omega, \quad \left| x_q = \frac{u(0) - u(\infty)}{i(0)} \right|$$

Une vérification de la valeur mesurée devra être faite en calculant X_d au moyen de cet essai et avec le même glissement, alors que la machine essayée est magnétisée suivant l'axe longitudinal La même formule est utilisée pour calculer X_d La valeur de X_q obtenue à partir de cet essai peut être considérée comme précise si la valeur de X_d déterminée par le même essai coïncide pratiquement avec celle obtenue conformément à la Publication 34-4 de la CEI, article 27 S'il n'en est pas ainsi, l'essai est répété pour plusieurs valeurs de plus en plus faibles du glissement, après quoi la valeur de X_q est extrapolée jusqu'au glissement nul La valeur de X_q obtenue au moyen de cet essai correspond à la valeur non saturée

The excitation winding is short-circuited. When determining quantities in the quadrature axis the excitation winding may be open-circuited. The applied voltage is suddenly disconnected when the rotor is magnetized in the quadrature or in the direct axis. The rotor position is checked by measuring the internal angles between the armature voltage and the quadrature (or direct) rotor axis (see Clause 31 or use other equivalent method). Armature current and voltage, and rotor position indication are measured and recorded.

At the instant of switching off the machine, the armature (primary) winding voltage suddenly drops to a particular value and then gradually decays (Figure 1, page 84).

This initial voltage drop is independent of the residual voltage. In determining time constants, the residual voltage shall be less than 0.2 of the applied voltage, and its value need not then be taken into account for determining time constants along the q-axis with the required accuracy. If it is above this value, the rotor of the machine should be demagnetized.

The armature voltage determined from the oscillogram is plotted on a semi-logarithmic scale against time (Figure 2, page 84). If time constants along the d-axis are being determined, the value of residual voltage $U(\infty)$ is subtracted from the armature voltage and this difference is plotted against time.

Note 1 — The applied armature (primary) winding voltage being of low value during this test, the residual magnetism should be carefully determined in amplitude and in phase. The method of subtracting arithmetically the voltage $U(\infty)$ is not rigorous, because the phase shifting of $U(\infty)$ referred to U_d or U_q may be significant. The accurate method consists of subtracting $U(\infty)$ vectorially at all points of the curve on Figure 1. The phase angle may be easily determined with help of a phase generator on the shaft end.
An alternative method would be to demagnetize completely the machine under test.

The straight portion of the armature voltage decay curve extrapolated to the ordinate axis determines the transient voltage component with the initial value $U'(0) + U(\infty)$ (Figure 1). Subtracting this transient voltage component from the decaying voltage U , enables a subtransient voltage component with its initial value $U''(0)$ to be determined.

Note 2 — In many types of machines it is difficult to segregate transient and subtransient voltage components along the q-axis because the high decient components may not be clearly separated from the remainder.

30 Determination of quantities from the disconnecting applied low armature voltage at a very low-slip test

Quadrature-axis synchronous reactance (see Clause 6) is determined from the suddenly disconnected applied voltage during the low-slip test when the machine under test is in the quadrature-axis position as the quotient of the difference between the initial voltage $U(0)$ and the residual voltage $U(\infty)$ (see Clause 29, Note 1) and the current $I(0)$ just before the instance of switching off

$$X_q = \frac{U(0) - U(\infty)}{\sqrt{3} I(0)} \Omega, \quad \left[x_q = \frac{u(0) - u(\infty)}{i(0)} \right]$$

A check of the measured value shall be made by determining X_d from this test at the same slip when the machine under test is magnetized in the direct axis position. The corresponding formula is used to calculate X_d . The value of X_q from this test may be considered accurate if the value of X_d obtained at the same test agrees with its value obtained in accordance with IEC Publication 34-4, Clause 27. Otherwise, the test is repeated at several decreasing values of slip, followed by extrapolation of the X_q value to zero slip. The value of X_q obtained from this test corresponds to the unsaturated value.

- 30 1 La réactance transitoire transversale (voir article 8) est déterminée à partir de l'essai de suppression brusque d'une tension appliquée à l'induit, avec la machine essayée magnétisée suivant l'axe transversal, comme étant le quotient de (a) la différence entre la tension initiale $U(0)$ mesurée entre deux phases et la valeur initiale de la tension transitoire $\Delta U'(0) + U(\infty)$ (voir article 29, Note 1) et (b) par le courant $I(0)$ dans l'induit juste avant l'instant de la mise hors circuit

$$X'_q = \frac{U(0) - \Delta U'(0) - U(\infty)}{\sqrt{3} I(0)} \Omega, \quad \left| x'_q = \frac{u(0) - \Delta u'(0) - u(\infty)}{i(0)} \right|$$

Une vérification de la valeur mesurée peut être faite en calculant X'_d au moyen du même essai en effectuant la suppression brusque de la tension alors que la machine est magnétisée suivant l'axe longitudinal. La valeur de X'_d est alors calculée en utilisant la même formule.

La valeur de X'_q déterminée à partir de l'essai de suppression brusque d'une tension appliquée à l'induit peut être considérée comme précise si la valeur de X'_d obtenue par cet essai est pratiquement la même que celle obtenue conformément à la Publication 34-4 de la CEI. S'il n'en est pas ainsi, l'essai est répété pour plusieurs valeurs de plus en plus faibles du glissement, et les diverses valeurs de X'_q sont ensuite extrapolées jusqu'au glissement nul. La valeur de X'_q obtenue au moyen de cet essai correspond à la valeur non saturée.

- 30 2 La réactance subtransitoire transversale (article 9) peut être obtenue en partant de cet essai (voir article 29, Note 1), en utilisant la formule:

$$X''_q = \frac{U(0) - \Delta U'(0) - \Delta U''(0) - U(\infty)}{\sqrt{3} I} \Omega, \quad \left| x''_q = \frac{u(0) - \Delta u'(0) - \Delta u''(0) - u(\infty)}{i} \right|$$

Lorsque la machine est magnétisée suivant l'axe longitudinal au moment de la mise hors circuit, on peut obtenir la réactance subtransitoire longitudinale en utilisant la même formule.

- 30 3 La constante de temps transitoire transversale à circuit ouvert (voir article 15) est déterminée à partir de l'essai de suppression brusque d'une tension appliquée à l'induit comme étant le temps nécessaire pour que la composante transitoire de la tension d'induit décroisse jusqu'à $1/e \approx 0,368$ fois sa valeur initiale. Une vérification de la valeur mesurée pour τ'_{q0} peut être faite en calculant τ'_{d0} à partir du même essai lorsqu'on détermine X'_d . La valeur de τ'_{q0} obtenue à partir de l'essai de suppression brusque d'une tension appliquée peut être considérée comme correcte si la valeur de τ'_{d0} obtenue à partir de cet essai coïncide avec celle obtenue en conformité avec la Publication 34-4 de la CEI.

- 30 4 La constante de temps subtransitoire transversale à circuit ouvert (voir article 18) est déterminée à partir de l'essai de suppression brusque d'une tension appliquée à l'induit comme étant le temps nécessaire pour que la composante subtransitoire de la tension d'induit décroisse jusqu'à $1/e \approx 0,368$ fois sa valeur initiale $\Delta U''(0)$.

La vérification de la valeur de τ''_{q0} peut être faite de manière analogue à celle du paragraphe 30 3 en déterminant τ''_{d0} à partir du même essai exécuté en position longitudinale et en comparant sa valeur à celle obtenue conformément à la Publication 34-4 de la CEI.

- 31 **Essai de suppression d'une basse tension appliquée à l'induit, la machine tournant en asynchrone en charge**

L'essai de suppression d'une basse tension appliquée à l'induit est effectué sur la machine tournant en asynchrone en charge, l'induit étant relié à une source triphasée symétrique de fréquence nominale, de tension assez basse pour éviter l'influence de la saturation et l'enroulement d'excitation étant court-circuité.

- 30 1 Quadrature-axis transient reactance (see Clause 8) is determined from the suddenly disconnected applied voltage test when the tested machine is magnetized along the quadrature-axis, by the quotient of (a) the difference between the initial measured line-to-line voltage $U(0)$ and of the initial transient voltage $\Delta U'(0) + U(\infty)$ (see Clause 29, Note 1) and (b) of the armature current $I(0)$ just before the instant of switching off:

$$X'_q = \frac{U(0) - \Delta U'(0) - U(\infty)}{\sqrt{3} I(0)} \Omega; \quad \left[x'_q = \frac{u(0) - \Delta u'(0) - u(\infty)}{i(0)} \right]$$

A check of the measured value may be made by calculating X'_d from the same test when sudden disconnection of the applied voltage is performed while the tested machine is magnetized along the direct axis. The value of X'_d is then calculated using the corresponding formula.

The results of X'_q measured from the suddenly disconnected applied voltage test may be considered accurate if the value of X'_d obtained from this test practically agrees with its value obtained in accordance with IEC Publication 34-4. Otherwise, the test is repeated at several decreasing values of slip, followed by extrapolation of X'_q values to zero slip. The value of X'_q obtained from this test corresponds to the unsaturated value.

- 30 2 From this test, quadrature-axis subtransient reactance (see Clause 9) may also be obtained (see Clause 29, Note 1), as

$$X''_q = \frac{U(0) - \Delta U'(0) - \Delta U''(0) - U(\infty)}{\sqrt{3} I} \Omega, \quad \left[x''_q = \frac{u(0) - \Delta u'(0) - \Delta u''(0) - u(\infty)}{i} \right]$$

When the machine is magnetized along the direct axis, at the moment of its switching off, the direct-axis subtransient reactance may be obtained using the corresponding formula.

- 30 3 The quadrature-axis transient open-circuit time constant (see Clause 15) is determined from the suddenly disconnected applied voltage test as the time required for the transient component of the armature voltage to decrease to $1/e \approx 0.368$ of its initial value. A check of the measured value τ'_{q0} may be made by calculating τ'_{d0} from the same test, when determining X'_d . The results of τ'_{q0} obtained from the suddenly disconnected applied voltage test may be considered accurate if the τ'_{d0} value obtained from this test agrees with its value obtained in accordance with IEC Publication 34-4.
- 30 4 Quadrature-axis subtransient open-circuit time constant (see Clause 18) is determined from the suddenly disconnected applied voltage test as the time required for the subtransient component of the armature voltage to decrease to $1/e \approx 0.368$ of its initial value $\Delta U''(0)$.

A check of the value of τ''_{q0} may be made in a similar way to that mentioned in Sub-clause 30 3, by determining τ''_{d0} from the same test performed in d-axis position and comparing its value with that obtained in accordance with IEC Publication 34-4.

31 Disconnecting applied low armature voltage test, the machine running asynchronously on load

The disconnecting applied low armature voltage test, the machine running asynchronously on load, is performed with the armature (primary) winding connected to a rated frequency symmetrical three-phase low-voltage supply to avoid influence of saturation, and the excitation winding is short-circuited.

Les composantes longitudinale et transversale de la tension et du courant sont déterminées au moyen de signaux de positionnement sur l'arbre de la machine

La tension, le courant et les signaux sont enregistrés à l'oscillographe avec une vitesse du papier de 2 m/s à 3 m/s

Les signaux de positionnement sont établis de manière à correspondre à l'axe longitudinal ou transversal au moyen de la tension entre deux phases à vide

L'émetteur produisant le signal de positionnement doit être déplacé autour de l'arbre de la machine jusqu'à ce que son signal coïncide avec l'instant où la tension U_{12} entre deux phases passe par zéro. En cette position le signal coïncidera avec le maximum de la tension de phase U_3 qui est à vide une tension d'axe transversal (figure 3, page 85)

Lorsque la machine est mise en charge, les valeurs instantanées de la tension de phase U_3 et du courant de phase I_3 au moment du signal coïncident avec les composantes transversales de cette tension et de ce courant. Le signal fournit également la composante longitudinale de la tension entre phases U_{12}

De cette façon, les tensions longitudinales et les courants transversaux s'obtiennent avec un seul signal

Les tensions et les courants sont constitués en règle générale par des composantes longitudinales et transversales. Ces composantes sont déterminées au moyen d'un oscillogramme comme il est montré sur la figure 4, page 85, dans les conditions correspondant à celles de la figure 5, page 85. Les flèches représentant les valeurs instantanées des composantes en présence du signal transversal sont tracées en trait plein, et celles correspondant à l'axe longitudinal en trait interrompu (celles-ci ne sont pas nécessaires pour le calcul)

Après le tarage des appareils enregistreurs on procède aux mesures. Quand la machine atteint un angle interne s'approchant de 90 ± 20 degrés électriques, on prend un oscillogramme de la tension entre phases U_{12} , du courant de phase I_3 et du signal transversal, en montrant un intervalle de temps qui inclut la mise hors circuit. Un exemple en est donné à la figure 6, page 86. Le courant $I_q(0)$ et la tension $U_d(0)$ sont mesurés avant la suppression de la tension appliquée. Les tensions successives (U_{d1} , U_{d2} , U_{d3} , etc.) sont déterminées au moyen d'un oscillogramme après la mise hors circuit. Ces tensions, la tension résiduelle $U_d(\infty)$ (voir figure 7, page 86) étant soustraite suivant le cas, sont reportées en fonction du temps en coordonnées logarithmiques (voir figure 8, page 87) et les composantes initiales transitoires et subtransitoires s'obtiennent de façon habituelle

32 Détermination des grandeurs à partir de l'essai de suppression brusque d'une basse tension appliquée à l'induit, la machine tournant en asynchrone en charge

La réactance synchrone transversale (voir article 6) peut être déterminée à partir de l'essai de suppression brusque d'une basse tension appliquée à l'induit, la machine essayée s'approchant de $\delta = 90^\circ \pm 20^\circ$, en utilisant $U_d(0) - U_d(\infty)$ et $I_q(0)$ (avant la mise hors circuit) au moment du signal (voir figure 6)

La réactance synchrone transversale est alors :

$$X_q = \frac{U_d(0) - U_d(\infty)}{\sqrt{3} I_q(0)} \Omega ; \quad \left| x_q = \frac{u_d(0) - u_d(\infty)}{i_q(0)} \right|$$

Une vérification de la valeur mesurée devra être faite en calculant X_d au moyen de cet essai et avec le même glissement, alors que la machine essayée est magnétisée suivant l'axe longitudinal. La même formule est utilisée pour calculer X_d . La valeur de X_q est considérée comme correcte si la valeur de X_d obtenue à partir de cet essai correspond à celle obtenue conformément à la Publication 34-4 de la CEI, article 27

By means of positioning signals on the shaft, the direct- and quadrature-axis components of voltage and current are determined

Voltages, current and signals are obtained as oscillographic traces with a paper-speed of 2 m/s to 3 m/s

The positioning signals are set to correspond to q-axis or d-axis by means of a line-to-line voltage at no load

The emitter producing the positioning signal should be displaced round the shaft until its signal coincides with the instant when the line-to-line voltage U_{12} passes through zero. At this position the signal will coincide with the maximum of phase voltage U_3 which, at no load, corresponds to a q-axis voltage (Figure 3, page 85)

When the machine is loaded, the instantaneous values of the phase voltage U_3 and of the phase current I_3 at the instant of the signal coincide with the q-axis components of this voltage and current. The signal provides also the d-axis component of the line-to-line voltage U_{12}

In this way both the d-axis voltages and the q-axis current are obtained with one single signal

In general, voltages and currents consist of d-axis and q-axis components. These components are determined from an oscillogram as shown on Figure 4, page 85, for conditions corresponding to Figure 5, page 85. The arrows corresponding to the momentary values of the components at the q-axis signal are drawn as full lines, and those corresponding to the d-axis as broken lines (these are not needed for calculations)

After adjusting the recorders, the test measurements are performed. When the machine has reached an internal angle approaching 90 ± 20 electrical degrees, an oscillogram is taken of the line-to-line voltage U_{12} , the phase current I_3 and the q-axis signal, showing a time interval that includes switching off. An example is given in Figure 6, page 86. Before disconnecting the applied voltage, the current $I_q(0)$ and the voltage $U_d(0)$ are measured. The sequence voltages after switching off are determined from an oscillogram (U_{d1}, U_{d2}, U_{d3} , etc.). These voltages, after having subtracted, if necessary, the residual voltage $U_d(\infty)$, (see Figure 7, page 86), are plotted on a logarithmic scale (see Figure 8, page 87) against time and the initial transient and subtransient components are found in the usual way

32 Determination of quantities from the sudden disconnection of applied low armature voltage, the machine running asynchronously on load, test

Quadrature-axis synchronous reactance (see Clause 6) may be determined from the suddenly disconnected applied low-voltage test when the machine under test is approaching $\delta = 90^\circ \pm 20^\circ$, by using $U_d(0) - U_d(\infty)$ and $I_q(0)$ (before switching off) at the instant of the signal (see Figure 6)

The quadrature-axis synchronous reactance is then:

$$X_q = \frac{U_d(0) - U_d(\infty)}{\sqrt{3} I_q(0)} \Omega, \quad \left[x_q = \frac{u_d(0) - u_d(\infty)}{i_q(0)} \right]$$

A check of the measured value shall be made by determining X_d from this test at the same slip when the machine under test is magnetized in the direct axis position. The corresponding formula is used for calculation of X_d . The value of X_q is considered accurate when the value of X_d obtained from this test corresponds with its value obtained in accordance with IEC Publication 34-4, Clause 27

- 32.1 La réactance transitoire transversale (voir article 8) peut être déterminée au moyen de cet essai (voir article 31) comme (voir figure 6, page 86):

$$X'_q = \frac{U_a(0) - \Delta U'_a(0) - U_a(\infty)}{\sqrt{3} I_q(0)} \Omega, \quad \left| x'_q = \frac{u_a(0) - \Delta u'_a(0) - u_a(\infty)}{i_q(0)} \right|$$

- 32.2 La réactance subtransitoire transversale (voir article 9) peut être déterminée au moyen de cet essai (voir article 31) comme

$$X''_q = \frac{U_a(0) - \Delta U'_a(0) - \Delta U''_a(0) - U_a(\infty)}{\sqrt{3} I_q(0)} \Omega, \quad \left| x''_q = \frac{u_a(0) - \Delta u'_a(0) - \Delta u''_a(0) - u_a(\infty)}{i_q(0)} \right|$$

- 32.3 La constante de temps transitoire transversale à circuit ouvert (voir article 15) est déterminée à partir de l'essai de suppression brusque d'une tension appliquée à l'induit comme étant le temps nécessaire pour que la composante transitoire longitudinale de la tension de l'induit décroisse jusqu'à $1/\varepsilon \approx 0,368$ fois sa valeur initiale $\Delta U'(0)$

- 32.4 La constante de temps subtransitoire transversale à circuit ouvert (voir article 18) est déterminée à partir de l'essai de suppression brusque d'une tension appliquée à l'induit comme étant le temps nécessaire pour que la composante subtransitoire longitudinale de la tension d'induit décroisse jusqu'à $1/\varepsilon \approx 0,368$ fois sa valeur initiale $\Delta U''(0)$

33 Essai de mise en court-circuit brusque de la machine, tournant en charge, alimentée à basse tension

La mise en court-circuit brusque de la machine est effectuée, la machine tournant en charge, avec l'enroulement d'induit relié à une source de basse tension symétrique (environ $0,1 U_n$) de fréquence nominale. L'enroulement d'excitation est court-circuité.

