

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

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

RECOMMANDATION DE LA CEI

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

(affiliated to the International Organization for Standardization — ISO)

IEC RECOMMENDATION

Publication 34-4

Première édition — First edition

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

**Recommendations for rotating electrical machinery
(excluding machines for traction vehicles)**
Part 4 Methods for determining synchronous machine quantities
from tests



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)

RECOMMANDATION DE LA CEI

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

(affiliated to the International Organization for Standardization — ISO)

IEC RECOMMENDATION

Publication 34-4

Première édition — First edition

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**

**Recommendations for rotating electrical machinery
(excluding machines for traction vehicles)**
**Part 4 Methods for determining synchronous machine quantities
from tests**



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 Varembé

Genève, Suisse

SOMMAIRE

	Pages
PRÉAMBULE	8
PRÉFACE	8
Articles	
SECTION UN – DOMAINE D’APPLICATION ET OBJET	
1 Domaine d’application	12
2 Objet	12
SECTION DEUX – GÉNÉRALITÉS	
3 Généralités	12
SECTION TROIS – TERMINOLOGIE ET MÉTHODES D’ÉTUDE EXPÉRIMENTALE	
4 Réactance synchrone longitudinale X_d	16
5 Rapport de court-circuit K_c	16
6 Réactance synchrone transversale X_q	16
7 Réactance transitoire longitudinale X_d'	18
8 Réactance subtransitoire longitudinale X_d''	18
9 Réactance subtransitoire transversale X_q'	18
10 Réactance inverse X_2	20
11 Résistance inverse R_2	20
12 Réactance homopolaire X_0	20
13 Résistance homopolaire R_0	20
14 Réactance de Potier X_p	22
15 Résistance en courant continu de l’induit et de l’enroulement d’excitation R_a et R_f	22
16 Résistance directe de l’enroulement d’induit R_1	22
17 Constante de temps transitoire longitudinale à circuit ouvert τ_{do}	22
18 Constante de temps transitoire longitudinale en court-circuit τ_d'	22
19 Constante de temps subtransitoire longitudinale en court-circuit τ_d''	24
20 Constante de temps en court-circuit de l’induit τ_a	24
21 Temps d’accélération τ_J	24
22 Énergie cinétique réduite H	26
23 Courant d’excitation nominal I_{fn}	26
24 Variation nominale de tension ΔU_n	26
SECTION QUATRE – DESCRIPTION DES ESSAIS ET DÉTERMINATION DES GRANDEURS DES MACHINES A PARTIR DE CES ESSAIS	
25 Essai de saturation à vide	26
26 Essai en court-circuit triphasé permanent	28
27 Détermination des grandeurs à partir des caractéristiques de saturation à vide et en court-circuit triphasé permanent	30
28 Essai de surexcitation à facteur de puissance nul	32

CONTENTS

	Page
FOREWORD	9
PREFACE	9
Clause	
SECTION ONE – SCOPE AND OBJECT	
1 Scope	13
2 Object	13
SECTION TWO – GENERAL	
3 General	13
SECTION THREE – TERMINOLOGY AND METHODS OF DETERMINATION	
4 Direct-axis synchronous reactance X_d	17
5 Short-circuit ratio K_c	17
6 Quadrature-axis synchronous reactance X_q	17
7 Direct-axis transient reactance X_d'	19
8 Direct-axis subtransient reactance X_d''	19
9 Quadrature-axis subtransient reactance X_q''	19
10 Negative-sequence reactance X_2	21
11 Negative-sequence resistance R_2	21
12 Zero-sequence reactance X_0	21
13 Zero-sequence resistance R_0	21
14 Potier reactance X_p	23
15 Armature and excitation winding direct-current resistance R_a and R_f	23
16 Positive sequence armature winding resistance R_1	23
17 Direct-axis transient open-circuit time constant $\tau_{d'0}$	23
18 Direct-axis transient short-circuit time constant τ_d'	23
19 Direct-axis subtransient short-circuit time constant τ_d''	25
20 Armature short-circuit time constant τ_a	25
21 Acceleration time τ_j	25
22 Stored energy constant H	27
23 Rated excitation current I_{fn}	27
24 Rated voltage regulation ΔU_n	27
SECTION FOUR—DESCRIPTION OF THE TESTS AND DETERMINATION OF MACHINE QUANTITIES FROM THESE TESTS	
25 No-load saturation test	27
26 Sustained three-phase short-circuit test	29
27 Determination of quantities from the no-load saturation and sustained three-phase short-circuit characteristics	31
28 Overexcitation test at zero power-factor	33

29	Détermination du courant d'excitation correspondant à la tension nominale et au courant d'induit à facteur de puissance nul (surexcitation)	32
30	Détermination de la réactance de Potier à partir des caractéristiques à vide et en court-circuit triphasé permanent et du courant d'excitation correspondant à la tension nominale et au courant d'induit nominal à facteur de puissance nul (surexcitation)	34
31	Détermination du courant d'excitation nominal au moyen du diagramme de Potier	36
32	Détermination du courant d'excitation nominale au moyen du diagramme de l'ASA	38
33	Détermination du courant d'excitation nominal au moyen du diagramme suédois	40
34	Essai d'excitation négative	42
35	Détermination de X_q à partir de l'essai d'excitation négative	42
36	Essai à faible glissement	44
37	Détermination de X_q à partir de l'essai à faible glissement	46
38	Essai en charge avec mesure de l'angle de charge δ	48
39	Détermination de X_q à partir de l'essai en charge avec mesure de l'angle de charge	48
40	Essai de court-circuit triphasé brusque	48
41	Détermination des grandeurs à partir de l'essai de court-circuit triphasé brusque	54
42	Essai de rétablissement de la tension	58
43	Détermination des grandeurs à partir de l'essai de rétablissement de la tension	58
44	Essai d'application de tension pour les positions longitudinale et transversale de l'axe des pôles du rotor par rapport à l'axe du champ d'induit	60
45	Détermination des grandeurs à partir de l'essai d'application de tension pour les positions longitudinale et transversale de l'axe des pôles du rotor par rapport à l'axe du champ de l'induit du rotor	60
46	Essai d'application de tension dans une position quelconque du rotor	62
47	Détermination des grandeurs à partir de l'essai d'application de tension dans une position quelconque du rotor	62
48	Essai de court-circuit permanent entre deux phases	64
49	Détermination des grandeurs à partir de l'essai de court-circuit permanent entre deux phases	64
50	Essai de rotation inverse	66
51	Détermination des grandeurs à partir de l'essai de rotation inverse	66
52	Essai d'alimentation en monophasé des trois phases	66
53	Détermination des grandeurs à partir de l'essai d'alimentation en monophasé des trois phases	68
54	Essai en court-circuit permanent entre deux conducteurs de phase et le point neutre	68
55	Détermination des grandeurs à partir de l'essai de court-circuit permanent entre deux conducteurs de phase et le point neutre	70
56	Mesures de la résistance en courant continu d'un enroulement au moyen de la méthode du voltmètre et de l'ampèremètre ou de la méthode du pont	70
57	Détermination de la résistance en courant continu d'un enroulement à partir des mesures en courant continu par la méthode du voltmètre et de l'ampèremètre ou par la méthode du pont	72
58	Essai de décroissance du courant d'excitation avec l'enroulement d'induit à circuit ouvert	74
59	Détermination de τ_{do} à partir de l'essai de décroissance du courant d'excitation avec l'enroulement d'induit à circuit ouvert	74
60	Essai de décroissance du courant d'excitation avec l'enroulement d'induit en court-circuit	74
61	Détermination de τ_d à partir de l'essai de décroissance du courant d'excitation avec l'enroulement d'induit en court-circuit	74
62	Essai d'oscillation du rotor suspendu à un câble	76
63	Détermination de τ_j et de H à partir de l'essai d'oscillation du rotor suspendu à un câble	76
64	Essai d'oscillation avec pendule auxiliaire	78
65	Détermination de τ_j et de H à partir de l'essai d'oscillation avec pendule auxiliaire	78
66	Essai de ralentissement à vide	78
67	Détermination de τ_j et de H à partir de l'essai de ralentissement à vide	78