La tension doit être choisie avec soin pour que la machine puisse être chargée jusqu'à un angle interne de 90 ± 20 degrés électriques et qu'elle ne soit pas endommagée lors de la mise en court-circuit. La source d'alimentation est séparée après la mise en court-circuit.

Les signaux de positionnement sur l'arbre de la machine sont ajustés de la même façon qu'à l'article 31. La composante transversale du courant est mesurée en utilisant le courant dans la phase 3 au moment du signal transversal. La tension longitudinale est mesurée au même instant que la tension U_{12} entre phases. L'essai proprement dit est fait en court-circuitant la machine après qu'elle a atteint un angle s'approchant de 90 degrés électriques ($t = 0$). Elle peut aussi glisser très faiblement. Les valeurs de $I_q(0)$, $U_a(0)$, et après la mise en court-circuit, I_{q1} , I_{q2} , etc., sont enregistrées à l'oscillographe comme on l'a montré à la figure 9, page 87. Les figures 10 et 11, page 88, à partir desquelles on trouve les valeurs de $I_q(0)$, $\Delta I'_q(0)$ et $\Delta I''_q(0)$, sont tracées de manière analogue à celle de la figure 7 et de la figure 8, pages 86 et 87.

34 Détermination des grandeurs au moyen d'un court-circuit brusque de la machine tournant en charge au cours d'un essai à basse tension

La réactance transitoire transversale (voir article 8) est déterminée à partir de l'essai de mise en court-circuit brusque à basse tension, lorsque la machine en charge s'approche d'un angle de 90 degrés électriques.

La réactance transitoire transversale (voir article 8) peut être déterminée au moyen de cet essai (voir article 33) comme:

$$X'_q = \frac{U_a(0)}{\sqrt{3} I'_q(0)} \Omega; \quad \left| x'_q = \frac{u_a(0)}{i'_q(0)} \right|$$

- 32.1 The quadrature-axis transient reactance (see Clause 8) may be determined from this test (see Clause 31) as (see Figure 6, page 86):

$$X'_q = \frac{U_a(0) - \Delta U'_d(0) - U_a(\infty)}{\sqrt{3} I_q(0)} \Omega; \quad \left[x'_q = \frac{u_a(0) - \Delta u'_d(0) - u_a(\infty)}{i_q(0)} \right]$$

- 32.2 The quadrature-axis subtransient reactance (see Clause 9) may be determined from this test (see Clause 31) as:

$$X''_q = \frac{U_a(0) - \Delta U'_d(0) - \Delta U''_d(0) - U_a(\infty)}{\sqrt{3} I_q(0)} \Omega,$$

$$\left[x''_q = \frac{u_a(0) - \Delta u'_d(0) - \Delta u''_d(0) - u_a(\infty)}{i_q(0)} \right]$$

- 32.3 The quadrature-axis open-circuit transient time constant (see Clause 15) is determined from the suddenly disconnected applied voltage test as the time required for the transient direct-axis component of the armature voltage to decrease to $1/e \approx 0.368$ of its initial value $\Delta U'(0)$.
- 32.4 The quadrature-axis subtransient open-circuit time constant (see Clause 18) is determined from the suddenly disconnected applied voltage test as the time required for the subtransient direct-axis component of the armature voltage to decrease to $1/e \approx 0.368$ of its initial value $\Delta U''(0)$.

33 Sudden short-circuiting of machine, running on load at low-voltage, test

The sudden short-circuiting of the machine is performed while it is running on load with the armature (primary) winding connected to a rated-frequency symmetrical three-phase low-voltage supply (about $0.1 U_n$). The excitation winding is short-circuited.

Care has to be taken in choosing the proper voltage to ensure that the machine can be loaded up to 90 ± 20 electrical degrees, and also that no damage is done when short-circuiting the machine. The voltage supply is disconnected after short-circuiting the machine.

The positioning signals on the shaft are adjusted in a similar way to that described in Clause 31. The q-axis current is measured using the current in phase 3 at the time of the q-axis signal. The d-axis voltage is measured at the same time as the line-to-line U_{12} voltage. The test is performed by short-circuiting the machine after it has reached an angle approaching 90 electrical degrees ($t = 0$). It may also slip very slowly. Values of $I_q(0)$, and $U_d(0)$, and after the short-circuit I_{q1} , I_{q2} , etc., are oscillographed as shown in Figure 9, page 87. Figures 10 and 11, page 88, from which the values $I_q(0)$, $\Delta I'_q(0)$ and $\Delta I''_q(0)$ are found, are plotted similarly to Figures 7 and 8, pages 86 and 87.

34 Determination of quantities from sudden short-circuiting, running on load at low-voltage, test

The quadrature-axis transient reactance (see Clause 8) is determined from the sudden short-circuit test at low voltage when the machine under load approaches an angle of 90 electrical degrees.

The quadrature-axis transient reactance (see Clause 8) may be determined from this test (see Clause 33) as:

$$X'_q = \frac{U_d(0)}{\sqrt{3} I'_q(0)} \Omega, \quad \left[x'_q = \frac{u_d(0)}{i'_q(0)} \right]$$

- 34.1 La réactance subtransitoire transversale (voir article 9) peut être déterminée au moyen de cet essai (voir article 33) comme:

$$X_q'' = \frac{U_d(0)}{\sqrt{3} [I_q'(0) + I_q''(0)]} \Omega; \quad \left[x_q'' = \frac{u_d(0)}{i_q'(0) + i_q''(0)} \right]$$

- 34.2 La constante de temps transversale en court-circuit (voir article 16), telle qu'on l'a déterminée à partir de l'essai de mise en court-circuit brusque à basse tension, la machine tournant en charge, est le temps nécessaire pour que la composante transversale du courant dans l'induit en court-circuit décroisse jusqu'à $1/e \approx 0,368$ fois sa valeur initiale $\Delta I_q'(0)$

- 34.3 La constante de temps subtransitoire transversale en court-circuit (voir article 19) déterminée à partir de l'essai de mise en court-circuit brusque à basse tension, la machine tournant en charge, est le temps nécessaire pour que la composante transversale du courant dans l'induit en court-circuit décroisse jusqu'à $1/e \approx 0,368$ fois sa valeur initiale $\Delta I_q''(0)$

35 **Essai de court-circuit brusque entre deux phases**

L'essai de court-circuit brusque entre deux phases en vue de la détermination de la réactance inverse est effectué à la vitesse nominale. Avant de provoquer le court-circuit, la machine doit fonctionner avec son induit à circuit ouvert.

Les prescriptions relatives au système d'excitation et au choix des appareils de mesure doivent être conformes à celles indiquées à l'article 40 de la Publication 34-4 de la CEI.

La tension aux bornes de la machine, le courant d'excitation et la température du rotor sont mesurés immédiatement avant le court-circuit.

Pour déterminer la réactance inverse, on enregistre à l'oscillographe la tension d'induit aux bornes qui vont être mises en court-circuit, le courant dans les phases correspondantes et le courant dans le circuit d'excitation. L'enregistrement des oscillogrammes et la méthode d'analyse des oscillogrammes doivent être conformes aux dispositions de l'article 38 de la Publication 34-4 de la CEI.

Pour obtenir la valeur de X_2 qui correspond à l'état non saturé de la machine, c'est-à-dire aux conditions de courant nominal, l'essai est effectué à plusieurs tensions entre deux phases comme au cours de l'essai de court-circuit triphasé brusque décrit à l'article 40 de la Publication 34-4 de la CEI, et la valeur cherchée est obtenue à partir des résultats enregistrés.

Pour obtenir la valeur de X_2 qui correspond à l'état saturé de la machine, la tension aux bornes de la machine avant la mise en court-circuit entre deux phases de l'enroulement d'induit doit être égale à la valeur nominale.

Si l'essai ne peut pas être exécuté à la tension nominale, il peut être effectué à plusieurs valeurs de plus en plus basses de la tension d'induit comme à l'article 40 de la Publication 34-4 de la CEI et X_2 peut être déterminé pour chaque essai. Ces valeurs sont alors représentées graphiquement en fonction de la tension à circuit ouvert avant la mise en court-circuit et une valeur approximative correspondant à la tension nominale est trouvée par la méthode d'extrapolation.

L'essai de court-circuit sera conduit de telle sorte que la composante aperiodique soit pratiquement maximale, c'est-à-dire que l'instant du court-circuit soit décalé de 30° au plus par rapport au passage de la tension par zéro.

36 **Détermination de la réactance inverse à partir de l'essai de court-circuit brusque entre deux phases**

La réactance inverse (voir article 10) est déterminée à partir de l'essai de court-circuit brusque entre deux phases en utilisant la formule

$$X_2 = \frac{U}{I''} - X_d'' \Omega; \quad \left[x_2 = \frac{\sqrt{3} u}{i''} - x_d'' \right]$$

- 34.1 The quadrature-axis subtransient reactance (see Clause 9) may be determined from this test (see Clause 33) as:

$$X_q'' = \frac{U_a(0)}{\sqrt{3} [I_q'(0) + I_q''(0)]} \Omega, \quad \left[x_q'' = \frac{u_a(0)}{i_q'(0) + i_q''(0)} \right]$$

- 34.2 The quadrature-axis short-circuit time constant (see Clause 16), as determined from the sudden short-circuit test at low-voltage, the machine running on load, is the time required for the component of the quadrature-axis short-circuit armature current to decrease to $1/e \approx 0.368$ of its initial value $\Delta I_q'(0)$
- 34.3 The quadrature-axis subtransient short-circuit time constant (see Clause 19) as determined from the sudden short-circuit test at low-voltage, the machine running on load, is the time required for the component of the quadrature-axis short-circuit armature current to decrease to $1/e \approx 0.368$ of its initial value $\Delta I_q''(0)$

35 Sudden line-to-line short-circuit test

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

The requirements for the excitation system and choice of measuring instruments shall be in accordance with those stated in IEC Publication 34-4, Clause 40.

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

To determine negative-sequence reactance, oscillograms are taken of the armature (primary) winding voltage at the terminals to be short-circuited, armature current in the same phases and the current in the excitation circuit. Oscillographic recording and method of analysis of the oscillogram shall be in accordance with IEC Publication 34-4, Clause 38.

To obtain X_2 corresponding to the unsaturated state of the machine, i.e. rated current conditions, the test is performed at several line-to-line voltages similar to the sudden three-phase short-circuit test described in IEC Publication 34-4, Clause 40, and the required value is obtained from the plotted results.

To obtain X_2 corresponding to the saturated state of the machine, the voltage at the terminals of the machine before line-to-line short-circuiting of the armature (primary) winding should be equal to the rated value.

If the test cannot be performed at rated voltage it may be conducted at several decreased values of armature voltages as in IEC Publication 34-4, Clause 40, and X_2 determined for each test. These values are then plotted against open-circuit voltage before short-circuiting and an approximate value corresponding to the rated voltage can be found by extrapolation.

The short-circuit test should be performed such that the aperiodic component is practically a maximum, that is the actual short-circuit should occur within 30° of the time of zero voltage.

36 Determination of negative-sequence reactance from the sudden line-to-line short-circuit test

Negative-sequence reactance (see Clause 10) is determined from the sudden line-to-line short-circuit test using the formula:

$$X_2 = \frac{U}{I''} - X_d'' \Omega; \quad \left[x_2 = \frac{\sqrt{3} u}{i''} - x_d'' \right]$$

- où: U = tension d'induit entre deux phases à circuit ouvert, mesurée immédiatement avant le court-circuit
- I'' = composante périodique fondamentale initiale du courant d'induit en court-circuit entre phases, obtenue après analyse des oscillogrammes comme étant la somme de $I(\infty) + \Delta I_k'(0) + \Delta I_k''(0)$, chacune de ces composantes de courant étant déterminée conformément à l'article 38 de la Publication 34-4 de la CEI
- X_a' = réactance subtransitoire longitudinale, déterminée à l'aide d'un essai de court-circuit triphasé, effectué conformément au paragraphe 41.1 de la Publication 34-4 de la CEI. La valeur saturée ou la valeur non saturée de X_a' doit être choisie de telle sorte qu'elle corresponde à la valeur respective de X_2

37 Essai de court-circuit triphasé brusque appliqué à la machine après déconnexion de la ligne

L'essai de court-circuit triphasé brusque pour la détermination des grandeurs des machines synchrones peut être effectué en faisant ralentir la machine essayée à condition que sa décélération soit d'au plus 0,05 fois sa vitesse nominale par seconde. Avant la séparation d'avec la ligne, la machine fonctionnant en moteur à vide est excitée jusqu'à une valeur de courant pour 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.

Après la déconnexion, le plus vite possible et pas plus tard qu'au bout d'une seconde, la machine est mise en court-circuit pratiquement simultanément. Les exigences générales imposées à l'équipement, aux appareils de mesure, à l'excitation et à la détermination des grandeurs sont les mêmes que celles indiquées à l'article 40 de la Publication 34-4 de la CEI.

38 Détermination des grandeurs à partir de l'essai de court-circuit triphasé brusque appliqué à la machine après déconnexion de la ligne

La détermination des grandeurs à partir de l'essai d'application brusque d'un court-circuit est effectuée de manière analogue à celle de l'article 41 de la Publication 34-4 de la CEI.

39 Essai d'application d'une tension avec le rotor enlevé

L'essai est effectué en appliquant à l'induit une tension triphasée symétrique à fréquence nominale. Le rotor est enlevé. Une bobine exploratrice est placée à la surface des dents, ou suivant un diamètre légèrement inférieur à l'alésage du stator de manière à exclure les flux de fuites à travers les encoches. La longueur de cette bobine est égale à la longueur totale du circuit magnétique de l'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 circuit magnétique, de manière à les soustraire à l'influence des flux de fuites autour des têtes de bobines de l'induit (figure 12, page 89).

Si l'induit a un nombre fractionnaire d'encoches par pôle et par phase, la largeur de la bobine est prise égale au nombre entier d'encoches immédiatement inférieur au pas polaire.

L'enroulement d'induit est relié à la source de tension et la tension appliquée (U), le courant magnétisant dans l'induit (I), la puissance absorbée (P) et la tension de la bobine exploratrice (U_e) sont mesurés. La tension de la bobine exploratrice doit être mesurée au moyen d'un voltmètre à forte résistance intérieure (de préférence avec un voltmètre à tubes).

40 Détermination des grandeurs à partir de l'essai d'application d'une tension

La réactance de fuites (voir article 11) est déterminée à partir de l'essai d'application d'une tension en utilisant la formule suivante:

where: U = the open-circuit line-to-line armature voltage, measured immediately before short-circuiting

I'' = the initial fundamental periodic component of the line-to-line short-circuit armature current, obtained from the analysis of the oscillograph as a sum of $I(\infty) + \Delta I_k'(0) + \Delta I_k''(0)$, each one of these current components being determined in accordance with IEC Publication 34-4, Clause 38

X_d'' = direct-axis subtransient reactance as determined from a sudden three-phase short-circuit test in accordance with IEC Publication 34-4, Sub-clause 41.1 The saturated or unsaturated value of X_d'' should be taken to match the corresponding required value of X_2

37 Suddenly applied short-circuit test following disconnection from line

The sudden three-phase short-circuit test for the determination of synchronous machine quantities 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 one second, 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 IEC Publication 34-4, Clause 40.

38 Determination of quantities from the suddenly applied short-circuit test following disconnection from line

The determination of quantities from the suddenly applied short-circuit test is made similarly to IEC Publication 34-4, Clause 41.

39 Applied voltage test with rotor removed

The test is performed when three-phase rated frequency symmetrical voltage is applied to the armature (primary) 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 (Figure 12, page 89).

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

The armature (primary) winding is connected to the voltage source and the applied voltage (U), armature (primary) winding magnetising current (I), power input (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 (preferably a vacuum tube voltmeter).

40 Determination of quantities from the applied voltage test

Leakage reactance (see Clause 11) from the applied voltage test with rotor removed is calculated by the following formula;

$$X = X_a - X_b \Omega$$

où: $X_a = \sqrt{Z^2 - R^2} \Omega$, avec $Z = \frac{U}{\sqrt{3}I} \Omega$, $R = \frac{P}{3I^2} \Omega$

$$X_b = \frac{U_c N k_w}{I N_c} \Omega, \text{ réactance due au flux à travers la surface active de l'induit créée par l'enroulement d'induit dans l'espace qui est occupée normalement par le rotor}$$

Dans ces formules: U_c = tension de la bobine exploitative, en volts

I = courant dans l'induit, en ampères

N = nombre de spires par circuit connectées en série d'une phase du stator

N_c = nombre de spires de la bobine exploitative

k_w = facteur de bobinage de l'induit

Dans le cas où le stator possède un nombre fractionnaire d'encoches par pôle et par phase, la largeur de la bobine exploitative est prise égale au nombre entier immédiatement inférieur au pas polaire X_b est alors calculé au moyen de la formule:

$$X_b = \frac{U_c}{I} \frac{N k_w}{N_c \sin\left(\frac{q' \pi}{3q}\right)} \Omega$$

où: q' = nombre entier d'encoches immédiatement inférieur au pas polaire

q = nombre fractionnaire d'encoches par pôle et par phase

Lorsqu'il n'est pas fait usage d'une bobine exploitative, la valeur de X_b peut être calculée empiriquement au moyen de la formule:

$$X_b = \frac{15 N^2 k_w^2 f L'}{p} 10^{-8} \Omega$$

où: N et k_w sont comme ci-dessus

f = fréquence appliquée

p = nombre de paires de pôles

$$L' = L - \frac{nd}{2} + \frac{\tau_p}{6}$$

où: L = longueur totale du circuit magnétique du stator (y compris les canaux de ventilation), en cm

n = nombre de canaux de ventilation

d = longueur axiale d'un canal de ventilation, en cm

τ_p = pas polaire, en cm

La méthode de détermination de X_b au moyen de l'essai est la méthode préférée

41 Essai à rotor bloqué

L'essai est effectué avec le rotor maintenu à l'arrêt, en appliquant la tension triphasée de fréquence nominale à l'enroulement induit, l'enroulement d'excitation étant court-circuité ou fermé par l'intermédiaire d'une résistance, suivant le cas,

$$X = X_a - X_b \Omega$$

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

$X_b = \frac{U_c Nk_w}{I N_c} \Omega$, reactance due to flux over the armature active surface created by the armature (primary) winding in the space, which is normally occupied by the rotor

In these formulae: U_c = search coil voltage, in volts
 I = armature current, in amperes
 N = number of series-connected turns per circuit of a phase of the armature (primary) winding
 N_c = number of search coil turns
 k_w = armature (primary) winding factor

In the case where the stator has a fractional number of slots per pole and phase, the search coil width is chosen equal to the greatest whole number of slots per pole pitch. Then X_b is calculated as:

$$X_b = \frac{U_c}{I} \frac{Nk_w}{N_c \sin\left(\frac{q' \pi}{3q}\right)} \Omega$$

where: q' = the nearest largest whole number of slots per pole pitch
 q = the fractional number of slots per pole pitch

When a search coil is not used, the value of X_b may be calculated empirically using the formula:

$$X_b = \frac{15N^2k_w^2fL}{p} 10^{-8} \Omega$$

where: N and k_w are as above
 f = applied frequency
 p = number of pole pairs

$$L' = L - \frac{nd}{2} + \frac{\tau_p}{6}$$

where: L = overall length of stator core (including ventilating ducts), in cm

n = number of ventilating ducts
 d = axial length of ventilating duct, in cm
 τ_p = pole pitch, in cm

The test method of determining X_b is preferred

41 Locked rotor test

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

L'essai devra être effectué en appliquant la tension nominale à l'enroulement d'induit à moins que l'échauffement excessif de l'enroulement amortisseur et de l'induit n'empêche d'exécuter cet essai

Dans ce cas une série d'essais à tension réduite peut être exécutée de manière à permettre la détermination des grandeurs correspondant à la tension nominale par extrapolation. La valeur réduite de la tension appliquée doit être suffisamment élevée, à cause de l'effet de saturation de telle sorte que les grandeurs correspondant à la tension nominale puissent être correctement extrapolées. Au cours de l'essai, le courant d'induit doit être généralement supérieur à deux fois le courant nominal.

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, généralement, elle est inférieure à 10 s.

La tension et le courant de l'induit dans les trois phases sont enregistrées. Il est aussi recommandé de mesurer la puissance d'entrée.

42 Détermination de l'impédance de démarrage initiale au moyen de l'essai à rotor bloqué

L'impédance de démarrage initiale peut être déterminée à partir de l'essai à rotor bloqué comme étant:

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

où: U = tension entre deux phases, en volts

I_{av} = valeur moyenne des trois courants en ligne établis, mesurés au cours de l'essai, en ampères

Si l'essai a été effectué à plusieurs tensions réduites, la valeur de l'impédance de démarrage initiale est alors déterminée pour chaque tension et la valeur pour la tension nominale peut être obtenue par extrapolation de l'impédance de démarrage initiale jusqu'à la valeur de la tension nominale au moyen de la courbe de variation de Z_{st} en fonction de la tension appliquée.

Si la puissance absorbée est mesurée, la résistance et la réactance de démarrage initiales peuvent être déterminées comme:

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

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

43 Essai d'application brusque de l'excitation avec l'enroulement induit à circuit ouvert

L'essai d'application brusque de l'excitation avec l'enroulement induit à circuit ouvert est effectué sur la machine tournant à sa vitesse nominale avec son enroulement d'excitation initialement à circuit ouvert. L'excitation de la machine est fournie de préférence par sa propre excitatrice qui doit être excitée séparément. Si la propre excitatrice ne peut pas être utilisée, on peut se servir d'une excitatrice indépendante, mais le courant de celle-ci doit être égal à deux fois au moins le courant d'excitation à vide de la machine essayée, et la résistance de son induit ne doit pas être supérieure à celle de l'excitatrice principale de la machine. Cette excitatrice doit également être excitée séparément.

La tension de l'excitatrice est réglée à une valeur correspondant à la partie rectiligne de la caractéristique à vide, qui, en règle générale, ne dépasse pas 0,7 fois la tension nominale d'induit. L'enroulement d'excitation de la machine essayée est relié brusquement à l'excitatrice. On enregistre à l'oscillographe la tension de l'induit, le courant d'excitation et, à titre de contrôle, la tension de l'excitatrice.

The test should be made with rated voltage applied to the armature (primary) winding unless excessive heating of damper winding and armature (primary) 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 rated voltage quantity 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 is usually kept below 10 s

Armature voltage and current in all three phases are recorded. It is also desirable to measure power input

42 Determination of initial starting impedance from the locked rotor test

The initial starting impedance may be determined from the locked rotor test as

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

where: U = applied line to line voltage, in volts

I_{av} = average of three-line steady state currents measured during the test, in amperes

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, then the initial starting resistance and reactance can be determined as

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

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

43 Suddenly applied excitation test with armature (primary) winding open-circuited

The suddenly applied excitation test with armature (primary) winding open-circuited is performed on a machine running at rated speed with the excitation winding initially open-circuited. Excitation of the machine is provided, preferably, from its own exciter which must be separately excited. If its own exciter cannot be used, then a separate exciter may be used but its rated current value must be at least twice the no-load excitation current of the tested machine and its armature resistance not greater than that of the main machine exciter. This separate exciter shall also be separately excited

The exciter voltage is set at a value corresponding to the linear portion of the no-load saturation curve, which as a rule is not higher than 0.7 times the rated open-circuit armature voltage. The excitation winding of the machine under test is suddenly connected to the exciter. An oscillographic recording is made of one line armature voltage, excitation current and, for control, exciter voltage

L'essai est considéré comme satisfaisant si la tension de l'excitatrice reste pratiquement constante pendant l'essai. La différence entre la tension d'induit en régime établi et la tension déterminée par l'enveloppe de la tension d'induit croissante est reportée en fonction du temps sur un diagramme à échelle semi-logarithmique, puis extrapolée jusqu'à l'instant de fermeture de l'interrupteur du circuit d'excitation (figure 13, page 89). L'extrapolation de la partie rectiligne de cette courbe jusqu'à l'axe des ordonnées donne la valeur initiale de la composante transitoire $\Delta U'(0)$.

Note — Pour les grosses machines, la tension résiduelle peut être négligée en règle générale.

44 Détermination de τ'_{d0} à partir de l'essai d'application brusque de l'excitation avec l'enroulement induit à circuit ouvert

La constante de temps transitoire longitudinale à circuit ouvert (voir article 13) est déterminée à partir de l'essai d'application brusque de l'excitation avec l'induit à circuit ouvert comme étant égale au temps nécessaire pour que la composante transitoire de tension $\Delta U'(0)$ décroisse jusqu'à $1/\varepsilon \approx 0,368$ fois sa valeur initiale.

45 Essai d'application brusque de l'excitation avec l'enroulement induit en court-circuit

L'essai d'application brusque de l'excitation avec l'enroulement induit en court-circuit est effectué sur la machine tournant à sa vitesse nominale avec son enroulement d'excitation initialement à circuit ouvert. Les conditions à remplir par la source d'excitation sont données à l'article 43. La machine est excitée à partir de sa propre excitatrice qui doit être excitée séparément. L'excitation peut être encore fournie par une autre source.

La tension de l'excitation est réglée à une valeur correspondant à un courant de court-circuit égal au courant nominal de la machine essayée. L'enroulement d'excitation de la machine essayée est relié brusquement à l'excitatrice. On enregistre à l'oscillographe le courant dans l'induit, le courant d'excitation et la tension de l'excitatrice. L'essai est considéré comme satisfaisant si la tension de l'excitatrice reste pratiquement constante pendant l'essai. La différence entre le courant d'induit en régime établi et l'enveloppe du courant d'induit croissant est reportée en fonction du temps sur un diagramme à échelle semi-logarithmique, puis extrapolée jusqu'à l'instant de fermeture de l'interrupteur du circuit d'excitation (figure 14, page 90). L'extrapolation de la partie rectiligne de la courbe jusqu'à l'axe des ordonnées donne la valeur initiale de la composante transitoire $\Delta I'_a(0)$. Le courant initial dû au flux résiduel est négligé.

46 Détermination de τ_d à partir de l'essai d'application brusque de l'excitation avec l'enroulement induit en court-circuit

La constante de temps transitoire longitudinale en court-circuit (voir article 14) est déterminée à partir de l'essai d'application brusque de l'excitation avec l'induit en court-circuit comme étant égale au temps nécessaire pour que la composante transitoire du courant d'induit $\Delta I'_a(0)$ décroisse jusqu'à $1/\varepsilon \approx 0,368$ fois sa valeur initiale.

47 Essai de rétablissement de la tension

Pour la description de cet essai, voir l'article 42 de la Publication 34-4 de la CEI. Pour déterminer la composante subtransitoire à décroissance rapide de la différence entre la tension en régime établi et la tension déterminée par l'enveloppe de la tension de rétablissement, il est nécessaire d'utiliser une grande vitesse au moment de l'enregistrement de la portion initiale de la courbe de tension de l'induit. Il est recommandé d'utiliser une vitesse de 0,4 m/s au moins.

De plus, la résistance en série avec l'enregistreur doit permettre d'obtenir une amplitude convenable au début du tracé, mais elle doit en général être augmentée automatiquement au bout de 0,5 s au plus, ou bien des mesures doivent être prises pour mettre l'enregistreur hors circuit, de manière à le protéger contre les tensions excessives.

The test is considered satisfactory, if the exciter voltage remains substantially constant during the test. The difference between the sustained armature voltage and the voltage determined by the envelope of the rising armature voltage is plotted on a semi-logarithmic scale against time, and then extrapolated to the instant of the exciter connection switch closure (Figure 13, page 89). The extrapolation of the straight portion of this curve to the ordinate axis gives the initial value of the transient component $\Delta U'(0)$.

Note — For large machines, the residual voltage can usually be neglected.

44 Determination of τ'_{d0} from the suddenly applied excitation test with armature (primary) winding open-circuited

The direct-axis transient open-circuit time constant (see Clause 13) from the suddenly applied excitation test with open-circuit armature (primary) winding is determined as the time required for the transient voltage component $\Delta U'(0)$ decrease to $1/e \approx 0.368$ of its initial value.

45 Suddenly applied excitation test with armature (primary) winding short-circuited

The suddenly applied excitation test with armature (primary) winding short-circuited is performed on a machine running at rated speed with the excitation winding initially open-circuited. The requirements for the excitation source are as stated in Clause 43. Excitation of the machine is provided from its own exciter which must be separately excited. Excitation may be provided from another source.

The exciter voltage is set at a value corresponding to the rated short-circuit current of the machine under test. The excitation winding of the machine under test is suddenly connected to the exciter. An oscillographic recording of armature (primary) winding current, excitation current and exciter voltage is made. The test is considered satisfactory if the exciter voltage remains substantially constant during the test. The difference between the sustained armature current and the current determined by the envelope of the rising armature current is plotted on a semi-logarithmic scale against time and then extrapolated to the instant of switching off the exciter (Figure 14, page 90). The extrapolation of the straight portion of the curve to the ordinate axis gives the initial value of the transient component $\Delta I'_d(0)$. The initial current due to residual flux can usually be neglected.

46 Determination of τ_d from suddenly applied excitation test with armature (primary) winding short-circuited

The direct-axis transient short-circuit time constant (see Clause 14) from the suddenly applied excitation test with a short-circuited armature (primary) winding is determined as the time required for the transient armature current component $\Delta I'_d(0)$ to decrease to $1/e \approx 0.368$ of its initial value.

47 Voltage recovery test

For the description of the test, see IEC Publication 34-4, Clause 42. In order to determine the rapidly decaying subtransient component of the difference of sustained voltage and envelope voltage, it is necessary to use a high recording speed in registering the initial portion of the armature voltage curve. It is recommended that the recording speed should be not less than 0.4 m/s.

Moreover, the resistance connected in series with the recording unit should provide adequate initial trace amplitude and usually not later than 0.5 s should be automatically increased or means should be taken to disconnect the recording unit, protecting it from excessive voltage.

48 Détermination des grandeurs à partir de l'essai de rétablissement de la tension

La réactance transitoire longitudinale (voir article 7), la réactance subtransitoire longitudinale (voir Publication 34-4 de la CEI, article 8) et la constante de temps transitoire longitudinale à circuit ouvert (voir article 13) sont déterminées conformément à la Publication 34-4 de la CEI, article 43 et paragraphes 43.1 et 43.2

- 48.1 La constante de temps subtransitoire longitudinale à circuit ouvert (voir article 17) est déterminée à partir de l'essai de rétablissement de la tension comme étant le temps nécessaire pour que la composante subtransitoire de la tension $\Delta U''$, déterminée en accord avec la Publication 34-4 de la CEI, article 42, décroisse jusqu'à $1/\varepsilon \approx 0,368$ fois sa valeur initiale

49 Essai d'extinction du champ avec l'enroulement induit à circuit ouvert

La manière de procéder à cet essai est analogue à celle décrite à l'article 58 de la Publication 34-4 de la CEI. Contrairement à l'essai décrit dans la Publication 34-4 de la CEI, cet essai est exécuté alors que la machine n'est pas saturée, c'est-à-dire que la machine est excitée à une tension correspondant à la portion linéaire de la courbe de saturation à vide. Cet essai particulier avec l'induit à circuit ouvert est effectué deux fois : d'abord en court-circuitant l'enroulement d'excitation, puis en le connectant en série avec une résistance de décharge dont la valeur doit être de $3R_f$ à $10R_f$.

Une tension d'induit entre deux phases et le courant d'excitation sont mesurés et enregistrés à l'oscillographe. La tension d'induit est reportée en fonction du temps en coordonnées semi-logarithmiques avec la tension d'induit sur l'échelle logarithmique. Si la tension résiduelle de la machine est supérieure à 0,03 fois la tension appliquée, c'est la différence entre la tension d'induit mesurée et la tension résiduelle qui est reportée. Le courant d'excitation, fourni par l'oscillogramme, est également reporté en coordonnées semi-logarithmiques de manière à déterminer la valeur transitoire initiale du courant $\Delta i_f''(0)$ dans l'enroulement d'excitation, en extrapolant la partie rectiligne de la courbe de décroissance du courant d'excitation jusqu'à l'axe des ordonnées (figure 15, page 90). La différence entre le courant fourni par l'oscillogramme et la composante transitoire du courant donne la composante subtransitoire ($\Delta i_f''$). Cette composante de courant est reportée séparément en coordonnées semi-logarithmiques de manière à obtenir sa valeur initiale $\Delta i_f''(0)$.