29	Determination of the excitation current corresponding to the rated voltage and rated armature current at zero power-factor (overexcitation)	33
30	Determination of Potier reactance from the no-load and sustained three-phase short-circuit characteristics and the excitation current corresponding to the rated voltage and rated armature current at zero power-factor (overexcited)	35
31	Determination of the rated excitation current by the Potier diagram	37
32	Determination of the rated excitation current by the ASA diagram	39
33	Determination of the rated excitation current by the Swedish diagram	41
34	Negative excitation test	43
35	Determination of X_q from the negative excitation test	43
36	Low slip test	45
37	Determination of X_q from the low slip test	47
38	On-load test measuring the load angle δ	49
39	Determination of X_q from the on-load test measuring the load angle	49
40	Sudden three-phase short-circuit test	49
41	Determination of quantities from the sudden three-phase short-circuit test	55
42	Voltage recovery test	59
43	Determination of quantities from the voltage recovery test	59
44	Applied voltage test with the rotor in direct and quadrature axis positions with respect to the armature winding field axis	61
45	Determination of quantities from the applied voltage test with the rotor in direct and quadrature axis positions with respect to the armature winding field axis	61
46	Applied voltage test with the rotor in any arbitrary position	63
47	Determination of quantities from the applied voltage test with the rotor in any arbitrary position	63
48	Line-to-line sustained short-circuit test	65
49	Determination of quantities from the line-to-line sustained short-circuit test	65
50	Negative-phase sequence test	67
51	Determination of quantities from the negative-phase sequence test	67
52	Single-phase voltage application to the three-phase test	67
53	Determination of quantities from the single-phase voltage application to the three-phase test	69
54	Line-to-line and to neutral sustained short-circuit test	69
55	Determination of quantities from the line-to-line and to neutral sustained short-circuit test	71
56	Direct-current winding resistance measurements by the voltmeter and ammeter method and by the bridge method	71
57	Determination of winding d.c. resistance from the direct-current winding resistance measurements by the voltmeter and ammeter and by the bridge methods	73
58	Field current decay test with the armature winding open-circuited	75
59	Determination of τ_{do} from the field current decay test with the armature winding open-circuited	75
60	Field current decay test with the armature winding short-circuited	75
61	Determination of τ_d from the field current decay test with the armature winding short-circuited	75
62	Suspended rotor oscillation test	77
63	Determination of τ_f and H from suspended rotor oscillation test	77
64	Auxiliary pendulum swing test	79
65	Determination of τ_f and H from the auxiliary pendulum swing test	79
66	No-load retardation test	79
67	Determination of τ_f and H from the no-load retardation test	79

68	Essai de ralentissement en charge de machines accouplées mécaniquement avec la machine synchrone fonctionnant en moteur	80
69	Détermination de τ_j et de H de machines accouplées mécaniquement à partir de l'essai de ralentissement en charge avec la machine synchrone fonctionnant en moteur	80
70	Essai d'accélération après suppression brusque de la charge avec la machine fonctionnant en génératrice	80
71	Détermination de τ_j et de H de machines accouplées mécaniquement à partir de l'essai d'accélération après suppression brusque de la charge avec la machine fonctionnant en génératrice	82
72	Détermination des grandeurs au moyen de calculs utilisant des grandeurs connues par des essais	82
TABLEAU		84

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60034-4:1967

Withdrawn

68	On-load retardation test of mechanically coupled machines with the synchronous machine operating as a motor	81
69	Determination of τ_j and H of mechanically coupled machines from the on-load retardation test with the synchronous machine operating as a motor	81
70	Acceleration after a load drop test with the machine operating as a generator	81
71	Determination of τ_j and H of mechanically coupled machines from the acceleration after a load drop test with the machine operating as a generator	83
72	Determination of quantities by calculations using known test quantities	83
TABLE		85

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60034-4:1967

Without2M

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**RECOMMANDATIONS
POUR LES MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES
(A L'EXCLUSION DES MACHINES POUR VÉHICULES DE TRACTION)**

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

PRÉAMBULE

- 1) Les décisions ou accords officiels de la C E I 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 C E I 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 C E I 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

Les présentes recommandations ont été établies par le Sous-Comité 2G Grandeurs des machines synchrones, du Comité d'Etudes N° 2 de la CEI Machines tournantes

Elles font partie d'une série de recommandations traitant des machines électriques tournantes, et dont les autres parties sont

Première partie: Recommandations pour les machines électriques tournantes, éditée comme Publication 34-1 de la CEI

Deuxième partie: Recommandations relatives à la détermination du rendement des machines électriques tournantes, éditée comme Publication 34-2 de la CEI

Troisième partie: Valeurs nominales et caractéristiques des turbo-alternateurs triphasés à 50 Hz, éditée comme Publication 34-3 de la CEI

A la suite des discussions qui eurent lieu pendant les réunions tenues à la Nouvelle-Delhi en 1960, à Bucarest en 1962 et à Leningrad en 1963, un projet fut soumis à l'approbation des Comités nationaux suivant la Règle des Six Mois en août 1964

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**RECOMMENDATIONS FOR ROTATING ELECTRICAL MACHINERY
(EXCLUDING MACHINES FOR TRACTION VEHICLES)**

Part 4 : Methods for determining synchronous machine quantities from tests

FOREWORD

- 1) The formal decisions or agreements of the I E C 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 I E C expresses the wish that all National Committees having as yet no national rules, when preparing such rules, should use the I E C 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

These Recommendations have been prepared by Sub-Committee 2G, Synchronous Machine Quantities, of IEC Technical Committee No 2, Rotating Machinery

They constitute part of a series of recommendations dealing with rotating electrical machinery, other parts being

Part 1 Recommendations for Rotating Electrical Machinery, issued as IEC Publication 34-1

Part 2 Recommendations on Determination of Efficiency of Rotating Electrical Machinery, issued as IEC Publication 34-2

Part 3 Ratings and Characteristics of 3-phase 50 Hz (c/s) Turbine-type Generators, issued as IEC Publication 34-3

After discussions during the meetings held in New Delhi in 1960, in Bucharest in 1962 and in Leningrad in 1963, a draft was submitted to the National Committees for approval under the Six Months' Rule in August 1964

Les pays suivants se sont prononcés explicitement en faveur de la publication de cette quatrième partie:

Afrique du Sud	Japon
Allemagne	Pays-Bas
Australie	Pologne
Autriche	Portugal
Belgique	Royaume-Uni
Corée (République de)	Suède
Danemark	Suisse
Etats-Unis d'Amérique	Tchécoslovaquie
France	Turquie
Inde	Union des Républiques Socialistes Soviétiques
Israël	Yougoslavie

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60034-4:1967

Withdrawn

The following countries voted explicitly in favour of publication of Part 4:

Australia	Netherland
Austria	Poland
Belgium	Portugal
Czechoslovakia	South Africa
Denmark	Sweden
France	Switzerland
Germany	Turkey
India	Union of Soviet Socialist Republics
Israel	United Kingdom
Japan	United States of America
Korea (Republic of)	Yugoslavia

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60034-4:1967

Withdrawing

RECOMMANDATIONS POUR LES MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES (A L'EXCLUSION DES MACHINES POUR VÉHICULES DE TRACTION)

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

SECTION UN – DOMAINE D'APPLICATION ET OBJET

1 Domaine d'application

Les présentes recommandations sont applicables aux machines synchrones triphasées de puissance nominale égale à 1 kVA et au-dessus et dont la fréquence nominale n'est ni supérieure à 400 Hz, ni inférieure à 15 Hz

Les méthodes d'essai ne sont pas destinées à être appliquées à des machines synchrones spéciales, telles que les machines à inducteurs à aimants permanents, les machines du type magnéto, etc

Bien que d'une façon générale les essais s'appliquent aux machines dépourvues de bagues d'excitation, certaines différences peuvent alors exister et des précautions spéciales devront être prises

2 Objet

L'objet de ces recommandations est d'établir des méthodes pour la détermination des grandeurs caractéristiques des machines synchrones triphasées en partant de résultats d'essais

Il n'entre pas dans les intentions de ces recommandations qu'elles puissent être interprétées 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