Si le graphique représentant la variation de $\Delta i_f''$ en fonction du temps est incurvé, l'amplitude initiale $\Delta i_f''(0)$ est déterminée en conformité avec la figure 10 de la Publication 34-4 de la CEI.

Note — Si certaines difficultés surgissent dans l'obtention des composantes à décroissance rapide du courant d'excitation, l'essai doit être répété avec une vitesse d'enregistrement plus élevée de la portion initiale de la courbe de décroissance du courant.

50 Détermination des grandeurs à partir de l'essai d'extinction du champ avec l'enroulement induit à circuit ouvert

À partir de l'essai avec mise en court-circuit de l'enroulement d'excitation, la constante de temps transitoire à circuit ouvert τ_{do} est déterminée de manière analogue à celle de l'article 59 de la Publication 34-4 de la CEI, comme étant le temps nécessaire pour que la tension d'induit décroisse jusqu'à $1/\varepsilon \approx 0,368$ fois sa valeur initiale.

Une constante de temps similaire τ_{doi} est obtenue à partir de l'essai d'extinction du champ avec une résistance de décharge en série avec l'enroulement d'excitation.

- 50.1 La constante de temps subtransitoire τ_{do}'' s'obtient à partir du diagramme de la composante subtransitoire du courant d'excitation $\Delta i_f''$ (voir article 49), comme étant le temps nécessaire pour que cette composante de courant décroisse jusqu'à $1/\varepsilon \approx 0,368$ fois sa valeur initiale. Une constante de temps similaire τ_{doi}'' est obtenue à partir d'un essai d'extinction du champ avec une résistance de décharge en série avec l'enroulement d'extinction.

48 **Determination of quantities from the voltage recovery test**

Direct-axis transient reactance (see Clause 7), direct-axis subtransient reactance (see IEC Publication 34-4, Clause 8) and direct-axis transient open-circuit time constant (see Clause 13) are determined in accordance with IEC Publication 34-4, Clause 43 and Sub-clauses 43.1 and 43.2

48.1 The direct-axis open-circuit subtransient time constant (see Clause 17) is determined from the voltage recovery test as the time required for the sub-transient voltage component $\Delta U''$ determined in accordance with Publication 34-4, Clause 42, to decrease to $1/\varepsilon \approx 0.368$ of its initial value

49 **Field extinguishing test with armature (primary) winding open-circuited**

The procedure for making this test is similar to that described in IEC Publication 34-4, Clause 58. Unlike the test described in IEC Publication 34-4, this test is performed when the machine is unsaturated, that is when the machine is excited to a voltage corresponding to the linear portion of the no-load saturation curve. This particular test with open-circuited armature (primary) winding is performed twice: first, short-circuiting the excitation winding and second, connecting it in series with a field discharge resistance, the value of which should be between $3R_f$ and $10R_f$.

Line-to-line armature (primary) winding voltage and excitation current are to be measured and recorded on an oscillograph. The armature voltage is plotted against time on a semi-logarithmic scale with the armature voltage on the logarithmic scale. If the residual voltage of the machine is above 0.03 of applied value, then the difference of the measured armature voltage and of the residual voltage is plotted. The excitation current, obtained from the oscillogram, is also plotted on paper in a semi-logarithmic scale in order to determine the initial transient value of the current $\Delta i'_f(0)$ in the excitation winding as the straight portion of the excitation current decay curve extrapolated to the ordinate axis (Figure 15, page 90). The difference between the current obtained from the oscillograph and the component of transient current gives the subtransient current ($\Delta i''_f$). This current component is plotted separately on a semi-logarithmic scale so as to obtain its initial value $\Delta i''_f(0)$.

If the diagram representing deviation $\Delta i''_f$ against time is incurred, the initial amplitude of $\Delta i''_f(0)$ is determined in accordance with Figure 10, IEC Publication 34-4.

Note — If some difficulties arise in obtaining fast-decaying excitation current components, then the test should be repeated with a higher recording speed of the initial portion of the decaying current.

50 **Determination of quantities from the field extinguishing test with armature (primary) winding open-circuited**

From the test with short-circuited excitation winding, the transient open-circuited time constant τ'_{d0} is determined in a similar way to that given in IEC Publication 34-4, Clause 59, as the time required for the armature (primary) winding voltage to decrease to $1/\varepsilon \approx 0.368$ of its initial value.

Similarly the time constant τ'_{d01} is obtained from the field extinguishing test with a discharge resistor connected in series with the excitation winding.

50.1 The subtransient time constant τ''_{d0} is obtained from the curve of the subtransient component of the excitation current $\Delta i''_f$ (see Clause 49), as the time required for this component current to decrease to $1/\varepsilon \approx 0.368$ of its initial value.

Similarly, the time constant τ''_{d01} is obtained from the field extinguishing test with a discharge resistor connected in series with the excitation winding.

50 2 En utilisant ces valeurs de constantes de temps, on peut calculer la constante de temps longitudinale à circuit ouvert de l'enroulement d'excitation (τ_{fdo}) et la constante de temps longitudinale à circuit ouvert du circuit amortisseur équivalent (τ_{kdo}) en utilisant les formules suivantes

$$\tau_{fdo} \approx \frac{1 + \alpha}{\alpha} \left| (\tau'_{do} - \tau'_{do1}) + (\tau''_{do} - \tau''_{do1}) \right|$$

$$\tau_{kdo} \approx (\tau'_{do1} + \tau''_{do1}) - \frac{1}{\alpha} \left| (\tau'_{do} - \tau'_{do1}) + (\tau''_{do} - \tau''_{do1}) \right|$$

$$= (\tau'_{do1} + \tau''_{do1}) - \frac{\tau_{fdo}}{1 + \alpha}$$

où: $\alpha = \frac{R_{d1}}{R_f} = \frac{\text{résistance de décharge en courant continu}}{\text{résistance en courant continu de l'enroulement d'excitation}}$

La résistance de l'enroulement d'excitation est celle qui correspond à la température de cet enroulement au cours de l'essai

Note — La constante de temps de l'enroulement amortisseur équivalent peut être obtenue avec une précision requise à partir de la formule:

$$\tau_{kdo} \cong \tau'_{do} - \tau_{fdo}$$

50 3 La constante de temps de l'enroulement d'excitation avec l'induit à circuit ouvert (τ_{fdo}) et la constante de temps du circuit amortisseur équivalent (τ_{kdo}) peuvent aussi être obtenues au moyen de l'essai d'extinction du champ avec l'enroulement d'excitation court-circuité

Dans ce cas, τ'_{do} et τ''_{do} sont obtenus comme à l'article 50. En examinant le rapport des composantes initiales du courant d'excitation $\Delta i'_f(0)$ et $\Delta i''_f(0)$ définies à l'article 49, on a alors

$$\tau_{fdo} = \frac{\tau'_{do} + \frac{\Delta i''_f(0)}{\Delta i'_f(0)} \tau_{do}}{1 + \frac{\Delta i''_f(0)}{\Delta i'_f(0)}} \quad \text{et} \quad \tau_{kdo} = \frac{\tau''_{do} + \frac{\Delta i'_f(0)}{\Delta i''_f(0)} \tau_{do}}{1 + \frac{\Delta i'_f(0)}{\Delta i''_f(0)}}$$

Si certaines difficultés surgissent dans l'exécution de l'essai avec la résistance de décharge égale à zéro, ce qui correspond à $\alpha = 0$, alors les constantes de temps τ_{fdo} et τ_{kdo} peuvent être obtenues à partir de l'essai d'extinction du champ avec une résistance en série avec l'enroulement d'excitation ($\alpha \neq 0$) par les formules:

$$\tau_{fdo} \approx \frac{\tau'_{do1} + \frac{\Delta i''_f(0)}{\Delta i'_f(0)} \tau''_{do1}}{1 + \frac{\Delta i''_f(0)}{\Delta i'_f(0)}} (1 + \alpha)$$

$$\tau_{kdo} \approx \frac{\tau''_{do1} + \frac{\Delta i'_f(0)}{\Delta i''_f(0)} \tau_{do1}}{1 + \frac{\Delta i'_f(0)}{\Delta i''_f(0)}}$$

50 4 La constante de temps longitudinale à circuit ouvert de l'enroulement amortisseur équivalent (τ_{kdo}) peut être déterminée directement à partir de l'essai décrit à l'article 49, mais en ouvrant brusquement l'enroulement d'excitation sans résistance de décharge au lieu de le court-circuiter. Dans ce cas, τ_{kdo} pourra être déterminé comme étant le temps nécessaire pour que la tension d'induit décroisse jusqu'à $1/e \approx 0,368$ fois sa valeur initiale

- 50.2 Using these test values of time constants, the direct-axis open-circuited excitation winding time constant (τ_{fd0}) and direct-axis open-circuit equivalent damper winding time constant (τ_{kdo}) are calculated

$$\begin{aligned}\tau_{fd0} &\approx \frac{1 + \alpha}{\alpha} \left[(\tau'_{do} - \tau'_{dor}) + (\tau''_{do} - \tau''_{dor}) \right] \\ \tau_{kdo} &\approx (\tau'_{dor} + \tau''_{dor}) - \frac{1}{\alpha} \left[(\tau'_{do} - \tau'_{dor}) + (\tau''_{do} - \tau''_{dor}) \right] \\ &= (\tau'_{dor} + \tau''_{dor}) - \frac{\tau_{fd0}}{1 + \alpha}\end{aligned}$$

where: $\alpha = \frac{R_{d1}}{R_f} = \frac{\text{discharge d.c. resistance}}{\text{excitation winding d.c. resistance}}$

Excitation winding resistance is that corresponding to the temperature of the winding during the test

Note — The equivalent damper winding time constant may be determined with reasonable accuracy from:

$$\tau_{kdo} \approx \tau'_{do} - \tau_{fd0}$$

- 50.3 The open-circuit excitation winding time constant (τ_{fd0}) and equivalent damper winding time constant (τ_{kdo}) may also be obtained from the field extinguishing test with the excitation winding short-circuited

In this case, τ'_{do} and τ''_{do} are obtained as in Clause 50. Using the ratio of the initial excitation current components $\Delta i'_f(0)$ and $\Delta i''_f(0)$ as determined in Clause 49, then:

$$\tau_{fd0} = \frac{\tau'_{do} + \frac{\Delta i''_f(0)}{\Delta i'_f(0)} \tau''_{do}}{1 + \frac{\Delta i''_f(0)}{\Delta i'_f(0)}} \quad \text{and} \quad \tau_{kdo} = \frac{\tau''_{do} + \frac{\Delta i'_f(0)}{\Delta i''_f(0)} \tau'_{do}}{1 + \frac{\Delta i'_f(0)}{\Delta i''_f(0)}}$$

If some difficulties arise in conducting the test with a discharge resistance equal to zero, that is when $\alpha = 0$, then for a test with $\alpha \neq 0$ the required time constants τ_{fd0} and τ_{kdo} may be obtained from the field extinguishing test with resistance in series with field winding:

$$\begin{aligned}\tau_{fd0} &\approx \frac{\tau'_{dor} + \frac{\Delta i''_f(0)}{\Delta i'_f(0)} \tau''_{dor}}{1 + \frac{\Delta i''_f(0)}{\Delta i'_f(0)}} (1 + \alpha) \\ \tau_{kdo} &\approx \frac{\tau''_{dor} + \frac{\Delta i'_f(0)}{\Delta i''_f(0)} \tau'_{dor}}{1 + \frac{\Delta i'_f(0)}{\Delta i''_f(0)}}\end{aligned}$$

- 50.4 The direct-axis open-circuit equivalent damper winding time constant (τ_{kdo}) may be determined directly from the test described in Clause 49, performing the test by opening the excitation winding circuit without discharge resistance. In this case, τ_{kdo} will be determined as the time required for the armature winding voltage to decrease to $1/e \approx 0.368$ of its initial value

Cet essai peut être effectué de façon usuelle pour les machines à rotor massif ou pour les machines à enroulement amortisseur fort lorsque la tension induite dans l'enroulement d'excitation pendant la décroissance du champ est suffisamment basse pour éviter l'endommagement éventuel de l'isolation de l'enroulement

51 Essai d'extinction du champ avec l'enroulement induit en court-circuit

La manière de procéder à cet essai est analogue à celle décrite à l'article 63 de la Publication 34-4 de la CEI. Cet essai particulier avec l'enroulement induit en court-circuit est exécuté deux fois: d'abord en court-circuitant l'enroulement d'excitation, puis en utilisant une résistance de décharge dont la valeur doit être de $3R_f$ à $10R_f$ en série avec l'enroulement d'excitation. Le courant dans une phase de l'induit et le courant d'excitation sont enregistrés à l'oscillographe.

Le courant d'induit est reporté en fonction du temps en coordonnées semi-logarithmiques, avec le courant sur l'échelle logarithmique.

Le courant d'excitation obtenu à partir de l'oscillogramme est également reporté en fonction du temps en coordonnées semi-logarithmiques. La partie rectiligne de la courbe de décroissance du courant d'excitation ($\Delta i_f'$) est extrapolée jusqu'à l'axe des ordonnées. La différence ($\Delta i_f''$) entre le courant fourni par l'oscillogramme et la partie rectiligne prolongée de la composante transitoire du courant est également reportée en coordonnées semi-logarithmiques de manière à obtenir sa valeur initiale.

52 Détermination des grandeurs à partir de l'essai d'extinction du champ avec l'enroulement induit en court-circuit

La constante de temps longitudinale de l'enroulement d'excitation avec l'enroulement induit en court-circuit τ_{fd} et la constante de temps de l'amortisseur τ_{kd} sont calculées de manière analogue à celle de l'article 50. Dans ce cas, les indices zéro doivent être supprimés.

52.1 Les constantes de temps de l'enroulement d'excitation et de l'amortisseur avec l'enroulement induit en court-circuit peuvent être obtenues à partir d'un essai d'extinction du champ avec l'enroulement d'excitation mis en court-circuit. Dans ce cas, τ_d' et τ_d'' sont obtenus comme à l'article 50. Ensuite, connaissant le rapport des valeurs initiales de $\Delta i_f''(0)$ et de $\Delta i_f'(0)$ (voir article 51), les constantes de temps cherchées sont calculées de la même manière qu'à l'article 50. Dans ce cas, les indices zéro doivent être supprimés.

52.2 La constante de temps longitudinale en court-circuit de l'enroulement amortisseur équivalent (τ_{kd}) peut être déterminée directement à partir de l'essai décrit à l'article 51, mais en ouvrant brusquement l'enroulement d'excitation sans résistance de décharge au lieu de le court-circuiter. La valeur de τ_{kd} sera alors obtenue comme étant le temps nécessaire pour que le courant d'induit décroisse jusqu'à $1/e \approx 0,368$ fois sa valeur initiale.

Les conditions à respecter pour éviter l'endommagement de l'isolement d'excitation sont similaires à celles spécifiées au paragraphe 50.4.

53 Essai de fonctionnement en asynchrone en charge

L'essai de fonctionnement en asynchrone en charge peut être fait sur la machine essayée tournant en génératrice ou en moteur et reliée à un réseau à tension et à fréquence nominales. Au début de l'essai la machine tourne en synchronisme (à la vitesse nominale) et est excitée; ensuite l'excitation est brusquement supprimée et pendant la période suivante de l'essai l'enroulement d'excitation est soit a) court-circuité, soit b) fermé sur une résistance de décharge, soit c) ouvert, pour permettre d'obtenir ces caractéristiques pour tous les états de l'enroulement d'excitation.

Des précautions nécessaires devront être prises pour ne pas dépasser le couple maximal asynchrone, ni faire induire dans l'enroulement inducteur des tensions dangereuses.

This test may usually be performed on solid rotor machines or machines with good damper windings, when the induced voltage in the excitation winding during field decay is low enough to avoid damage to the winding insulation

51 Field extinguishing test with armature (primary) winding short-circuited

The procedure for making this test is similar to that described in IEC Publication 34-4, Clause 63. This particular test with the armature (primary) winding short-circuited is conducted twice: first, short-circuiting the excitation winding and second, using a field discharge resistor with a value of between $3R_f$ and $10R_f$ in series with the excitation winding. Armature current in one phase and excitation current are recorded on an oscillograph.

Armature current is plotted against time on a semi-logarithmic paper with the current on a logarithmic scale.

The excitation current, obtained from the oscillogram, is also plotted on a semi-logarithmic paper against time with the current on a logarithmic scale. The straight portion of the excitation current decay curve ($\Delta i_f'$) is extrapolated to the ordinate axis. The difference ($\Delta i_f''$) between current taken from the oscillogram and the extended rectilinear portion of the transient current component is also plotted on a semi-logarithmic scale and its initial value is obtained.