SECTION DEUX – GÉNÉRALITÉS

3 Généralités

Les essais en vue de la détermination des grandeurs des machines synchrones doivent être effectués sur la machine entièrement en bon état, tous les appareils de réglage automatique étant mis hors circuit

A moins qu'il n'en soit spécifié autrement, les essais sont exécutés à la vitesse de rotation nominale

3.1 Les appareils de mesure indicateurs et leurs accessoires, tels que les transformateurs de mesure, shunts et ponts utilisés au cours des essais doivent, à moins d'indication différente, appartenir à une classe de précision de 1,0 au plus (Publication 51 de la CEI - Recommandations pour les appareils de mesure électriques indicateurs et leurs accessoires). Les appareils utilisés pour la détermination des résistances en courant continu doivent appartenir à une classe de précision de 0,5 au plus

Il n'a pas été jugé utile pour le moment de spécifier la classe de précision pour le matériel oscillographique de mesure. Celui-ci doit cependant être choisi autant que possible en tenant compte de la fréquence nominale de la machine à essayer, de manière que les lectures soient faites sur une portion rectiligne de la caractéristique de l'amplitude de vibration de l'équipage mobile en fonction de la fréquence

La mesure de la vitesse de rotation des machines synchrones peut s'effectuer au moyen d'une méthode stroboscopique ou au moyen de tachymètres (mécaniques ou électriques)

Au lieu de mesurer la vitesse de rotation, il est permis de mesurer la fréquence au moyen d'un fréquencemètre lorsque la machine tourne à la vitesse de synchronisme soit par ses propres moyens, soit entraînée par une autre machine

RECOMMENDATIONS FOR ROTATING ELECTRICAL MACHINERY (EXCLUDING MACHINES FOR TRACTION VEHICLES)

Part 4 : Methods for determining synchronous machine quantities from tests

SECTION ONE – SCOPE AND OBJECT

1 Scope

The Recommendations apply to three-phase synchronous machines of 1 kVA rating and larger with rated frequency of not more than 400 Hz(c/s) and not less than 15 Hz(c/s)

The test methods are not intended to apply to special synchronous machines such as permanent-magnet field machines, inductor type machines, etc

While the tests also apply in general to brushless machines, certain variations do exist and special precautions should be taken

2 Object

The object of these Recommendations is to establish methods for determining characteristic quantities of three-phase synchronous machines from tests

It is not intended that the Recommendations should be interpreted as requiring the carrying out of any or all of the tests described therein on any given machine. The particular tests to be carried out shall be subject to a special agreement

SECTION TWO – GENERAL

3 General

Tests for determining synchronous machine quantities should be conducted on a completely sound machine, all the devices for automatic regulation being switched off

Unless otherwise stated, the tests are conducted at the rated speed of rotation

- 3.1 Indicating measuring instruments and their accessories, such as measuring transformers, shunts and bridges used during tests, unless otherwise stated, should have an accuracy class not above 1.0 (IEC Publication 51, Recommendations for Indicating Electrical Measuring Instruments and their Accessories). The instruments used for determining d.c. resistances should have an accuracy class not above 0.5

It is not intended at this stage to specify an accuracy class for the oscillographic measuring equipment. This should, however, be chosen, having due regard to the rated frequency of the machine to be tested, so that the readings are taken in a linear portion of the vibrator amplitude against frequency characteristic

The measurement of the speed of rotation, of synchronous machines may be conducted by means of a stroboscopic method or by using tachometers (mechanical or electrical)

Instead of measuring the speed of rotation, it is permissible to measure frequency by means of a frequency meter when the machine is running synchronously with any other machine or running on its own

- 3 2 La température des enroulements doit être mesurée dans tous les essais où les grandeurs à déterminer dépendent de la température, ou bien lorsque la connaissance de cette dernière est nécessaire pour des questions de sécurité de la machine pendant les essais

Lorsqu'il y a risque que les températures atteignent transitoirement des valeurs anormalement élevées, il est recommandé d'entreprendre les essais seulement après que la machine ait fonctionné à vide avec son refroidissement normal ou ait été maintenue à l'arrêt suffisamment longtemps pour obtenir une faible température initiale. On devra également soigneusement surveiller ou prédéterminer les températures afin de pouvoir suspendre l'essai avant qu'elles deviennent excessives

- 3 3 Le mode de connexion de l'enroulement de la machine pendant l'essai doit, en général, être le même qu'en utilisation normale

La détermination de toutes les grandeurs est faite en considérant que l'enroulement de la machine est couplé en étoile (à moins que des connexions spéciales, par exemple en triangle ouvert, soient spécifiées). Si l'enroulement d'induit est couplé normalement en triangle, la valeur obtenue pour les grandeurs conformément aux présentes recommandations correspond à un enroulement équivalent couplé en étoile

- 3 4 Toutes les grandeurs et caractéristiques sont données en valeurs « réduites », en considérant les valeurs nominales de la tension (U_n) et de la puissance apparente (S_n) comme les valeurs de base. Dans ce cas, le courant de base sera

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} U_n}$$

et l'impédance de base

$$Z_n = \frac{U_n^2}{S_n} = \left[\frac{S_n}{3I_n^2} \right] \Omega$$

Si cela est jugé plus facile, les calculs intermédiaires peuvent être effectués sur les grandeurs physiques avec conversion ultérieure de la grandeur en sa valeur réduite. Il est recommandé d'exprimer les temps en secondes. Dans les calculs des caractéristiques et pour l'établissement des diagrammes, c'est le courant d'excitation correspondant à la tension nominale sur la caractéristique à vide qui doit être pris comme valeur de base du courant d'excitation.

Si la machine possède plusieurs valeurs nominales, celles qui ont été choisies comme valeurs de base doivent être indiquées.

A moins d'indication différente, le système mentionné ci-dessus a été adopté dans les présentes recommandations. Les lettres minuscules désignent les grandeurs exprimées en valeur réduite et les majuscules désignent les grandeurs physiques.

- 3 5 Dans les formules données dans les présentes recommandations pour la détermination des réactances des machines synchrones, la résistance directe de l'induit est, à moins d'indication contraire, considérée comme étant négligeable.

Lorsque la résistance directe de l'induit est supérieure à 0,2 fois la résistance mesurée, les formules doivent être considérées comme approchées.

- 3 6 Les définitions de la plupart des grandeurs et de leurs méthodes expérimentales de détermination, telles qu'elles figurent dans ces recommandations, reposent sur la théorie largement acceptée des deux axes des machines synchrones, comportant la représentation approximative de tous les circuits s'ajoutant à l'enroulement d'excitation et aux circuits fixes qui s'y rapportent au moyen de deux circuits équivalents, l'un le long de l'axe longitudinal, et l'autre le long de l'axe transversal, en négligeant les résistances de l'induit ou en tenant compte seulement d'une manière approximative. Il résulte de cette représentation approximative d'une machine que dans les présentes recommandations les grandeurs suivantes interviennent pour l'étude des phénomènes transitoires : trois réactances (synchrone, transitoire et subtransitoire) et deux constantes de temps (transitoire et subtransitoire),

- 3 2 The temperature of the windings is measured in those tests when the quantities to be determined depend on it or when knowledge of it is required by the safety considerations of the machine during tests

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

- 3 3 During the test, the machine winding connection as a rule should be as for normal working

The determination of all quantities is made considering star connection of the armature winding (unless special connections such as open delta are specified) If the armature winding is actually delta connected, the values of the quantities obtained in accordance with these Recommendations correspond to an equivalent star connected winding

- 3 4 All the quantities and characteristics should be designated in per unit values considering rated values of the voltage (U_n), and the apparent power (S_n) as basic ones In this case basic current will be:

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} U_n}$$

and basic impedance

$$Z_n = \frac{U_n^2}{S_n} = \left[\frac{S_n}{3I_n^2} \right] \Omega$$

The intermediate calculations, if it is convenient, may be performed in physical values with subsequent conversion to the quantity in per unit value It is recommended to express time in seconds In the calculations of characteristics, and when drawing diagrams, excitation current corresponding to the rated voltage on the no-load curve is taken as the basic value of the excitation current

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

Unless otherwise stated, the above-mentioned system is accepted in these Recommendations Small letters designate the quantities in per unit values, and capital letters designate them in physical values

- 3 5 In the formulae given in these Recommendations for determining synchronous machine reactances, the positive sequence armature resistance, unless otherwise stated, is considered to be negligible

When the positive sequence armature resistance constitutes more than 0.2 of the measured reactance, the formulae must be considered as approximate

- 3 6 The definitions of the majority of quantities and their experimental methods of determination, as given in these Recommendations, correspond to the widely accepted two-axis theory of synchronous machines with approximate representation of all circuits additional to the field winding, and stationary circuits relative to it, by two equivalent circuits, one along the direct axis and the other along the quadrature axis, neglecting armature resistance or taking it into consideration only approximately

As a consequence of this approximate machine representation, three reactances (synchronous, transient and sub-transient) and two time constants (transient and sub-transient) are considered in these Recommendations for transient phenomena studies along the direct axis, two reactances

dans l'axe longitudinal, deux réactances (synchrone et subtransitoire) et une seule constante de temps subtransitoire dans l'axe transversal, et la constante de temps en court-circuit de l'induit. Ces constantes de temps sont basées sur l'hypothèse d'une décroissance exponentielle des composantes des grandeurs impliquées (courants, tensions, etc.). Si la courbe des valeurs mesurées de la composante examinée ne décroît pas selon une exponentielle pure, comme par exemple dans le cas d'une machine à rotor massif, la constante de temps devra normalement être interprétée comme le temps nécessaire pour que la composante tombe à $1/e \approx 0,368$ de sa valeur initiale. Les courbes de décroissance exponentielle correspondant à ces constantes de temps doivent être considérées comme des courbes équivalentes qui remplacent les courbes résultant des mesures effectives.

- 3.7 Les grandeurs des machines synchrones varient avec la saturation des circuits magnétiques. Dans les calculs pratiques, on utilise aussi bien les valeurs saturées que les valeurs non saturées. Dans ces recommandations, sauf indications contraires, il convient d'entendre par « valeur saturée » d'une réactance ou d'une résistance sa valeur pour la tension nominale (induit) et par « valeur non saturée » sa valeur pour le courant nominal (induit), exception faite de la réactance synchrone qui n'est pas définie en régime saturé.
- La valeur d'une telle grandeur à la tension nominale (induit) correspond à l'état magnétique de la machine au moment du court-circuit brusque de l'enroulement induit à partir des conditions de fonctionnement à vide sous tension nominale et à vitesse nominale.
- La valeur d'une telle grandeur du courant nominal (induit) correspond à un état dans lequel la valeur de l'onde fondamentale alternative de la composante du courant d'induit, qui détermine cette grandeur particulière, est égale au courant nominal.

SECTION TROIS – TERMINOLOGIE ET MÉTHODES D'ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

- 4 **Réactance synchrone longitudinale X_d**
- Quotient de la valeur en régime établi du terme fondamental de la composante de la tension d'induit produite par le flux longitudinal total dû au courant d'induit longitudinal, par la valeur du terme fondamental de ce courant, la machine tournant à sa vitesse nominale.
- 4.1 La réactance synchrone longitudinale X_d correspondant à l'état non saturé est déterminée (voir article 27) en partant de la caractéristique de saturation à vide (voir paragraphe 25.1) et de la caractéristique en court-circuit triphasé permanent (voir paragraphe 26.1).
- 5 **Rapport de court-circuit K_c**
- Le rapport de court-circuit est le rapport du courant d'excitation pour la tension nominale de l'induit à vide au courant d'excitation pour le courant nominal d'induit en court-circuit triphasé permanent, la machine tournant à sa vitesse nominale.
- 5.1 Le rapport de court-circuit est déterminé (voir paragraphe 27.1) en partant de la caractéristique de saturation à vide (voir paragraphe 25.1) et de la caractéristique en court-circuit triphasé permanent (voir paragraphe 26.1).
- 6 **Réactance synchrone transversale X_q**
- Quotient de la valeur en régime établi du terme fondamental de la composante de la tension d'induit produite par le flux transversal total dû au courant d'induit transversal, par la valeur du terme fondamental de ce courant, la machine tournant à sa vitesse nominale.

(synchronous and sub-transient) and one time constant (sub-transient) along the quadrature axis, and the armature short-circuit time constant

These time constants are based on the assumption of an exponential decrease of the particular components of quantities involved (currents, voltages, etc). If the plot of the measured component under consideration does not decrease as a pure exponential, as in the case, for example, of a solid rotor machine, the time constant should normally be interpreted as the time required for the component to decrease to $1/e \approx 0.368$ of its initial value. Exponential decay curves corresponding to these time constants should be considered as equivalent curves replacing the actual measured ones.

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

In these Recommendations, unless otherwise stated, the “saturated value” of reactances and resistances will be taken as the rated (armature) voltage value of the quantity, and their “unsaturated value” will be taken as the rated (armature) current value, except synchronous reactance which is not defined as saturated.

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

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

SECTION THREE – TERMINOLOGY AND METHODS OF DETERMINATION

4 **Direct-axis synchronous reactance X_d**

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

- 4.1 The direct-axis synchronous reactance X_d corresponding to the unsaturated state is determined (see Clause 27) from the no-load saturation (see Sub-clause 25.1) and sustained three-phase short-circuit (see Sub-clause 26.1) characteristics.

5 **Short-circuit ratio K_c**

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

- 5.1 The short-circuit ratio is determined (see Sub-clause 27.1) from the no-load saturation (see Sub-clause 25.1) and sustained three-phase short-circuit (see Sub-clause 26.1) characteristics.

6 **Quadrature-axis synchronous reactance X_q**

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

- 6 1 La réactance synchrone transversale est déterminée au moyen des méthodes suivantes
- a) essai d'excitation négative (voir articles 34 et 35),
 - b) essai à faible glissement (voir articles 36 et 37),
 - c) essai de charge avec mesure de l'angle de charge (voir articles 38 et 39)

Les deux premières méthodes sont préférentielles

7 Réactance transitoire longitudinale X_d

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

- 7 1 La réactance transitoire longitudinale est déterminée au moyen des méthodes suivantes

- a) court-circuit triphasé brusque (voir articles 40 et 41),
- b) rétablissement de la tension (voir articles 42 et 43),
- c) par le calcul en partant des valeurs de X_d' (voir article 4), de τ_{do} (voir article 17) et de τ_d (voir article 18) déterminées par des essais et en effectuant ce calcul au moyen de la formule donnée à l'article 72

La méthode du court-circuit triphasé brusque est préférentielle. Elle permet de déterminer les valeurs saturée et non saturée de X_d

8 Réactance subtransitoire longitudinale X_d''

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

- 8 1 La réactance subtransitoire longitudinale est déterminée au moyen des méthodes suivantes

- a) court-circuit triphasé brusque (voir article 40 et paragraphe 41 1),
- b) rétablissement de la tension (voir article 42 et paragraphe 43 1),
- c) applications de tension dans les deux positions longitudinale et transversale de l'axe des pôles par rapport à l'axe du champ de l'induit (voir articles 44 et 45),
- d) applications de tension dans une position unique arbitraire de l'axe polaire (voir articles 46 et 47)

La méthode du court-circuit triphasé brusque est la méthode préférée. Elle permet de déterminer les valeurs saturée et non saturée de X_d

Les méthodes d'application de la tension (c et d) peuvent être utilisées dans le cas de valeur non saturée de X_d'' , mais elles ne sont généralement pas applicables dans le cas de valeur saturée en raison des intensités élevées nécessaires et de l'échauffement possible des pièces massives

9 Réactance subtransitoire 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 transversale du courant d'induit, la machine tournant à sa vitesse nominale

6 1 Quadrature-axis synchronous reactance is determined by the following methods:

- a) negative excitation (see Clauses 34 and 35),
- b) low slip (see Clauses 36 and 37),
- c) on load measurement of the load angle (see Clauses 38 and 39)