52 Determination of quantities from the field extinguishing test with armature (primary) winding short-circuited

The direct-axis time constant of the excitation winding with short-circuited armature τ_{fd} and the damper winding time constant τ_{kd} are calculated in a similar way to that shown in Clause 50. In this case, zero indices should be deleted.

52.1 The excitation winding and the damper winding time constants with armature winding short-circuited may also be obtained from the field extinguishing test with excitation winding short-circuited. In this case τ_a' and τ_a'' are obtained as in Clause 50. Then, knowing the ratio of the initial $\Delta i_f''(0)$ and $\Delta i_f'(0)$ values (see Clause 51), the required time constants are calculated in accordance with Clause 50. In this case, zero indices should be deleted.

52.2 The direct-axis short-circuit equivalent damper winding time constant (τ_{kd}) may be determined directly from the test described in Clause 51, performing it by opening the excitation winding circuit without discharge resistance. In this case, τ_{kd} will be determined as the time required for the armature winding current to decrease to $1/e \approx 0.368$ of its initial value.

Conditions of test to prevent possible damage to the excitation winding insulation are similar to those stated in Sub-clause 50.4.

53 Asynchronous operation on-load test

The asynchronous operation on-load test may be done with the machine under test working as a generator or motor connected to a rated frequency and voltage supply. At the beginning of the test the machine is running synchronously (at a rated speed) and is excited; then the excitation is suddenly removed and the excitation winding during the test is either *a*) short-circuited, *b*) closed through a discharge resistance or *c*) opened, so that characteristics for these three conditions of excitation winding may be obtained.

Necessary precautions should be taken in order neither to exceed the maximum asynchronous torque nor to induce dangerous voltages in the excitation windings.

En procédant à cet essai sur les grosses machines, il faut d'abord vérifier par le calcul la chute de la tension en ligne et prendre des mesures en vue d'éviter la déconnexion de la machine essayée d'avec des machines fonctionnant en parallèle avec elle au cours de l'essai

L'essai doit être effectué à des charges différentes (trois à cinq), en commençant par la charge la plus faible, comprises entre 0,1 et 1,0 environ ou plus de la valeur nominale. Quand les courants d'induit commencent à dépasser la valeur nominale, des précautions doivent être prises pour que l'essai soit exécuté en un temps admissible pour le fonctionnement avec de telles valeurs du courant.

En passant d'une charge à l'autre, il faut rétablir l'excitation, si la durée de l'essai est supérieure à trois à cinq minutes. La tension entre deux phases, le courant en ligne, la puissance active et réactive, la tension ou le courant dans l'enroulement d'excitation, suivant le cas, sont mesurés et enregistrés. Il est recommandé, en complément, d'enregistrer le signal de positionnement de l'aube dans la position de l'axe transversal.

Les durées d'une pleine oscillation des courants (et des tensions) d'induit et d'excitation sont également déterminées. La durée du fonctionnement en asynchrone à chaque valeur de la charge doit être suffisamment longue pour permettre d'effectuer des mesures ou des enregistrements nécessaires dans les conditions spécifiées de charge, mais ne doit pas dépasser le temps autorisé quand le courant d'induit est supérieur à sa valeur nominale.

Pour chaque état de l'enroulement d'excitation (en court-circuit, fermé par l'intermédiaire d'une résistance de décharge, ouvert) les valeurs moyennes de la puissance, du courant et de la tension mesurées au cours de l'essai sont reportées sur une courbe en fonction du glissement. Le glissement moyen est déterminé en valeurs réduites comme étant:

$$s = \frac{1}{Tf}$$

où: T = durée d'une période des oscillations de la tension d'excitation induite ou du courant d'excitation induit, ou durée de deux périodes des oscillations du courant d'induit

f = fréquence nominale

54 Détermination des caractéristiques de réponse en fréquence et des grandeurs à partir de l'essai de fonctionnement en asynchrone en charge

Les valeurs moyennes des impédances, des résistances et des réactances sont déterminées pour chaque glissement comme étant:

$$\begin{aligned} Z(s) &= \frac{U_{av}}{\sqrt{3} I_{av}} \Omega, & \left[z(s) = \frac{u_{av}}{i_{av}} \right] \\ R(s) &= \frac{P_{av}}{\sqrt{3} I_{av}^2} \Omega; & \left[r(s) = \frac{p_{av}}{i_{av}^2} \right] \\ X(s) &= \sqrt{Z^2(s) - R^2(s)} \Omega, & \left[x(s) = \sqrt{z^2(s) - r^2(s)} \right] \end{aligned}$$

Les valeurs efficaces de la tension entre deux phases (U_{av}) pendant une période d'oscillation, les valeurs moyennes quadratiques du courant (I_{av}) et la valeur moyenne de la puissance (P_{av}) pour la même période doivent être calculées à partir des valeurs mesurées ou des oscillogrammes.

Les valeurs obtenues sont ensuite reportées en fonction du glissement en vue d'obtenir la caractéristique de réponse en fréquence aux basses fréquences (voir article 24).

- 54.1 La caractéristique du couple en fonction du glissement peut être obtenue à partir du même essai. La puissance et le courant sont alors ramenés approximativement à la tension nominale en multipliant la puissance mesurée par $\left(\frac{U_n}{U}\right)^2$ et le courant mesuré par $\frac{U_n}{U}$ où U_n et U désignent

In performing tests with large machines, the expected line voltage drops and reactive power supply shall be initially checked by calculation and measures taken to prevent disconnection of the machine under test and machines working in parallel with it during the test

The test should be performed at about three to five different loads, beginning with the lowest, equal to about 0.1 up to 1.0 or higher than the rated value. When armature (primary) winding currents begin to exceed rated value, care must be taken to conduct the test within allowed time of operation for such current values

In changing from one load value to another, excitation should be readjusted if the duration of the test is greater than three to five minutes. Line-to-line voltage, line current, active and reactive power and excitation winding voltage or current (as the case may be) are measured and recorded. In addition, it is recommended to record the shaft positioning signal referred to the d- or q-axis

The times required for a single full swing of the armature and excitation current (voltage) are also determined. The duration of asynchronous operation at each load shall be sufficiently long to make the required measurements or recordings under specified conditions of loading, but shall not exceed the time allowed for armature overcurrent operation

For each state of excitation winding (short-circuited, closed through discharge resistance, open) average values of measured power, current and voltage during the test are plotted, against slip. Average slip is determined in per unit values as:

$$s = \frac{1}{Tf}$$

where: T = periodic time of induced excitation voltage or current swings or two periodic times of armature current swings
 f = line frequency

54 **Determination of frequency response characteristics and quantities from the asynchronous operation on-load test**

Average values of impedance, resistance and reactance are determined for each slip as:

$$\begin{aligned} Z(s) &= \frac{U_{av}}{\sqrt{3} I_{av}} \Omega, & \left[z(s) = \frac{u_{av}}{i_{av}} \right] \\ R(s) &= \frac{P_{av}}{\sqrt{3} I_{av}^2} \Omega, & \left[r(s) = \frac{p_{av}}{i_{av}^2} \right] \\ X(s) &= \sqrt{Z^2(s) - R^2(s)} \Omega, & \left[x(s) = \sqrt{z^2(s) - r^2(s)} \right] \end{aligned}$$

Average r m s values of line-to-line voltage (U_{av}) during the period of swinging, average r m s values of current (I_{av}) and average value of power (P_{av}) for the same cycle shall be calculated from the measured values or from the oscillograms

Then the values obtained are plotted against slip to obtain the frequency response characteristics at low frequencies (see Clause 24)

54.1 From the same test, the torque slip characteristic may be obtained. In this case, power and current are referred approximately to rated voltage by multiplying measured power by $\left(\frac{U_n}{U}\right)^2$ and measured current by $\frac{U_n}{U}$ where U_n is the rated voltage and U the measured voltage. Then, subtracting the

respectivement la tension nominale et la tension mesurée. En retranchant ensuite les pertes correspondantes dans l'induit de la puissance active ainsi obtenue, on détermine la valeur de P_a , $P_a = P - (\Delta P_{fe} + \Delta P_{cu})$. P_a est proportionnel au couple et son rapport à la puissance apparente nominale donne la valeur du couple en valeur réduite.

En reportant sur le diagramme cette valeur du couple en valeur réduite en fonction du glissement, on obtient la caractéristique cherchée.

55 Essai de fonctionnement en asynchrone à basse tension

Cet essai est effectué en appliquant à la machine essayée une tension symétrique réduite (0,01 à 0,2 U_n) à fréquence nominale fournie par une source extérieure.

L'enroulement d'excitation est mis en court-circuit. Si la tension résiduelle de la machine dépasse 0,3 fois la tension appliquée, le rotor doit être démagnétisé avant d'essayer la machine. Une tension entre deux phases, un courant en ligne et la puissance absorbée sont mesurés et enregistrés pendant l'essai. En procédant aux calculs, on considère les valeurs moyennes de ces grandeurs pendant la période d'oscillation pleine.

La vitesse de rotation de la machine est modifiée par échelons; à chaque échelon de vitesse, la tension est appliquée à l'induit pendant le temps nécessaire pour procéder aux lectures et enregistrements. Dans le domaine des petits glissements (au-dessous de 0,05), il devient difficile de maintenir constante la vitesse de rotation avec la précision voulue. Dans ce cas, l'essai avec enregistrement oscillographique peut être conduit avec une faible décélération (pas plus de 0,04 fois la vitesse nominale par seconde pour les petites machines, pour de grosses machines elle devra être plus faible à cause des caractéristiques inhérentes de la machine).

Les valeurs moyennes de la puissance et du courant correspondant à la période d'oscillation sont tracées en fonction du glissement (voir figure 16, page 91).

56 Détermination des caractéristiques de réponse en fréquence et des grandeurs à partir de l'essai de fonctionnement en asynchrone à basse tension

Les impédances, les résistances et les réactances pour chaque échelon de vitesse (glissement) sont calculées en utilisant les formules suivantes:

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

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

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

Les valeurs obtenues sont ensuite reportées en fonction du glissement en vue d'obtenir la caractéristique de réponse en fréquence aux basses fréquences (voir article 24).

Notes 1 — En raison de la faible tension appliquée, les pertes dans le circuit magnétique sont négligées et les réactances obtenues sont non saturées.

2 — Les réactances obtenues correspondent approximativement à la demi-somme non saturée des réactances subtransitoires à l'arrêt et à la demi-somme des réactances synchrones au glissement nul.

Les valeurs de l'impédance moyenne pour chaque glissement sont reportées à la figure 17, page 91. Il est utile d'avoir sur le même diagramme les valeurs du facteur de puissance en fonction du glissement.

corresponding armature losses from the active power so obtained, the value of P_a is determined: $P_a = P - (\Delta P_{fe} + \Delta P_{cu})$ P_a is proportional to torque and its ratio to apparent power gives torque in per unit value

Plotting this per unit torque value against slip, the required characteristic is obtained

55 Asynchronous operation during the low-voltage test

The test is performed with a reduced symmetrical voltage (0.01 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 (primary) winding for a time necessary to take instrument readings and make records. In the range of small slips (below 0.05) it becomes difficult to maintain constant speed of rotation within the required precision. In this case, the test with oscillographic recording may be performed with slow retardation (not more than 0.04 times the rated speed per second for small machines; for large machines it will be much smaller due to inherent characteristics of the set)

Average values for the swing period of power and current are plotted against slip (see Figure 16, page 91)

56 Determination of the frequency response characteristics and quantities from the asynchronous low-voltage operation test

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

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

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

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

Then the values obtained are plotted against slip to obtain the frequency response characteristics at low frequencies (see Clause 24)

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

2 — The reactances obtained correspond approximately to the unsaturated half sum of subtransient reactances at standstill and to the half sum of synchronous reactances at zero slip

Values of average impedance for each slip are plotted in Figure 17, page 91. It is helpful to have plotted on the same diagram values of power factor against slip

57 **Essai d'application à l'arrêt d'une tension de fréquence variable**

Pour exécuter cet essai, une tension d'essai de fréquence variable est appliquée entre deux bornes de ligne de l'enroulement induit. La machine est à l'arrêt. L'essai peut être effectué avec l'enroulement d'excitation à circuit ouvert.

L'enroulement d'excitation est mis en court-circuit. La troisième borne de l'induit peut être laissée ouverte ou reliée comme sur la figure 18, page 92, où les connexions essentielles sont représentées.

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

Aux fréquences d'environ 5 Hz et au-dessous, on peut utiliser pour la fourniture du courant un groupe moteur-générateur à courant continu à excitation séparée, soit directement par un générateur électronique à basse fréquence, soit par l'intermédiaire de petits amplificateurs statifs excités par un générateur à basse fréquence.

La tension d'alimentation, le courant d'induit et leur déphasage mutuel sont mesurés et enregistrés à l'oscillographe (figure 19, page 92). Un shunt ordinaire à courant continu peut être utilisé pour la mesure du courant dans l'induit. Le courant dans l'enroulement d'excitation est enregistré seulement dans le but d'évaluer la position du rotor. Le déphasage peut être aussi mesuré par toute autre méthode assurant une bonne précision. Certaines précautions doivent être prises pour l'exécution de l'essai. Celui-ci peut être effectué soit avec des courants relativement élevés (0,3 à 0,5 fois le courant nominal de l'induit), soit avec de faibles courants dans l'induit (0,05 à 0,1 fois la valeur nominale) et un flux magnétique supplémentaire produit par un courant continu dans le même induit superposé au courant de faible fréquence de telle sorte que la crête du courant alternatif soit, à toutes les fréquences, presque égale à la valeur du courant continu, tout en lui restant légèrement inférieure.

Aux fréquences de 5 Hz et au-dessous, la différence entre les impédances et les résistances devient faible et le déphasage entre la tension et le courant diminue, ce qui introduit des erreurs supplémentaires dans la mesure de cet angle sur l'oscillogramme.

Les erreurs peuvent être réduites de façon considérable si l'on compense l'effet des résistances du circuit de l'induit pendant l'essai. Pour ce faire, la chute de tension dans la résistance de l'induit est compensée au moyen d'un amplificateur sommateur employé de façon usuelle dans les calculateurs analogiques et d'une résistance auxiliaire nécessaire pour rendre stable le fonctionnement du générateur à courant continu. Pendant l'essai la température de la résistance auxiliaire doit être stable.

La chute de tension dans le shunt et dans la résistance auxiliaire, proportionnelle au courant à mesure, est soustraite de la tension aux bornes de l'induit par l'intermédiaire de l'amplificateur. En modifiant la résistance à l'entrée de l'amplificateur, on peut régler sa tension de sortie jusqu'à zéro, alors que le courant continu circule dans l'induit, ce qui a pour effet de compenser la résistance de l'induit. Pour réduire l'erreur due à l'échauffement de l'enroulement pendant la durée de l'essai, l'aptitude à la compensation doit être vérifiée plusieurs fois avec du courant continu dans l'induit, en réglant chaque fois à zéro la tension de sortie de l'amplificateur.

58 **Détermination des caractéristiques de réponse en fréquence et des grandeurs à partir de l'essai d'application à l'arrêt d'une tension de fréquence variable**

Les grandeurs correspondant à chaque fréquence sont obtenues séparément pour chacun des deux axes longitudinal et transversal. Les formules sont les mêmes pour les deux axes d et q , de sorte que l'explication qui suit démontre les calculs pour un seul axe. Ayant obtenu U et I pour la fréquence particulière et leur déphasage d'après l'oscillogramme, l'impédance du circuit à l'arrêt est déterminée par la formule:

57 **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 (primary) winding. The machine is at standstill. The test may be performed with the excitation winding open-circuited.

The excitation winding is short-circuited. The third terminal of the armature (primary) winding may remain open or connected as shown on Figure 18, page 92, where principal connections are shown.

During the test, the motor 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).

At frequencies about 5 Hz and below, a d.c. motor generator set may be used, separately excited directly from a low frequency electronic generator or through a small rotating amplifier excited by low frequency generator.

Supply voltage, armature (primary) winding current and phase angle between them are measured and recorded by an oscillograph (Figure 19, page 92). An ordinary d.c. shunt may be used for recording armature current. Excitation winding current is recorded only for the purpose of the motor position evaluation. The phase angle may also be measured by some other method with adequate precision. Certain precautions must be taken during the test. It may be performed either at comparatively high currents (0.3 to 0.5 of the rated armature value) or at small armature currents (0.05 to 0.1 of the rated value) and additional magnetic flux produced by d.c. current in the same armature (primary) winding superimposed on low frequency current in such a way that the peak value of a.c. current is below the value of direct current. At all frequencies, the values of alternating and direct currents should be about the same.

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

The inaccuracies may be considerably reduced if the armature circuit resistance is compensated during the test. To do so, the voltage drop in the armature resistance is compensated using a summing amplifier, usually employed in analogue computers, and an auxiliary resistance, required for stable operation of d.c. generator. During the test, its temperature should be stable.