The first two methods are preferred

7 Direct-axis transient reactance X_d

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

7 1 Direct-axis transient reactance is determined by the following methods

- a) sudden three-phase short-circuit (see Clauses 40 and 41),
- b) voltage recovery (see Clauses 42 and 43),
- c) calculation from the test values of X_d (see Clause 4), τ_{d0} (see Clause 17) and τ_d (see Clause 18) by the formula given in Clause 72

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

8 Direct-axis subtransient reactance X_d'

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

8 1 Direct-axis subtransient reactance is determined by the following methods

- a) sudden three-phase short-circuit (see Clause 40 and Sub-clause 41 1),
- b) voltage recovery (see Clause 42 and Sub-clause 43 1),
- c) applied voltage with the rotor in the direct and quadrature axis positions with respect to the armature winding field axis (see Clauses 44 and 45),
- d) applied voltage with an arbitrary position of the pole axis (see Clauses 46 and 47)

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

The applied-voltage methods (c and d) may be used for the unsaturated value of X_d' , but are usually not practicable for the saturated value because of the large current required and possible overheating of solid parts

9 Quadrature-axis subtransient 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 armature flux, and the value of the simultaneous change in fundamental a c component of quadrature-axis armature current, the machine running at rated speed

- 9 1 La réactance subtransitoire transversale est déterminée au moyen des méthodes suivantes
- application de tension dans les deux positions de l'axe polaire (voir article 44 et paragraphe 45 1),
 - application de tension dans une position arbitraire de l'axe polaire (voir article 46 et paragraphe 47 1)

Ces deux méthodes sont pratiquement équivalentes et sont employées pour déterminer la valeur non saturée. Ces méthodes ne sont généralement pas applicables pour l'obtention de la valeur saturée en raison de l'intensité élevée nécessaire et de l'échauffement possible des pièces massives.

10 Réactance inverse X_2

Quotient du terme fondamental de la composante réactive de la tension d'induit inverse due à un courant d'induit inverse purement sinusoïdal à fréquence nominale, par la valeur de ce courant, la machine tournant à sa vitesse nominale.

Note – Une valeur différente peut être obtenue pour cette réactance si l'on utilise le terme fondamental d'un courant contenant également des harmoniques. Cependant, la valeur correcte de X_2 , retenue dans cette publication, est celle obtenue à partir d'un courant sinusoïdal.

11 Résistance inverse R_2

Quotient du terme fondamental de la composante active de la tension d'induit inverse due à un courant d'induit inverse purement sinusoïdal à fréquence nominale, par la valeur de ce courant, la machine tournant à sa vitesse nominale.

Note – Une valeur différente peut être obtenue pour cette résistance si l'on utilise le terme fondamental d'un courant contenant également des harmoniques.

11 1 La réactance et la résistance inverses sont déterminées au moyen des méthodes suivantes

- court-circuit permanent entre deux phases (voir articles 48 et 49 et paragraphe 49 1),
- essai de rotation inverse (voir articles 50 et 51),
- la réactance inverse peut également être déterminée par le calcul en partant des valeurs trouvées aux essais de X_d (voir article 8) et de X_q (voir article 9), le calcul est effectué au moyen de l'équation donnée au paragraphe 72 1.

La méthode du court-circuit permanent entre deux phases est préférentielle.

12 Réactance homopolaire X_0

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

13 Résistance homopolaire R_0

Quotient du terme fondamental de la composante active de la tension d'induit homopolaire due à la présence du terme fondamental du courant d'induit homopolaire à fréquence nominale, par la valeur de ce courant, la machine tournant à sa vitesse nominale.

13 1 La réactance et la résistance homopolaires sont déterminées au moyen des essais suivants

- application d'une tension monophasée aux trois phases connectées en série (en triangle ouvert) ou en parallèle (voir articles 52 et 53),

9 1 The quadrature axis subtransient reactance is determined by the following methods:

- a) applied voltage with the rotor in the direct and quadrature axis positions with respect to the armature winding field axis (see Clause 44 and Sub-clause 45 1),
- b) applied voltage with the pole axis in any arbitrary position (see Clause 46 and Sub-clause 47 1)

Both these methods are practically equivalent and may be used to determine the unsaturated value. These methods are usually not practicable for the determination of the saturated value because of the large current required and possible overheating of solid parts.

10 **Negative-sequence reactance X_2**

The quotient of the reactive fundamental component of negative-sequence armature voltage due to sinusoidal negative-sequence armature current of rated frequency, and the value of this current, the machine running at rated speed.

Note – A different value might be obtained for this reactance if the fundamental component of a current, which also contains harmonics, is used. The correct value of X_2 , however, is the one determined with sinusoidal current.

11 **Negative-sequence resistance R_2**

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

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

11 1 Negative-sequence reactance and resistance are determined by the following methods:

- a) line-to-line sustained short-circuit (see Clauses 48 and 49 and Sub-clause 49 1);
- b) negative-phase sequence (see Clauses 50 and 51),
- c) negative-sequence reactance may also be determined by calculation from the test values of X_d (see Clause 8) and X_q (see Clause 9), the calculation is made using the equation given in Sub-clause 72 1.

The line-to-line sustained short-circuit method is preferred.

12 **Zero-sequence reactance X_0**

The quotient of the reactive fundamental component of zero-sequence armature voltage, due to the presence of fundamental zero-sequence armature current of rated frequency, and this component of current, the machine running at rated speed.

13 **Zero-sequence resistance R_0**

The quotient of the in-phase fundamental component of zero-sequence armature voltage, due to the presence of fundamental zero-frequency armature current of rated frequency, and the value of this current, the machine running at rated speed.

13 1 Zero-sequence reactance and resistance are determined by the following methods:

- a) single-phase voltage application to the three-phases connected in series (an open delta) or parallel (see Clauses 52 and 53),

- b) court-circuit permanent entre deux conducteurs de phase et le point neutre (voir articles 54 et 55 et paragraphe 55 1)

La méthode de l'application d'une tension monophasée aux trois phases connectées en série est préférentielle

14 **Réactance de Potier X_p**

Réactance de fuite équivalente utilisée à la place de la réactance de fuite d'induit pour déterminer l'excitation en charge par la méthode de Potier. Elle tient compte de la fuite supplémentaire de l'enroulement d'excitation en charge dans la zone de fonctionnement en surexcitation et est de ce fait plus élevée que la valeur effective de la réactance de fuite de l'induit

14 1 La réactance de Potier est déterminée suivant les indications de l'article 30

15 **Résistance en courant continu de l'induit et de l'enroulement R_a et R_f**

La résistance en courant continu d'un enroulement est mesurée au moyen des méthodes suivantes:

- a) voltmètre et ampèremètre (voir articles 56 et 57),
b) pont simple ou double (voir article 56 et paragraphe 57 1)

La méthode du pont simple n'est pas admissible pour la mesure des résistances inférieures à 1 ohm

16 **Résistance directe de l'enroulement d'induit R_p**

Quotient de la composante en phase de la tension directe d'induit correspondant aux pertes par effet Joule dans l'enroulement d'induit et aux pertes en charge supplémentaires dans les conducteurs dues à la composante directe du courant sinusoïdal d'induit, par ce courant, la machine tournant à sa vitesse nominale

16 1 La résistance directe de l'enroulement induit est mesurée conformément au paragraphe 72 2

17 **Constante de temps transitoire longitudinale à circuit ouvert τ_{do}**

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

17 1 La constante de temps transitoire longitudinale est déterminée au moyen des méthodes suivantes:

- a) décroissance du courant d'excitation avec enroulement d'induit ouvert (voir articles 58 et 59),
b) rétablissement de la tension (voir article 42 et paragraphe 43 2),
c) par le calcul en partant des valeurs trouvées aux essais de X_d (voir article 4), de X_d (voir article 7) et de τ_d (voir article 18) au moyen de la formule indiquée à l'article 72

La méthode de décroissance du courant d'excitation est préférentielle

18 **Constante de temps transitoire longitudinale en court-circuit τ_d**

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

- b) line-to-line and to neutral sustained short-circuit (see Clauses 54 and 55 and Sub-clause 55 1)

The method of single-phase voltage application to the three phases connected in series is preferred

14 **Potier reactance X_p**

An equivalent reactance used in place of the armature leakage reactance to calculate the excitation on load by means of the Potier method. It takes into account the additional leakage of the field winding on load and in the overexcited region and is greater than the real value of the armature leakage reactance

- 14 1 The Potier reactance is determined in accordance with Clause 30

15 **Armature and excitation winding direct-current resistance R_a and R_f**

Direct-current winding resistance is determined by the following methods

- a) voltmeter and ammeter (see Clauses 56 and 57);
b) single and double bridge (see Clause 56 and Sub-clause 57 1)

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

16 **Positive-sequence armature winding resistance R_1**

The quotient of the in-phase component of positive sequence armature voltage corresponding to direct-load losses in the armature winding and stray load losses in conductors, due to the sinusoidal positive sequence armature current, and of this current, the machine running at rated speed

- 16 1 The positive-sequence armature winding resistance is determined in accordance with Sub-clause 72 2

17 **Direct-axis transient open-circuit time constant τ_{do}**

The time required for the slowly changing component of the open-circuit armature 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 The direct-axis transient open-circuit time constant is determined by the following methods:

- a) field current decay with open-circuit armature winding (see Clauses 58 and 59),
b) voltage recovery (see Clause 42 and Sub-clause 43 2);
c) calculation from the test values of X_d (see Clause 4), X_d (see Clause 7) and τ_d (see Clause 18) by the formula given in Clause 72

The field current decay method is preferred

18 **Direct-axis transient short-circuit time constant τ_d**

The time required for the slowly changing component of direct-axis short-circuit armature 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

18 1 La constante de temps transitoire longitudinale en court-circuit est déterminée au moyen des méthodes suivantes

- a) court-circuit triphasé brusque (voir article 40 et paragraphe 41 2),
- b) décroissance du courant d'excitation avec l'enroulement induit en court-circuit (voir articles 60 et 61),
- c) par le calcul, en partant des valeurs trouvées aux essais de X_d (voir article 4), de X_d' (voir article 7) et de τ_{do} (voir article 17) au moyen de la formule indiquée à l'article 72

Si un essai de court-circuit brusque est exécuté pour déterminer X_d , τ_d doit alors être déterminé à partir du même essai. Dans tous les autres cas, la préférence doit être donnée à la méthode de décroissance du courant d'excitation avec l'enroulement induit en court-circuit

19 **Constante de temps subtransitoire longitudinale en court-circuit τ_d**

Temps nécessaire pour que la composante rapidement amortie du courant longitudinal dans l'induit en court-circuit, présente dans les toutes premières périodes qui suivent une variation brusque des conditions de fonctionnement, décroisse jusqu'à $1/e \approx 0,368$ fois sa valeur initiale, la machine tournant à sa vitesse nominale

19 1 La constante de temps subtransitoire longitudinale en court-circuit est déterminée au moyen de la méthode du court-circuit triphasé brusque (voir article 40 et paragraphe 41 3)

20 **Constante de temps en court-circuit de l'induit τ_a**

Temps nécessaire pour que la composante continue apériodique, présente dans le courant de court-circuit de l'induit, décroisse jusqu'à $1/e \approx 0,368$ fois sa valeur initiale à la suite d'une variation brusque des conditions de fonctionnement, la machine tournant à sa vitesse nominale

20 1 La constante de temps en court-circuit de l'induit est déterminée en partant de l'essai de court-circuit brusque au moyen des méthodes suivantes

- a) par la décroissance de la composante périodique du courant dans l'enroulement d'excitation (voir article 40 et paragraphe 41 4),
- b) par la décroissance des composantes apériodiques des courants dans les phases de l'enroulement induit (voir article 40 et paragraphe 41 5),
- c) par le calcul, en partant des valeurs trouvées aux essais de X_2 (voir article 10) et de R_a (voir article 15) au moyen de la formule indiquée au paragraphe 72 3

La méthode de la décroissance de la composante périodique du courant dans l'enroulement d'excitation est préférentielle

21 **Temps d'accélération τ_j**

Temps nécessaire pour amener les parties tournantes de la machine synchrone du repos à la vitesse nominale sous l'action d'un couple d'accélération constant et égal au quotient de la puissance active nominale par la vitesse angulaire nominale

Notes 1 – Pour les compensateurs synchrones, la puissance active nominale est remplacée par la puissance apparente nominale

2 – Lorsque le temps d'accélération est déterminé pour un groupe de machines accouplées mécaniquement, le couple d'accélération est calculé pour la puissance active et la vitesse angulaire nominales de la machine synchrone de base

18 1 The direct-axis transient short-circuit time constant is determined by the following methods:

- a) sudden three-phase short-circuit (see Clause 40 and Sub-clause 41 2);
- b) field current decay with armature winding short-circuited (see Clauses 60 and 61),
- c) calculation from the test values of X_d (see Clause 4), X_d' (see Clause 7) and τ_{do} (see Clause 17) by the formula given in Clause 72

If a sudden short-circuit test is performed for determining X_d , then τ_d should be determined from the same test. In all other cases preference is given to the field current decay method with the armature winding short-circuited.

19 **Direct-axis subtransient short-circuit time constant τ_d'**

The time required for the rapidly changing component, present during the first few cycles in the direct-axis short-circuit armature 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.

19 1 The direct-axis subtransient short-circuit time constant is determined by the sudden three-phase short-circuit method (see Clause 40 and Sub-clause 41 3).

20 **Armature short-circuit time constant τ_a**

The time required for the d.c. component present in the short-circuit armature 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.

20 1 The armature short-circuit time constant is determined from the sudden three-phase short-circuit test by the following methods:

- a) by decrease of the periodic (a.c.) component in the excitation winding current (see Clause 40 and Sub-clause 41 4),
- b) by decrease of the aperiodic (d.c.) components of the current in the armature winding phases (see Clause 40 and Sub-clause 41 5),
- c) calculation from the test values of X_2 (see Clause 10) and R_a (see Clause 15) by the formula given in Sub-clause 72 3.

The method of measurement of the decrease of periodic component in the excitation winding current is preferred.

21 **Acceleration time τ_J**

The time required to bring rotating parts of the synchronous machine from rest to rated speed, the accelerating torque being constant and equal to the quotient of the rated active power (output) and of the rated angular velocity.

Notes 1 – For synchronous condensers, the rated active power (output) is replaced by the rated apparent power.

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

22 Energie cinétique réduite H

Quotient de l'énergie cinétique accumulée dans le rotor tournant à sa vitesse nominale par la puissance apparente nominale

22 1 Le temps d'accélération d'une machine ou d'un groupe de machines et l'énergie cinétique réduite sont déterminés par les méthodes suivantes

- a) oscillation du rotor suspendu à un câble (voir articles 62 et 63),
- b) oscillation avec pendule auxiliaire (voir articles 64 et 65),
- c) ralentissement à vide (voir articles 66 et 67),
- d) ralentissement en charge avec la machine fonctionnant en moteur (voir articles 68 et 69),
- e) accélération après suppression brusque de la charge avec la machine fonctionnant en génératrice (voir articles 70 et 71)

Toutes les méthodes ci-dessus sont pratiquement équivalentes. L'utilisation d'une méthode ou d'une autre dépend du mode de réalisation et de la puissance nominale de la machine en essai

23 Courant d'excitation nominal I_{fn}

Courant circulant dans l'enroulement d'excitation lorsque la machine fonctionne à sa tension nominale, à son courant et à son facteur de puissance nominal et à sa vitesse nominale

23 1 Le courant d'excitation nominal est déterminé au moyen des méthodes suivantes

- a) mesure directe au cours d'un fonctionnement au régime nominal,
- b) graphiquement, en utilisant le diagramme vectoriel de Potier (voir article 31) ou le diagramme de l'ASA (voir article 32) ou le diagramme suédois (voir article 33)

La méthode de la mesure directe est préférentielle, mais les méthodes graphiques lui sont pratiquement équivalentes

24 Variation nominale de tension ΔU_n

Variation de la tension aux bornes de la génératrice lorsque le fonctionnement au régime nominal est remplacé par une marche à vide à la même excitation et à la même vitesse de rotation

La variation nominale de tension est déterminée au moyen des méthodes suivantes

- a) mesure directe;
- b) graphiquement, à partir de la caractéristique à vide (voir paragraphe 25 1) et du courant d'excitation nominal (voir article 23 et paragraphe 23 1) déterminés par des essais