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

58 **Determination of the frequency response characteristics and quantities from the applied variable frequency voltage test at standstill**

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

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

où: Z_{stat} = impédance à l'état stationnaire de la machine, déterminée pour chaque fréquence de la tension appliquée suivant les axes q et d

U = tension appliquée à s fois la fréquence nominale, en volts

I = courant mesuré, en ampères

K_{con} = facteur dépendant du mode de connexion de l'enroulement induit Si la tension est appliquée à deux bornes avec la troisième ouverte, $K_{con} = 1/2$ Si deux phases sont montées en parallèle entre elles et en série avec la troisième, $K_{con} = 2/3$

Dans la machine alimentée à fréquence nominale et tournant au glissement s , l'impédance est déterminée en utilisant la formule suivante:

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

où: $Z_{stat}(js)$ = comme ci-dessus;

R_{1s} = résistance en courant alternatif de l'induit à la fréquence de la tension appliquée Elle peut être déterminée par un essai avec rotor enlevé à la fréquence qui correspond à s , ou être calculée par la formule:

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

Pour les glissements de 0,25 et au-dessous, $R_{1s} \approx R_a$ avec une erreur inférieure à 5% (Pour R_a et R_1 , voir les articles 15 et 16 de la Publication 34-4 de la CEI)

Les admittances de la machine peuvent être déterminées comme les inverses des impédances $Z(js)$:

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

En utilisant le déphasage φ entre la tension et le courant, obtenu d'après l'oscillogramme ou à l'aide de tout dispositif approprié, les valeurs des réactances et des impédances rapportées à une machine tournant avec un certain glissement peuvent être calculées, de la manière suivante:

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

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

Cet essai fournit des valeurs non saturées des grandeurs

- 58 1 Les caractéristiques de réponse en fréquence de la machine sont représentées par les courbes des grandeurs obtenues en fonction du glissement pour chacun des axes
- 58 2 Les grandeurs des machines synchrones (réactances, résistances et constantes de temps) peuvent être obtenues en se servant des caractéristiques de réponse en fréquence Les réactances et les résistances au glissement égal à l'unité sont approximativement égales aux valeurs subtransitoires Les réactances et les résistances extrapolées au glissement nul représentent les valeurs synchrones

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

where: Z_{stat} = stationary impedance of the machine determined for each frequency of applied voltage along the q- and d-axes

U = applied voltage in volts at slip s

I = measured current, in amperes

K_{con} = 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:

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

where: $Z_{\text{stat}}(js)$ = as above

R_{1s} = a.c. armature (primary) 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

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

For slips of 0.25 and less, $R_{1s} \approx R_a$, with an error within 5% (For R_a and R_1 , see IEC Publication 34-4, Clauses 15 and 16)

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

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

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

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

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

Unsaturated quantities are obtained from this test

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

58.2 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 subtransient values. Reactances and resistances extrapolated to zero slip represent synchronous values

59 Essai de décroissance d'un courant continu dans l'enroulement induit à l'arrêt

L'essai de décroissance d'un courant continu dans l'induit est exécuté à l'arrêt. Une tension continue est appliquée à l'enroulement induit (entre deux bornes avec la troisième libre, ou deux phases en parallèle entre elles en série avec la troisième), par l'intermédiaire d'une résistance (figure 20, page 93). Lorsqu'on ferme le contacteur K , l'enroulement est mis en court-circuit et le courant qui y circulait décroît. Le processus entier de décroissance du courant est enregistré.

La résistance du contacteur K doit être notablement plus faible que la résistance de l'induit. La résistance mise en série avec la source de tension doit être choisie de façon que la fermeture du contacteur n'affecte pas notablement la valeur du courant débité par la source (le courant ne doit pas varier de plus de quelques pour-cent de sa valeur).

L'essai est effectué avec le rotor orienté d'abord selon l'axe longitudinal, puis selon l'axe transversal (voir article 57) après une magnétisation préalable du circuit magnétique de la machine, obtenue en faisant passer à travers l'induit un courant continu suffisant pour produire la saturation. Une démagnétisation graduelle est ensuite entreprise en descendant jusqu'à la valeur du courant d'essai, et la source est mise en court-circuit ou hors circuit après la fermeture du contacteur K .

Pour améliorer la précision de l'essai, l'enregistrement de la décroissance du courant est effectué en trois temps (l'essai peut être exécuté en une seule fois en utilisant trois oscillographes):

- 1) La portion initiale de la courbe de décroissance est enregistrée à une vitesse d'environ 10 m/s;
- 2) La portion initiale et la portion moyenne de la courbe sont enregistrées à une vitesse d'environ 1 m/s,
- 3) L'ensemble de la courbe décroissante, s'étendant sur 10 s environ, est enregistré à une vitesse d'environ 0,1 m/s.

Pour l'enregistrement de la courbe de décroissance, l'échelle de l'enregistreur est changé automatiquement à deux reprises, à chacune d'elles de cinq fois la valeur de l'échelle précédente, grâce à un relais de temps shuntant les résistances existant dans le circuit de l'enregistreur.

Il est recommandé d'utiliser deux types d'enregistreurs oscillographiques. Pour enregistrer la portion initiale de la courbe, il est préférable d'employer un enregistreur ayant une fréquence propre de résonance élevée ($f_0 \approx 5\,000$ Hz). Pour enregistrer les portions moyenne et finale de la courbe, on utilise des enregistreurs ayant une grande sensibilité au courant. Pour assurer une déviation suffisante des enregistreurs, on utilise des shunts de mesure ayant une résistance élevée.

Lorsque l'essai est effectué avec le rotor orienté suivant l'axe longitudinal, l'enroulement d'excitation est mis en court-circuit, et le courant qui le parcourt est aussi enregistré par le même oscillographe. Lorsque l'essai est fait avec le rotor orienté suivant l'axe transversal, l'enroulement d'excitation est à circuit ouvert, et la tension qui y est induite est également enregistrée par le même oscillographe.

Après l'essai, un tarage des enregistreurs est effectué de manière à déterminer les échelles pour chacun des enregistreurs et pour chacun des échelons des circuits d'induit et d'excitation. La résistance en courant continu du circuit d'excitation et celle de l'enroulement d'excitation proprement dit sont mesurées.

Aucune résistance additionnelle effective ne doit exister dans le circuit d'excitation.

Cette valeur du courant décroissant dans l'enroulement d'induit est considérée comme étant le rapport du courant à un instant quelconque $I(t)$ au courant initial $I(0)$.

Le courant décroissant induit dans l'enroulement d'excitation est considéré de façon analogue comme étant le rapport du courant décroissant induit au courant initial. Ces valeurs des courants décroissants sont reportées en fonction du temps en coordonnées logarithmiques.

Les valeurs initiales transitoires et subtransitoires et leurs constantes de temps sont obtenues à partir d'un diagramme en coordonnées semi-logarithmiques des courants décroissants. Pour ce faire, on trace et on prolonge vers l'origine une droite joignant deux points de la courbe dans sa partie la plus éloignée (figure 21a, page 93). L'intersection de cette droite avec l'axe des ordonnées donne l'amplitude initiale de la première exponentielle (i_{10}). Sa constante de temps (τ_1) est la plus élevée et sa valeur est égale au temps nécessaire pour que i_{10} décroisse jusqu'à $1/e \approx 0,368$ fois sa valeur initiale.

59 D C decay in the armature (primary) winding at standstill test

The d c decay in the armature (primary) winding test is performed at standstill D C voltage is applied to the armature (primary) winding (two terminals with the third one open, or two phases in parallel with the third in series with them) through a resistance (Figure 20, page 93) When contactor K is closed, the winding is short-circuited and the current in the armature (primary) winding decays The whole process of current decay is recorded

The resistance of contactor K must be appreciably lower than the armature (primary) winding resistance The resistance connected in series with the voltage source must 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 (see Clause 57), after preliminary magnetization of the machine magnetic system by passing through the armature (primary) winding, a d c current 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

To improve the accuracy of the test, recording of the decay current is carried out in three steps (the test may be carried out once, using three oscillographs):

- 1) The initial portion of the decay curve is recorded at a speed of about 10 m/s;
- 2) The initial portion and the middle portion of the curve is recorded at a speed of about 1 m/s,
- 3) The whole decay curve, during about 10 s, is registered at a speed of about 0.1 m/s

In registering the decay currents, the recorder scale is automatically changed twice, each time to about five times the preceding scale value, using a time-relay to shunt the existing resistances in the recorder circuit

It is recommended to use two types of oscillographic recorders To register the initial portion of the curve, a high self-resonant-frequency recorder should be used ($f_0 \approx 5\,000$ Hz) To register the middle and end portions of the decay curve, recorders with high current sensitivity are used To provide wide enough deflection of the recorder, use is made of current measuring shunts having a high resistance

In making the test with the rotor position along the d-axis, the excitation winding is short-circuited and the current in it is also recorded by the same oscillograph In making the test with the rotor in the q-axis position, the excitation winding is open-circuited and the induced voltage in it is also recorded by the same oscillograph

After the test, the recorders are calibrated and the scale values of the oscillographs are obtained for each recorder and for each scale value of the armature and excitation winding circuits The d c resistance of the excitation winding circuit and the excitation winding itself are measured

There should be no effective additional resistance in the excitation winding circuit

The value of the decay current in the armature (primary) winding is considered as the ratio of the current at any instant $I(t)$ and the initial current $I(0)$

Similarly, the decay induced current in the excitation winding is considered as the ratio of decaying induced current and the initial induced current These values of decaying currents are plotted against time

From a semi-logarithmic plot of the decay currents, transient and sub-transient initial values and their time constants are found To do so, a straight line is drawn through the points of extremity (Figure 21a, page 93) Intersection of this straight line with the ordinate axis gives the initial amplitude of the first exponential (i_{10}) Its time constant (τ_1) is the highest and is found as the time necessary for i_{10} to decrease to $1/e \approx 0.368$ of its initial value

La différence entre la courbe initiale et la première exponentielle est reportée de nouveau en échelle semi-logarithmique, ce qui permet de déterminer l'amplitude initiale (i_{20}) et la constante de temps (τ_2) de la deuxième exponentielle (figure 21b, page 93)

L'analyse de la courbe se poursuit de cette manière jusqu'au moment où aucune courbe n'est plus décelable

L'analyse du courant décroissant dans l'induit et celle du courant induit dans l'enroulement d'excitation à partir du même essai doivent être faites simultanément en conservant à l'esprit l'égalité des couples de constantes de temps τ_k et τ_{kf} pour le rotor massif. En procédant ainsi, on obtient une plus grande exactitude des courbes de réponse en fréquence. Lors de l'analyse de la courbe expérimentale de décroissance du courant dans l'induit, il est recommandé de tracer une somme d'exponentielles aussi voisine que possible de la courbe expérimentale, de manière à avoir :

$$\sum_k \frac{i_{k0}}{\tau_k} = \frac{1}{\tau(0)}$$

où: $\tau(0)$ = constante équivalente de temps de la courbe expérimentale du courant décroissant dans l'induit à l'instant initial (voir figure 21a, page 93)

Cette constante de temps $\tau(0)$ est obtenue en reportant la partie initiale de la courbe de décroissance du courant en coordonnées semi-logarithmiques et en traçant la tangente à cette courbe à l'instant zéro (figure 21a). La constante de temps initiale $\tau(0)$ est trouvée le long de cette tangente comme le temps nécessaire pour que le courant décroisse de sa valeur initiale à $1/e \approx 0,368$ fois cette valeur.

Si la condition ci-dessus n'est pas remplie, l'exactitude de l'obtention des grandeurs subtransitoires peut être fortement réduite. Une précision plus grande d'exponentielles peut être obtenue en utilisant des calculateurs numériques.

60 Détermination des caractéristiques de réponse en fréquence et des grandeurs à partir de l'essai de décroissance d'un courant continu dans l'induit

Les caractéristiques de réponse en fréquence $\frac{1}{x(js)}$ et $G(js)$ peuvent être représentées comme suit:

$$\frac{1}{x(js)} = \frac{1}{r} \left[\frac{1}{\int_0^{\infty} i(t) e^{-jst} dt} - js \right] = - \frac{1}{r} \frac{\int_0^{\infty} \left[\frac{d}{dt} i(t) \right] e^{-jst} dt}{\int_0^{\infty} i(t) e^{-jst} dt}$$

$$G(js) = \frac{\int_0^{\infty} i_t(t) e^{-jst} dt}{i_0 \left[1 - js \int_0^{\infty} i(t) e^{-jst} dt \right]}$$

où: $i(t)$ = rapport du courant d'essai dans l'induit (ou de la différence entre la courbe d'essai et la valeur en régime établi) à la valeur initiale de ce courant

$i_t(t)$ = courant décroissant dans l'enroulement d'excitation en valeur réduite

i_0 = valeur initiale du courant d'induit suivant l'axe d ou q en valeur réduite

r = résistance d'une phase de l'induit en valeur réduite:

$$r = r_a + K_{con} \Delta r$$

où: r_a = résistance en courant continu de l'induit en valeur réduite

Δr = résistance additionnelle extérieure de l'induit en valeur réduite

K_{con} = facteur tenant compte du mode de connexion de l'induit (voir article 58)

The difference between the initial curve and the first exponential is again plotted on a semi-logarithmic graph and the amplitude (i_{20}) and the time constant of the second exponential (τ_2) are determined (Figure 21b, page 93)

Analysis of the curve continues in the manner until that point where non-linearity of the decaying curve cannot be observed

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

$$\sum_k \frac{i_{ko}}{\tau_k} = \frac{1}{\tau(0)}$$

where: $\tau(0)$ = equivalent time constant of the decaying armature current curve at the initial moment (see Figure 21a, page 93)

This time constant $\tau(0)$ is obtained from a plot of the initial portion of the current decay curve on a semi-logarithmic graph by drawing the tangent to it at zero time (Figure 21a). The initial time constant $\tau(0)$ will be found along this tangent line as the time necessary for the initial value of the current to decrease to its $1/e \approx 0.368$ value.

If the above condition is not fulfilled, the accuracy of obtaining sub-transient quantities may be greatly reduced. Higher accuracy in analysing the test curve into exponentials may be obtained by using a digital computer.

60 **Determination of frequency response characteristics and quantities from the d.c. decay test**

Frequency response characteristics $\frac{1}{x(js)}$ and $G(js)$ may be represented as follows:

$$\frac{1}{x(js)} = \frac{1}{r} \left[\frac{1}{\int_0^{\infty} i(t) e^{-jst} dt} - js \right] = - \frac{1}{r} \frac{\int_0^{\infty} \left[\frac{d}{dt} i(t) \right] e^{-jst} dt}{\int_0^{\infty} i(t) e^{-jst} dt}$$

$$G(js) = \frac{\int_0^{\infty} i_i(t) e^{-jst} dt}{i_0 \left[1 - js \int_0^{\infty} i(t) e^{-jst} dt \right]}$$

where: $i(t)$ = the ratio of armature (primary) winding test current (or the difference of the test curve and sustained value) and the initial value of this current

$i_i(t)$ = field winding decaying current in per unit value

i_0 = initial value of armature (primary) winding current along the d- or q-axis in per unit value

r = phase armature (primary) winding circuit resistance in per unit value:

$$r = r_a + K_{con} \Delta r$$

where r_a = d.c. armature (primary) winding resistance in per unit value

Δr = additional (external) armature circuit resistance in per unit value

K_{con} = armature (primary) winding connection factor (see Clause 58)

Les caractéristiques de réponse en fréquence $\frac{1}{x_d(js)}$, $\frac{1}{x_q(js)}$, et $G(js)$ peuvent être représentées par les racines des équations caractéristiques des machines tournantes synchrones $D_d(p) = 0$; $D'_d(p) = 0$, $D_q(p) = 0$, $D'_q(p) = 0$ et $A(p) = 0$

$$\frac{1}{x_d(js)} = \frac{1}{x''_d} \frac{D_d(js)}{D'_d(js)} = \frac{1}{x''_d} \frac{(\alpha_{1d} + js)(\alpha_{2d} + js) \dots (\alpha_{nd} + js)}{(\alpha'_{1d} + js)(\alpha'_{2d} + js) \dots (\alpha'_{nd} + js)};$$

$$\frac{1}{x_q(js)} = \frac{1}{x''_q} \frac{D_q(js)}{D'_q(js)} = \frac{1}{x''_q} \frac{(\alpha_{1q} + js)(\alpha_{2q} + js) \dots (\alpha_{nq} + js)}{(\alpha'_{1q} + js)(\alpha'_{2q} + js) \dots (\alpha'_{nq} + js)};$$

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

Les racines des équations caractéristiques $D_d(p) = 0$, $D'_d(p) = 0$, $D_q(p) = 0$, $D'_q(p) = 0$ et $A(p) = 0$ peuvent être déterminées en se servant de l'amplitude i_k et du décroissement des exponentielles λ_k des courbes de décroissance du courant

Les racines $-\alpha_1, -\alpha_2, \dots, -\alpha_n$ de l'équation caractéristique $D(p) = 0$ sont déterminées comme étant les racines de l'équation

$$\sum_{k=1}^{n+1} \frac{i_k \lambda_k}{p + \lambda_k} = 0$$

Les racines $-\alpha'_1, -\alpha'_2, \dots, -\alpha'_n$ de l'équation caractéristique $D'(p) = 0$ sont déterminées comme étant les racines de l'équation

$$\sum_{k=1}^{n+1} \frac{i_k}{p + \lambda_k} = 0$$

Les racines $-\gamma_1, -\gamma_2, \dots, -\gamma_{n-1}$ de l'équation caractéristique $A(p) = 0$ sont déterminées comme étant les racines de l'équation:

$$\sum_{k=1}^{n+1} \frac{i_k t}{p + \lambda_k t} = 0$$

En se servant des valeurs connues des racines des équations caractéristiques, on peut calculer les caractéristiques de réponse en fréquence:

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

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

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

Frequency response characteristics $\frac{1}{x_d(js)}$, $\frac{1}{x_q(js)}$, and $G(js)$ may be represented by roots of characteristic equations $D_d(p) = 0$, $D'_d(p) = 0$, $D_q(p) = 0$, $D'_q(p) = 0$ and $A(p) = 0$ of rotating synchronous machines

$$\frac{1}{x_d(js)} = \frac{1}{x''_d} \frac{D_d(js)}{D'_d(js)} = \frac{1}{x''_d} \frac{(\alpha_{1d} + js)(\alpha_{2d} + js) \dots (\alpha_{nd} + js)}{(\alpha'_{1d} + js)(\alpha'_{2d} + js) \dots (\alpha'_{nd} + js)},$$

$$\frac{1}{x_q(js)} = \frac{1}{x''_q} \frac{D_q(js)}{D'_q(js)} = \frac{1}{x''_q} \frac{(\alpha_{1q} + js)(\alpha_{2q} + js) \dots (\alpha_{nq} + js)}{(\alpha'_{1q} + js)(\alpha'_{2q} + js) \dots (\alpha'_{nq} + js)},$$

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

Roots of characteristic equations $D_d(p) = 0$, $D'_d(p) = 0$, $D_q(p) = 0$, $D'_q(p) = 0$ and $A(p) = 0$ may be determined using the amplitude of i_k and the decrement (factor) of the exponentials λ_k of the current decay curves

Roots $-\alpha_1, -\alpha_2, \dots, -\alpha_n$ of the characteristic equation $D(p) = 0$ are determined as roots of the equation:

$$\sum_{k=1}^{n+1} \frac{i_k \lambda_k}{p + \lambda_k} = 0$$

Roots $-\alpha'_1, -\alpha'_2, \dots, -\alpha'_n$ of the characteristic equation $D'(p) = 0$ are determined as roots of the equation:

$$\sum_{k=1}^{n+1} \frac{i_k}{p + \lambda_k} = 0$$

Roots $-\gamma_1, -\gamma_2, \dots, -\gamma_{n-1}$ of the characteristic equation $A(p) = 0$ are determined as roots of the equation

$$\sum_{k=1}^{n+1} \frac{i_{kf}}{p + \lambda_{kf}} = 0$$

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

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

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

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

où:

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

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

$$A_k = N \frac{(\gamma_1 - \alpha_{kd}) (\gamma_{n-1} - \alpha_{kd})}{(\alpha_{1d} - \alpha_{kd}) (\alpha_{k-1,d} - \alpha_{kd}) (\alpha_{k+1,d} - \alpha_{kd}) (\alpha_{nd} - \alpha_{kd})}$$

$$N = \frac{\alpha_{1d} \alpha_{2d} \dots \alpha_{nd}}{\gamma_1 \gamma_2 \dots \gamma_{n-1}} \frac{\sum_{k=1}^{n+1} \frac{i_{kf}}{\lambda_{kf}}}{i_{od}}, \quad X_d = r \sum_{k=1}^{n+1} \frac{i_{kd}}{\lambda_{kd}}, \quad X_q = r \sum_{k=1}^{m+1} \frac{i_{1q}}{\lambda_{1q}}$$

$$X_d'' = \frac{r}{\sum_{k=1}^{n+1} i_{kd} \lambda_{kd}}; \quad X_q'' = \frac{r}{\sum_{k=1}^{m+1} i_{1q} \lambda_{1q}}$$

Une vérification des grandeurs x_d , x_d'' , x_q et x_q'' doit être faite par comparaison avec les valeurs obtenues au moyen des méthodes recommandées (voir Publication 34-4 de la CEI), et les caractéristiques de réponse en fréquence doivent être corrigées en conséquence. Si la différence dépasse 10%, l'essai de décroissance d'un courant continu doit être répété de manière à obtenir une identité plus poussée avec les caractéristiques de réponse en fréquence réelles.

60 1 Les réactances synchrones et les réactances subtransitoires le long des axes d et q sont déterminées à l'aide des formules données à l'article 60.

Les réactances transitoires le long des axes d et q sont déterminées à l'aide des formules:

$$x_d' = \frac{1}{\frac{1}{x_d} + C_{1d}} \quad \text{et} \quad x_q' = \frac{1}{\frac{1}{x_q} + C_{1q}}$$

où C_{1d} et C_{1q} sont les mêmes qu'à l'article 60.

60 2 Connaissant les caractéristiques de réponse en fréquence $\frac{1}{x_d(js)}$ et $\frac{1}{x_q(js)}$, la réactance inverse est calculée comme partie imaginaire au moyen de la formule suivante:

$$x_2 = \text{Im} \left\{ \frac{j}{2 \left[\frac{1}{x_d(js)_{s=2}} + \frac{1}{x_q(js)_{s=2}} \right]} \right\}$$

60 3 Les constantes de temps longitudinales des machines synchrones sont déterminées en se servant des racines connues des équations caractéristiques $D_d(p) = 0$ et $D_q(p) = 0$ au moyen des formules:

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

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

$$\omega = 2\pi f$$

where:

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

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

$$A_k = N \frac{(\gamma_1 - \alpha_{kd}) (\gamma_{n-1} - \alpha_{kd})}{(\alpha_{1d} - \alpha_{kd}) (\alpha_{k-1, d} - \alpha_{kd}) (\alpha_{k+1, d} - \alpha_{kd}) (\alpha_{nd} - \alpha_{kd})}$$

$$N = \frac{\alpha_{1d} \alpha_{2d} \alpha_{nd}}{\gamma_1 \gamma_2 \gamma_{n-1}} \frac{\sum_{k=1}^{n+1} \frac{i_{kf}}{\lambda_{kf}}}{i_{od}}; \quad X_d = r \sum_{k=1}^{n+1} \frac{i_{kd}}{\lambda_{kd}}; \quad X_q = r \sum_{k=1}^{m+1} \frac{i_{1q}}{\lambda_{1q}}$$

$$X_d'' = \frac{r}{n+1} \frac{1}{\sum_{k=1}^{n+1} i_{kd} \lambda_{kd}}; \quad X_q'' = \frac{r}{m+1} \frac{1}{\sum_{k=1}^{m+1} i_{1q} \lambda_{1q}}$$

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 (see Publication 34-4), and the frequency response characteristics correspondingly corrected. If the divergence is more than 10%, the d.c. decay shall be repeated so as to obtain closer identity with actual frequency response characteristics.

60 1 Synchronous reactances and subtransient reactances along the d- and q-axes are determined from the formulae as shown in Clause 60

Transient reactances along the d- and q-axes are determined as:

$$x_d' = \frac{1}{\frac{1}{x_d} + C_{1d}} \quad \text{and} \quad x_q' = \frac{1}{\frac{1}{x_q} + C_{1q}}$$

where C_{1d} and C_{1q} are as in Clause 60

60 2 The negative sequence reactance, knowing the frequency response characteristics $\frac{1}{x_d(js)}$ and $\frac{1}{x_q(js)}$, is determined as an imaginary part:

$$x_2 = \text{Im} \left\{ \frac{j}{2 \left[\frac{1}{x_d(js)_{s=2}} + \frac{1}{x_q(js)_{s=2}} \right]} \right\}$$

60 3 Direct axis time constants of synchronous machines are determined using known roots of characteristic equations $D_d(p) = 0$ and $D_d'(p) = 0$ as:

$$\tau_d' = \frac{1}{\omega \alpha_{1d}}; \quad \tau_d'' = \frac{1}{\omega \alpha_{2d}}; \quad \tau_d''' = \frac{1}{\omega \alpha_{3d}};$$

$$\tau_{d0}' = \frac{1}{\omega \alpha_{1d}}; \quad \tau_{d0}'' = \frac{1}{\omega \alpha_{2d}}; \quad \tau_{d0}''' = \frac{1}{\omega \alpha_{3d}};$$

$$\omega = 2\pi f$$

- 60 4 Les constantes des temps transversales sont déterminées de manière analogue en utilisant les racines des équations caractéristiques $D_q(p) = 0$ et $D_q'(p) = 0$
- 60 5 Les caractéristiques de réponse en fréquence et les grandeurs rapportées à un certain glissement pour les axes longitudinal et transversal (voir articles 56, 58 et le paragraphe 58 1) peuvent être représentées comme

$$Z(js) = \text{Re} [Z(js)] + j\text{Im} [Z(js)]$$

où: $Z(js) = \frac{l}{s} + j x(js)$ pour l'axe dont il s'agit

61 **Essai d'application brusque d'un courant continu à l'arrêt**

On procède à l'essai d'application brusque d'un courant continu à l'induit, pour déterminer les fonctions de transfert des équations de Park pour les machines synchrones. Ces fonctions de transfert peuvent être utilisées dans les études des phénomènes transitoires des machines synchrones. Elles sont d'une importance spéciale pour les machines à rotor massif.

En conformité avec le schéma bloc (voir figure 22, page 94), les fonctions de transfert suivantes peuvent être utilisées pour l'axe longitudinal

$$\psi_{aa}(p), \psi_{ar}(p); \psi_{aa}(p); i_{rr}(p); i_{ra}(p); U_{rr}(p); U_{ra}(p)$$

Les fonctions de transfert analogues peuvent être utilisées pour l'axe transversal

Puisque $i_{rr}(p) = \frac{1}{u_{rr}(p)}$ et $U_{ra}(p) = i_{ra}(p)$, $U_{rr}(p) = \frac{i_{ra}(p)}{i_{rr}(p)}$, la détermination expérimentale peut

être limitée à cinq fonctions de transfert

L'essai est fait sur la machine à l'arrêt, la position du rotor étant orientée d'abord le long de l'axe longitudinal et ensuite le long de l'axe transversal (voir article 57)

En procédant aux mesures où U_r doit être égal à zéro, l'enroulement d'excitation est court-circuité par une connexion métallique de forte section

Il sera utile de mesurer d'abord toutes les fonctions de transfert pour la position du rotor correspondant à l'un des axes et ensuite de tourner le rotor dans la position correspondant à l'autre axe

61 1 *Mesure de $\psi_{aa}(p)$*

L'enroulement d'excitation est court-circuité ($U_r = 0$)

La grandeur d'entrée doit être une variation en échelon du courant d'induit longitudinal. Le courant d'induit est fourni par un générateur à courant continu dont la tension U_0 est pratiquement indépendante de la charge. Une forte résistance R est branchée entre le générateur à courant continu et l'enroulement d'induit (voir figure 23, page 95). L'inductance L_s du circuit de l'induit dépend de l'enroulement d'induit de la machine essayée, des appareils de mesure et du générateur à courant continu. La résistance en série R doit être choisie de telle sorte que la constante de temps d'apparition d'un courant après le branchement du générateur à courant continu soit inférieure à 5 ms. Le courant continu I_a dans le stator est pratiquement égal à U_0/R et doit être au moins égal à 5% du courant nominal du turbo-alternateur.

La grandeur de sortie est représentée par la fonction transitoire du flux magnétique ψ_a de la machine. La grandeur de sortie cherchée est mesurée par l'intermédiaire d'un transducteur. La variation du flux $d\psi_a/dt$ dans l'enroulement de l'induit est obtenue comme étant la différence entre la tension U_s aux bornes de l'enroulement statorique et la tension dans la résistance R_s de l'enroulement d'induit

$$\frac{d\psi_a}{dt} = U_s - I_s R_s$$

60 4 Quadrature axis time constants are similarly determined using the roots of characteristic equations $D_q(p) = 0$ and $D_q'(p) = 0$

60 5 Frequency response characteristics and quantities, referred to a certain slip, for the d- and q-axes (see Clauses 56, 58 and Sub-clause 58 1) may be represented as

$$Z(js) = \text{Re} [Z(js)] + j\text{Im} [Z(js)]$$

where: $Z(js) = \frac{r}{s} + jx(js)$ for the particular axis

61 Suddenly applied d c at standstill test

The suddenly applied direct current to the armature (primary) winding test is used to determine transfer functions of Park's synchronous machine equations. These transfer functions may be used in transient studies of synchronous machine phenomena. They are of special importance for solid rotor machines.

In accordance with the block diagram (see Figure 22, page 94), the following transfer functions may be used for the direct-axis:

$$\psi_{ad}(p); \psi_{af}(p); \psi_{aq}(p); i_{fd}(p); i_{fd}(p); U_{fd}(p); U_{fd}(p)$$

Similar transfer functions may be used for the q-axis.

Since $i_{fd}(p) = \frac{1}{u_{fd}(p)}$ and $U_{fd}(p) = \frac{i_{fd}(p)}{i_{fd}(p)}$; the experimental determination can be limited to five functions.

The test is made with the machine at standstill and the rotor position orientated first in the direct-, and then in the quadrature-axis (see Clause 57).

For measurements in which U_f shall be equal to zero, the excitation winding is short-circuited by a heavy metal strap.

It will be expedient first to measure all the transfer functions of one axis position and then to turn the rotor into the other axis position.

61 1 Measurement of $\psi_{ad}(p)$

The excitation winding is short-circuited ($U_f = 0$).

The input quantity should be a step function of the armature (primary) winding current in the direct axes. The current is taken from a d c generator whose voltage U_o is practically independent of the load. A large resistor R is connected between the d c generator and the armature (primary) winding (see Figure 23, page 95). The inductance L_s of the circuit is dependent on the armature (primary) winding of the machine under test, the measuring instruments and the d c generator. The series resistor R shall be selected so that the current build up time constant after connecting the d c generator is less than 5 ms. The stator d c current I_d is practically equal to U_o/R and should be at least 5% of the rated current of the turbogenerator.

The output quantity is the step response of the magnetic flux ψ_a of the machine. The required output quantity is measured through a transducer. The change in flux $d\psi_a/dt$ of the armature (primary) winding is obtained as the difference between the voltage U_s across the winding and the voltage across the resistance R_s of the armature (primary) winding.

$$\frac{d\psi_a}{dt} = U_s - I_s R_s$$

La tension U_s est fournie à un appareil sommateur du transducteur par l'intermédiaire d'un potentiomètre en vue de la réduire. La réduction doit correspondre à U_R/U_0 au moins pour que la tension aux bornes d'entrée de l'appareil sommateur ne dépasse pas la tension de référence U_R du calculateur analogique, c'est-à-dire 10 V ou 100 V.

Une tension proportionnelle à $I_s R_s$ peut être prélevée sur la résistance R . Afin de régler cette tension avec précision, elle est fournie à l'appareil sommateur comme étant une grandeur négative, par l'intermédiaire d'un potentiomètre.

La sortie de l'appareil sommateur est intégrée. La constante de temps d'intégration $\tau_i = R_i C_i$ doit être telle que la tension aux bornes de sortie de l'intégrateur ne dépasse pas la tension de référence du calculateur analogique. Au cours des mesures sur un turbo-alternateur de 300 MVA, C_i est approximativement égal à 1 μ F et R_i à 50 k Ω environ. Cette tension est observée à l'écran de l'oscillographe et photographiée.

Le potentiomètre par l'intermédiaire duquel la tension $I_s R_s$ est prélevée doit être équilibré de telle sorte que cette tension soit égale, mais avec un signe inverse, à U_s pendant les mesures en courant continu, c'est-à-dire $U_s - I_s R_s = 0$. Après branchement du courant d'induit, la fonction de transfert du générateur $\psi_a(t)$ apparaîtra à l'oscillographe.

Les mêmes propriétés électromagnétiques peuvent être obtenues au moyen de l'essai de court-circuit brusque. L'enroulement d'excitation est court-circuité ($U_f = 0$). La résistance interne de l'enroulement d'excitation peut être négligée. Lorsque la tension U_q aux bornes de la ligne est court-circuitée, la grandeur d'entrée, c'est-à-dire le flux magnétique ψ_a , subit une variation rapide.

La fonction transitoire est le courant d'induit après la soustraction de la composante de courant continu (la résistance de l'enroulement d'induit est faible par rapport à sa réactance). La fonction de transfert trouvée à partir de l'essai de court-circuit brusque sera alors $1/\psi_{ad}(p)$.

61.2 Mesures de $\psi_{af}(p)$

L'enroulement d'induit est à circuit ouvert ($I_a = 0$).

La grandeur d'entrée doit être une variation en échelon de la tension aux bornes du circuit d'excitation. Il sera utile de couper la tension en court-circuitant à la fois l'enroulement d'excitation directement et la source de tension sur une résistance.

La grandeur de sortie est le flux magnétique ψ_a dans la machine, qui peut être mesuré de manière analogue à celle décrite au paragraphe 61.1.

61.3 Mesures de $i_{a2}(p)$

L'enroulement d'excitation est court-circuité ($U_f = 0$).

Le courant d'induit en tant que grandeur d'entrée est appliqué brusquement de manière analogue à celle du paragraphe 61.1.

La grandeur de sortie est le courant d'excitation.

61.4 Mesures de $U_{fa}(p)$

L'enroulement d'excitation est à circuit ouvert ($I_f = 0$).