SECTION QUATRE – DESCRIPTION DES ESSAIS ET DÉTERMINATION DES GRANDEURS DES MACHINES A PARTIR DE CES ESSAIS

25 Essai de saturation à vide

L'essai de saturation à vide est effectué

- a) en entraînant la machine à essayer en génératrice au moyen d'un moteur approprié,
- b) en faisant tourner la machine en moteur à vide au moyen d'une source de tension triphasée symétrique,
- c) pendant le ralentissement de la machine essayée

22 **Stored energy constant H**

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

22 1 The acceleration time of a machine or groups of machines and the stored energy constant are determined by the following methods:

- a) suspended rotor oscillation (see Clauses 62 and 63),
- b) auxiliary pendulum swing (see Clauses 64 and 65),
- c) no-load retardation (see Clauses 66 and 67),
- d) on-load retardation with the machine operating as a motor (see Clauses 68 and 69)
- e) acceleration after sudden unloading with the machine operating as a generator (see Clauses 70 and 71)

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

23 **Rated excitation current I_{fn}**

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

23 1 The rated excitation current is determined by the following methods:

- a) direct measurement during operation under rated conditions,
- b) graphically, by Potier's vector diagram (see Clause 31) or by the ASA diagram (see Clause 32) or by the Swedish diagram (see Clause 33)

The method of direct measurement is preferred, but the graphical methods are practically equivalent to it.

24 **Rated voltage regulation ΔU_n**

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

The rated voltage regulation is determined by the following methods:

- a) direct measurement;
- b) graphically, from the no-load characteristic (see Sub-clause 25 1) and the rated excitation current (see Clause 23 and Sub-clause 23 1) obtained from tests

SECTION FOUR – DESCRIPTION OF THE TESTS AND DETERMINATION OF QUANTITIES FROM THESE TESTS

25 **No-load saturation test**

The no-load saturation test is conducted:

- a) by driving the tested machine as a generator by some prime-mover,
- b) by running the tested machine as a motor without shaft load from a source of alternating symmetrical three-phase voltage,
- c) during retardation of the tested machine

Pendant l'essai à vide, le courant d'excitation, la tension aux bornes et la fréquence (ou la vitesse de rotation) doivent être relevés simultanément. Pour effectuer l'essai à vide, la variation du courant d'excitation doit s'effectuer par échelons progressifs en allant des tensions les plus élevées vers les tensions les plus basses, les points étant répartis uniformément, autant que possible, l'essai doit être commencé à la tension qui correspond à l'excitation de pleine charge, et au minimum à 1,3 fois la tension nominale de la machine essayée, et être poursuivi jusqu'à 0,2 fois cette tension nominale, à moins que la tension résiduelle ne soit plus élevée.

Lorsque le courant d'excitation est réduit à zéro, la tension résiduelle est mesurée.

Si l'essai de saturation à vide est effectué en faisant tourner la machine synchrone en moteur à vide, il est nécessaire de mesurer, en plus des grandeurs mentionnées ci-dessus, également le courant dans l'induit. A chaque échelon de tension, plusieurs lectures doivent être faites afin de déterminer la valeur nominale de ce courant qui correspond à un facteur de puissance égal à l'unité.

L'essai de saturation à vide pendant le ralentissement de la machine essayée peut être effectué avec la précision convenable, pourvu que son taux de décélération ne soit pas supérieur à 0,04 de la vitesse nominale par seconde.

Si la machine essayée a un taux de décélération supérieur à 0,02 fois la vitesse nominale par seconde, son excitation doit être fournie par une source séparée, de manière à maintenir une excitation stable pendant l'essai. Avant de séparer la machine du réseau, celle-ci est excitée à la tension la plus élevée jugée nécessaire, c'est-à-dire à celle qui correspond à l'excitation de pleine charge, et au minimum à 1,3 fois sa tension nominale. L'excitation est ensuite réduite par échelons et, à chaque échelon, des lectures de la tension d'induit et de la vitesse (fréquence) sont faites simultanément, le courant d'excitation restant constant. L'essai de ralentissement peut être effectué à plusieurs reprises en vue d'obtenir tous les échelons nécessaires.

- 25 1 La caractéristique de saturation à vide – relation entre la tension aux bornes de l'enroulement d'induit à circuit ouvert et le courant d'excitation à la vitesse (fréquence) nominale – est déduite des données de l'essai à vide. Si, en raison d'une tension résiduelle élevée, la caractéristique à vide coupe l'axe des ordonnées au-dessus de l'origine, il est nécessaire d'introduire une correction. A cet effet, la partie rectiligne de la courbe à vide est prolongée jusqu'à son point d'intersection avec l'axe des abscisses. La longueur de l'axe des abscisses, limitée par ce prolongement de la courbe, représente la valeur de la correction qui devra être ajoutée à toutes les valeurs mesurées du courant d'excitation (figure 1, page 30).

Si la fréquence au cours de la conduite de l'essai est différente de la valeur nominale, toutes les valeurs mesurées de la tension doivent être rapportées à la fréquence nominale.

26 Essai en court-circuit permanent triphasé

L'essai en court-circuit triphasé permanent est effectué

- a) en entraînant la machine essayée en génératrice au moyen d'un moteur approprié;
- b) pendant l'essai de ralentissement de la machine.

Le court-circuit doit être réalisé aussi près que possible des bornes de la machine, le courant d'excitation étant appliqué après l'établissement du court-circuit.

Pendant l'essai en court-circuit triphasé permanent, le courant d'excitation et le courant en ligne de l'induit doivent être relevés simultanément. Une des lectures est faite à un courant voisin du courant nominal d'induit. La vitesse de rotation (ou la fréquence) peut différer de sa valeur nominale mais ne doit pas être inférieure à 0,2 fois la valeur nominale.

L'essai en court-circuit triphasé permanent peut être effectué avec une précision convenable pendant le ralentissement de la machine essayée, pourvu que son taux de décélération ne soit pas

During the no-load saturation test, excitation current, line voltage and frequency (or speed) should be measured simultaneously. When making the no-load test, excitation changes should be made in gradual steps from high to low voltage with points distributed evenly, if possible, from the voltage value corresponding to the excitation at rated load, but not below 1.3 of the rated voltage of the machine under test, down to 0.2 of its rated voltage, unless the residual voltage is higher.

When the excitation current is decreased to zero, the residual voltage of the generator is measured.

If the no-load saturation test is conducted when the synchronous machine is running as an unloaded motor, then in addition to the measured values mentioned above, it is necessary to measure armature current. At each voltage step, readings should be taken for minimum armature current which corresponds to unity power-factor.

The no-load saturation test during retardation of the tested machine may be performed with due precision provided its rate of deceleration is not more than 0.04 of the rated speed per second.

If the machine under test has a rate of deceleration above 0.02 rated speed per second, excitation from a separate source is required in order to have more stable excitation during the test. Before disconnecting from the line, the machine is excited to the highest required value, but not below 1.3 of the rated voltage of the machine. The excitation is lowered in steps and at each step, readings of armature voltage and speed (frequency) are taken simultaneously with constant excitation current. The retardation test may be repeated to obtain all the steps required.

- 25.1 The no-load saturation characteristic – the relationship between the armature open-circuit winding voltage at the terminals and the excitation current at rated speed (frequency) – is drawn from the data of the no-load test. If, due to high residual voltage, the no-load characteristic cuts the axis above the origin, a correction should be introduced. To determine this, the straight portion of the no-load curve, which is usually called the air-gap line, is projected to the point of intersection with the abscissa axis. The length on the abscissa axis cut by this projected curve represents the correction value which should be added to all the measured values of the excitation current (Figure 1, page 31).

If the frequency while conducting the test differs from the rated value, all the measured voltage values should be referred to the rated frequency.

26 Sustained three-phase short-circuit test

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

- a) driving the tested machine as a generator by some prime-mover;
- b) during retardation of the tested machine.

The short-circuit should be made as close to the machine terminals as possible, the excitation current being applied after closing the short-circuit.