Le courant d'induit en tant que grandeur d'entrée est appliqué brusquement de manière analogue à celle du paragraphe 61.1.

La grandeur de sortie est la tension dans l'enroulement d'excitation.

L'expérience a montré que la tension dans l'enroulement d'excitation à $t = 0$ est très élevée mais décroît rapidement. C'est pourquoi ce n'est qu'un courant d'induit faible qui peut être mis en circuit parce que autrement la tension dans l'enroulement d'excitation peut s'avérer excessive. La valeur admissible du courant d'induit dépend de l'effet d'amortissement dans le rotor, et le courant doit être choisi empiriquement.

Il est recommandé de prélever la tension U_L dans l'enroulement d'excitation par l'intermédiaire du générateur de fonction d'un calculateur analogique. La tension d'entrée de ce générateur est U_L et la tension de sortie est $\log U_L$. On peut alors mieux évaluer la fonction transitoire.

The voltage U_s is fed to a summing device of the transducer through a potentiometer in order to reduce it. The reduction must correspond to at least U_R/U_0 to ensure that the voltage across the input of the summing device does not exceed the reference voltage U_R of the analogue computer, e.g. 10 V or 100 V.

A voltage that is proportional to $I_s R_s$ can be tapped off to the resistor R . To enable it to be set accurately, this voltage is fed to the summing device as a negative quantity through a potentiometer. The output of the summing device is integrated. The integration time constant $\tau_i = R_i C_i$, must be such that the voltage across the output of the integrator does not exceed the reference voltage of the analogue computer. In a measurement taken on a 300 MVA turbogenerator C_i is approximately 1 μF and R_i approximately 50 k Ω . This voltage can be observed on an oscillograph screen and photographed.

The potentiometer through which the voltage $I_s R_s$ is measured shall be so balanced that this voltage shall be equal but opposite in sign to U_s during d.c. measurements, i.e. ($U_s - I_s R_s = 0$). After the armature current has been switched on, the transfer function of the generator $\psi_a(t)$ will then appear on the oscillograph.

The same electromagnetic properties can be obtained by means of a sudden short-circuit test. The excitation winding is short-circuited ($U_f = 0$). The internal resistance of the excitation winding can be neglected. When the terminal voltage U_t is short-circuited, the input quantity, i.e. the magnetic flux ψ_a , is abruptly displaced.

The step response is the armature (primary) winding current after subtraction of the d.c. component (the resistance of the armature (primary) winding is small in relation to its reactance). The transfer function obtained from the sudden short-circuit test will then be $1/\psi_{aa}(p)$.

61.2 Measurement of $\psi_{aa}(p)$

The armature (primary) winding is open-circuited ($I_a = 0$).

The input quantity should be a step function of the voltage across the output of the excitation circuit. It will be expedient to switch the voltage off by short-circuiting the excitation winding directly and at the same time short-circuiting the voltage source through a resistor.

The output quantity is the magnetic flux ψ_a in the machine which may be measured in a manner similar to that described in Sub-clause 61.1.

61.3 Measurement of $i_{fa}(p)$

The excitation winding is short-circuited ($U_f = 0$).

As the input quantity, the armature (primary) winding current is applied suddenly as described in Sub-clause 61.1.

The output quantity is the excitation winding current.

61.4 Measurement of $U_{fa}(p)$

The excitation winding is open-circuited ($I_f = 0$).

As the input quantity, the armature (primary) winding current is applied suddenly as described in Sub-clause 61.1.

The output quantity is the excitation winding voltage.

Experience has shown that the excitation winding voltage at $t = 0$ is very high but decreases quickly. Therefore only a small armature current must be switched on, since otherwise the excitation winding voltage may be excessive. The permissible value of the armature (primary) winding current depends on the damping effect in the rotor and the current must be selected on an empirical basis.

It is advisable to take the excitation winding voltage U_L through the function generator of an analogue computer. The input voltage of this function generator is U_L , and the output voltage is $\log U_L$. The step response can then be evaluated better.

61 5 Mesures de ψ_{qa} (p)

La grandeur d'entrée est une variation en échelon du courant d'induit transversal. Le circuit est monté de manière analogue à celle décrite dans le paragraphe 61 1, mais le rotor est tourné de 90 degrés électriques.

La grandeur de sortie est la fonction transitoire du flux magnétique ψ_a de la machine. On procède aux mêmes mesures que celles décrites au paragraphe 61 1.

Il est possible de mesurer le courant de court-circuit le long de l'axe transversal, mais la procédure à suivre est plus compliquée que celle pour l'axe longitudinal. La fonction de transfert trouvée sera alors $1/\psi_{qa}(p)$.

61 6 Mesures de i_{ff} (p)

L'enroulement d'induit est à circuit ouvert ($I_a = 0$).

La grandeur d'entrée est une variation en échelon de la tension aux bornes de l'enroulement d'excitation comme pour la mesure de $\psi_{af}(p)$.

La fonction de transfert de l'enroulement d'excitation est mesurée en tant que grandeur de sortie.

62 Détermination des caractéristiques de réponse en fréquence à partir de l'essai d'application brusque à l'arrêt d'un courant continu

Pour mesurer le flux magnétique, il est nécessaire de procéder au tarage du dispositif de mesure entier consistant en un transducteur et un oscillographe.

Un échelon de la tension U_e est appliqué à l'entrée du transducteur. Une fonction amortie apparaît alors à l'écran de l'oscillographe.

Au cours du temps T_a la tension à l'entrée de l'oscillographe s'accroît à partir de zéro jusqu'à U_a . Une plage temps-tension à l'entrée du transducteur de $U_e T_a$ produit une tension U_a à la sortie.

Si au cours de l'essai avec le générateur une tension U_a^x est mesurée à l'entrée de l'oscillographe, la plage temps-tension, ou autrement dit le flux dans le générateur, est donnée par :

$$\Phi = \frac{U_e T_a}{U_a} U_a^x$$

La pulsation est ω (par exemple 314 1/s). Le courant statorique est I .

En connaissant le flux Φ , la pulsation et le courant d'induit I , il est possible maintenant de calculer la réactance à partir de la formule $X = \omega\Phi/I$.

62 1 Les réactances synchrones X_d ou X_q des deux phases connectées en série sont déterminées pour le temps $t \rightarrow \infty$.

Pour une phase, la réactance synchrone X_d avec les valeurs mesurées est :

$$X_d = \frac{\omega}{\sqrt{3}} \frac{U_e T_a}{U_a} \frac{U_a^x}{I}$$

En se ramenant à l'impédance nominale U^2/S , il est alors possible d'en déduire :

$$X_d = \frac{\omega}{\sqrt{3}} \frac{U_e T_e}{U_a} \frac{U_a^x}{I} \frac{S}{U^2} \quad \text{en valeur réduite}$$

où : S = puissance apparente nominale de la machine essayée

U = tension nominale de la même machine

Cette valeur de X_d doit être vérifiée par la méthode recommandée (voir article 27 de la Publication 34-4 de la CEI) et si la valeur obtenue est la même, les résultats de l'essai peuvent alors être utilisés pour la détermination de la caractéristique de réponse.

61.5 Measurement of $\psi_{qa}(p)$

The input quantity is the step function of the armature (primary) winding current in the quadrature-axis. The circuit arrangement is the same as that described in Sub-clause 61.1. The rotor, however, is turned through 90 electrical degrees.

The output quantity is the transient function of the magnetic flux ψ_q of the machine. Measurement is the same as described in Sub-clause 61.1.

It is possible to measure the short-circuit current in the quadrature-axis, but the arrangement required is more complicated than that for the direct-axis. The transfer function determined will then be $1/\psi_{qa}(p)$.

61.6 Measurement of $i_{ff}(p)$

The armature (primary) winding is open-circuited ($I_a = 0$).

The input quantity is the step function of the voltage across the excitation winding as in the case of the measurement of $\psi_{df}(p)$.

The transfer function of the excitation winding current is measured as the output quantity.

62 Determination of frequency response characteristics from the suddenly applied d.c. at standstill test

For the measurement of the magnetic flux, it is necessary to calibrate the entire measuring device consisting of transducer and oscillograph.

A step function of the voltage U_e is fed to the input of the transducer. A ramp function then appears on the oscillograph screen.

In the time T_a , the voltage across the oscillograph rises from zero to U_a . Hence, a voltage-time area at the transducer input of $U_e T_a$ produces a voltage of U_a at the output.

If, in the test with the generator, a voltage U_a^x is measured across the oscillograph, the voltage-time area, or in other words the flux in the generator, is given by:

$$\Phi = \frac{U_e T_a}{U_a} U_a^x$$

The angular frequency is ω (for example 314 1/s). The stator current is I .

From the flux Φ , the angular frequency and the armature (primary) winding current I , it is now possible to calculate the reactance from the formula: $X = \omega\Phi/I$.

62.1 For the time $t \rightarrow \infty$, synchronous reactances X_d or X_q of the two phases connected in series are determined.

For one phase, synchronous reactance X_d with the measured values is

$$X_d = \frac{\omega}{\sqrt{3}} \frac{U_e T_e}{U_a} \frac{U_a^x}{I}$$

Referring to the rated resistance U^2/S , it is then possible to calculate from this

$$X_d = \frac{\omega}{\sqrt{3}} \frac{U_e T_e}{U_a} \frac{U_a^x}{I} \frac{S}{U^2} \quad \text{per unit}$$

where: S = rated apparent power of the machine under test

U = rated voltage of the same machine

This value of X_d should be checked by means of a recommended method (see IEC Publication 34-4, Clause 27), and if the value obtained coincides, then the results of the test may be used for determining the response characteristic.

62 2 Le tarage des appareils de mesure utilisés pour la détermination de la caractéristique de réponse dans le circuit d'excitation est fait de façon usuelle. Le générateur de fonction $f(U_L) = \log U_L$ doit être introduit dans le circuit pour le tarage.

63 Détermination des grandeurs par calcul en utilisant des grandeurs connues au moyen d'essais

La constante de temps transitoire transversale en court-circuit (voir article 16) est déterminée par le calcul en utilisant les valeurs trouvées aux essais de x_q (voir Publication 34-4 de la CEI, article 6), x'_q (voir article 8) et τ'_{q0} (voir article 15) et la formule suivante :

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

63 1 La constante de temps subtransitoire transversale en court-circuit (voir article 19) est déterminée par le calcul en utilisant les valeurs trouvées aux essais pour x'_q (voir article 8), x''_q (voir Publication 34-4 de la CEI, article 9) et τ''_{q0} (voir article 18) et la formule suivante :

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

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC TR 60034-4A:2012

62.2 Calibration of measuring instruments used for determination of response characteristics in excitation circuits is done in the usual way. The function generator $f(U_L) = \log U_L$ shall be introduced into the circuit for calibration.

63 **Determination of quantities by calculation using known test quantities**

Quadrature-axis transient short-circuit time constant (see Clause 16) is determined by calculation from the test values x_q (see IEC Publication 34-4, Clause 6), x'_q (see Clause 8) and τ'_{q0} (see Clause 15) using the following formula:

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

63.1 Quadrature-axis subtransient short-circuit time constant (see Clause 19) is determined by calculation from the test values x'_q (see Clause 8), x''_q (see IEC Publication 34-4, Clause 9) and τ''_{q0} (see Clause 18) using the following formula

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

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC TR 60034-4A:1992

Tableau de renvoi

Grandeur	Définitions (article)	Désignation des essais	Méthodes d'essai (article)	Saturée ou non saturée
i_{fk}	4	Essai de surexcitation à facteur de puissance nul et à la tension d'induit variable	25 26	
x_d	5	Essai avec angle interne variable	27 28	Non saturée
x_q	6	Essai avec angle interne variable Essai de suppression d'une basse tension appliquée à l'induit lors d'un essai à un très faible glissement Essai de suppression d'une basse tension appliquée à l'induit, la machine tournant en asynchrone en charge Essai de décroissance d'un courant continu à l'arrêt	27 28 29 30 31 32 59 60	Non saturée
x'_d	7	Essai de décroissance d'un courant continu à l'arrêt	59 60	Non saturée
x'_q	8	Essai de suppression d'une basse tension appliquée à l'induit lors d'un essai à un très faible glissement Essai de suppression d'une basse tension appliquée à l'induit, la machine tournant en asynchrone en charge Mise en court-circuit brusque de la machine tournant en charge au cours d'un essai à basse tension Essai de décroissance d'un courant continu à l'arrêt	29 30 31 32 33 34 59 60	Non saturée
x''_q	9	Essai de suppression d'une basse tension appliquée à l'induit lors d'un essai à un très faible glissement Essai de suppression d'une basse tension appliquée à l'induit, la machine tournant en asynchrone en charge Mise en court-circuit brusque de la machine tournant en charge au cours d'un essai à basse tension	29 30 31 32 33 34	
x_2	10	Essai de court-circuit brusque entre deux phases Essai de décroissance d'un courant continu à l'arrêt	35 36 59 60	
x_σ	11	Essai d'application d'une tension avec le rotor enlevé	39 40	

Cross-reference table

Quantity	Definition (clause)	Name of test	Test method (clause)	Saturated or unsaturated
i_{fk}	4	Over-excitation test at zero power factor and variable armature voltage	25 26	
x_d	5	Phase shifting test	27 28	Unsaturated
x_q	6	Phase shifting test Disconnecting applied low armature voltage at a very low-slip test Disconnecting applied low armature voltage test, the machine running asynchronously on load Direct-current decay at standstill test	27 28 29 30 31 32 59 60	Unsaturated
x'_d	7	Direct-current decay at standstill test	59 60	Unsaturated
x'_q	8	Disconnecting applied low armature voltage at a very low-slip test Disconnecting applied low armature voltage test, the machine running asynchronously on load Sudden short-circuiting of machine running on load at low voltage test Direct-current decay at standstill test	29 30 31 32 33 34 59 60	Unsaturated
x''_q	9	Disconnecting applied low armature voltage at a very low-slip test Disconnecting applied low armature voltage test, the machine running asynchronously on load Sudden short-circuiting of machine running on load at low voltage test	29 30 31 32 33 34	
x_2	10	Sudden line-to-line short-circuit test Direct-current decay at standstill test	35 36 59 60	
x_σ	11	Applied voltage test with rotor removed	39 40	

Grandeur	Définitions (article)	Désignation des essais	Méthodes d'essai (article)	Saturée ou non saturée
z_{st}	12	Essai à rotor bloqué	41 42	
τ'_{do}	13	Essai d'application brusque de l'excitation avec l'entoulement induit à circuit ouvert Essai de décroissance d'un courant continu à l'arrêt	43 44 59 60	
τ'_d	14	Essai d'application brusque de l'excitation avec l'enroulement induit en court-circuit Essai de décroissance d'un courant continu à l'arrêt	45 46 59 60	
τ'_{qo}	15	Suppression d'une basse tension appliquée à l'induit au cours d'un essai à un très faible glissement Essai de suppression d'une basse tension appliquée à l'induit, la machine tournant en asynchrone en charge Essai de décroissance d'un courant continu à l'arrêt	29 30 31 32 59 60	
τ'_q	16	Mise en court-circuit brusque de la machine tournant en charge au cours d'un essai à basse tension Calcul à partir de grandeurs connues au moyen d'essais Essai de décroissance d'un courant continu à l'arrêt	33 34 63 59 60	
τ''_{do}	17	Rétablissement de la tension Essai de décroissance d'un courant continu à l'arrêt	47 48 59 60	
τ''_{qo}	18	Suppression d'une basse tension appliquée à l'induit au cours d'un essai à très faible glissement Essai de suppression d'une basse tension appliquée à l'induit, la machine tournant en asynchrone en charge Essai de décroissance d'un courant continu à l'arrêt	29 30 31 32 59 60	
τ''_q	19	Mise en court-circuit brusque de la machine tournant en charge au cours d'un essai à basse tension Calcul à partir de grandeurs connues au moyen d'essais Essai de décroissance d'un courant continu à l'arrêt	33 34 63 59 60	

Quantity	Definition (clause)	Name of test	Test method (clause)	Saturated or unsaturated
z_{st}	12	Locked rotor	41 42	
τ'_{do}	13	Suddenly applied excitation test with armature (primary) winding open-circuited Direct-current decay at standstill test	43 44 59 60	
τ'_d	14	Suddenly applied excitation test with armature (primary) winding short-circuited Direct-current decay at standstill test	45 46 59 60	
τ'_{qo}	15	Disconnecting applied low armature voltage at a very low-slip test Disconnecting applied low armature voltage test, the machine running asynchronously on load Direct-current decay at standstill test	29 30 31 32 59 60	
τ'_q	16	Sudden short-circuiting of machine running on load at low-voltage test Calculation using known test quantities Direct-current decay at standstill test	33 34 63 59 60	
τ''_{do}	17	Voltage recovery Direct-current decay at standstill test	47 48 59 60	
τ''_{qo}	18	Disconnecting applied low armature voltage at a very low-slip test Disconnecting applied low armature voltage, the machine running asynchronously on load Direct-current decay at standstill test	29 30 31 32 59 60	
τ''_q	19	Sudden short-circuiting of machine running on load at low voltage test Calculation using known test quantities Direct-current decay at standstill test	33 34 63 59 60	