During the sustained three-phase short-circuit test, excitation current and armature line current should be measured simultaneously. One of the readings is taken at a current close to the rated armature current. The speed of rotation (or frequency) may differ from the rated value but should not fall below 0.2 of rated value.

The sustained three-phase short-circuit test during retardation of the tested machine may be performed with due precision, provided its rate of deceleration is not more than 0.10 rated speed per

supérieur à 0,10 fois la vitesse nominale par seconde Si la machine essayée à un taux de décélération supérieur à 0,04 fois la vitesse nominale par seconde, son excitation doit être fournie par une source séparée de manière à maintenir une excitation stable pendant l'essai

26 1 La caractéristique en court-circuit triphasé permanent – relation entre le courant dans l'induit mis en court-circuit et le courant d'excitation – est déduite des données de l'essai en court-circuit triphasé permanent

27 **Détermination des grandeurs à partir des caractéristiques de saturation à vide et en court-circuit triphasé permanent**

La réactance synchrone longitudinale (voir article 4 et paragraphe 4 1) est déterminée à partir de la caractéristique de saturation à vide et de la caractéristique en court-circuit triphasé permanent en faisant le quotient de la tension qui correspond sur la partie linéaire de la caractéristique de saturation à vide, prolongée au besoin, à un courant d'excitation déterminé, par la valeur du courant du court-circuit qui correspond à ce même courant d'excitation sur la caractéristique en court-circuit triphasé permanent (figure 1)

$$X_a = \frac{U_n}{\sqrt{3} I_{BC}} \Omega \left[X_a = \frac{AC}{BC} = \frac{OH}{OC} = \frac{i_{sc}}{i_{fg}} \right]$$

La valeur de X_d déterminée de cette manière correspond à un état non saturé de la machine

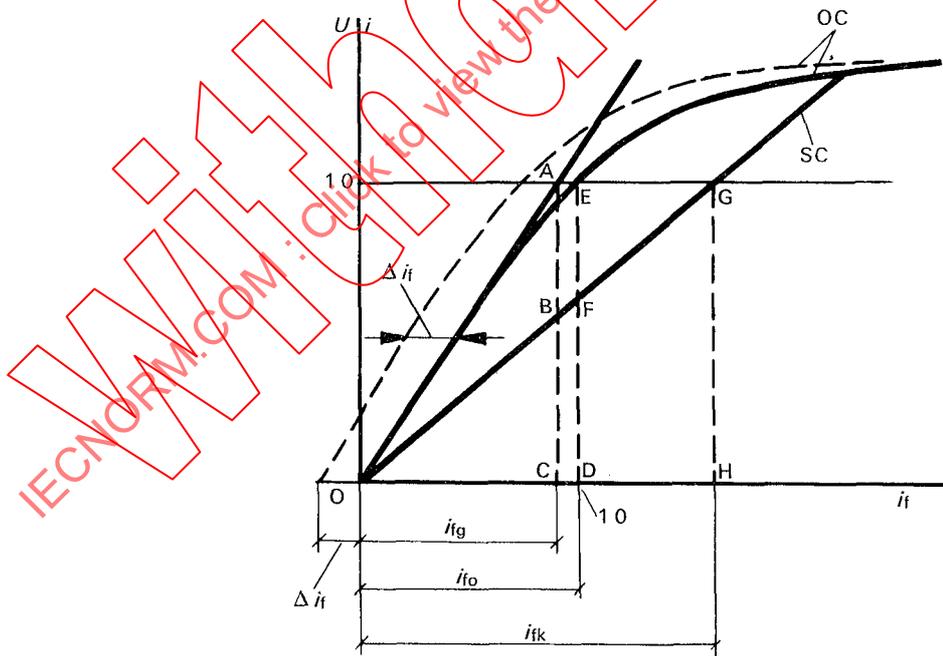


FIGURE 1

27 1 Le rapport de court-circuit (voir article 5 et paragraphe 5 1) est déterminé, à partir de la caractéristique de saturation à vide et de la caractéristique en court-circuit triphasé permanent, en faisant

le quotient du courant d'excitation qui correspond à la tension nominale sur la caractéristique de saturation à vide par le courant d'excitation qui correspond au courant nominal sur la caractéristique en court-circuit (figure 1)

$$K_e = \frac{OD}{OH} = \frac{i_{ro}}{i_{rk}}$$

28 **Essai de surexcitation à facteur de puissance nul**

L'essai de surexcitation à facteur de puissance nul est exécuté avec la machine fonctionnant en génératrice 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, on détermine de préférence les valeurs du courant d'excitation qui correspondent à des valeurs de la tension et du courant d'induit ne différant pas de plus de 15% des valeurs respectives nominales, à un facteur de puissance nul en fonctionnement surexcité.

29 **Détermination du courant d'excitation correspondant à la tension nominale et au courant d'induit nominal à facteur de puissance nul (surexcitation)**

Si, au cours de l'essai à facteur de puissance nul, la tension diffère de sa valeur nominale de moins de $\pm 0,15$ (valeur réduite), le courant d'excitation correspondant à la tension nominale et au courant nominal peut être déterminé en utilisant une méthode graphique, à partir des résultats de l'essai et des caractéristiques à vide (voir paragraphe 25.1) et en court-circuit triphasé permanent (voir paragraphe 26.1).

Le point figuratif du résultat d'une mesure est porté sur un diagramme où est tracée la caractéristique de saturation à vide. Ce point correspond aux valeurs du courant i , de la tension u et du courant d'excitation i_f mesurés au cours de l'essai à facteur de puissance nul (point C, figure 2).

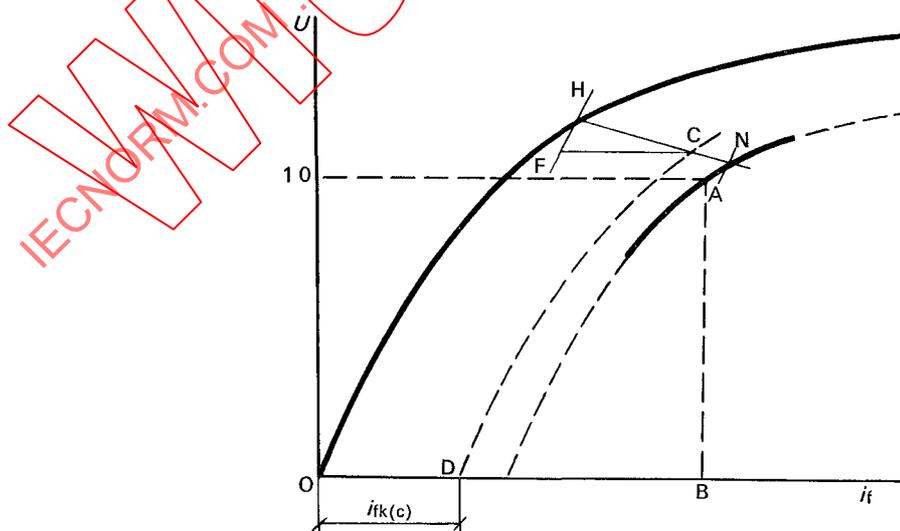


FIGURE 2

to the rated voltage on the no-load saturation curve and the excitation current corresponding to the rated current on the short-circuit curve (Figure 1):

$$K_o = \frac{OD}{OH} = \frac{i_{to}}{i_{tk}}$$

28 **Overexcitation test at zero power-factor**

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

During the test, the excitation current is determined corresponding to values of voltage and armature current preferably differing by not more than ± 0.15 per unit from the rated values, at zero power-factor with overexcitation.

29 **Determination of the excitation current, corresponding to the rated voltage and rated armature current at zero power-factor (overexcitation)**

If, during the overexcitation test at zero power-factor, the voltage differs from the rated value by not more than ± 0.15 per unit, a graphical method is used for the determination of the excitation current corresponding to the rated voltage and current, using the data of the test and the no-load saturation (see Sub-clause 25.1) and sustained three-phase short-circuit (see Sub-clause 26.1) characteristics.

An experimental point is plotted on a diagram with the no-load saturation curve of the test machine. This point corresponds to zero power-factor and the measured values of the current i , voltage u and excitation current i_f (point C, Figure 2).

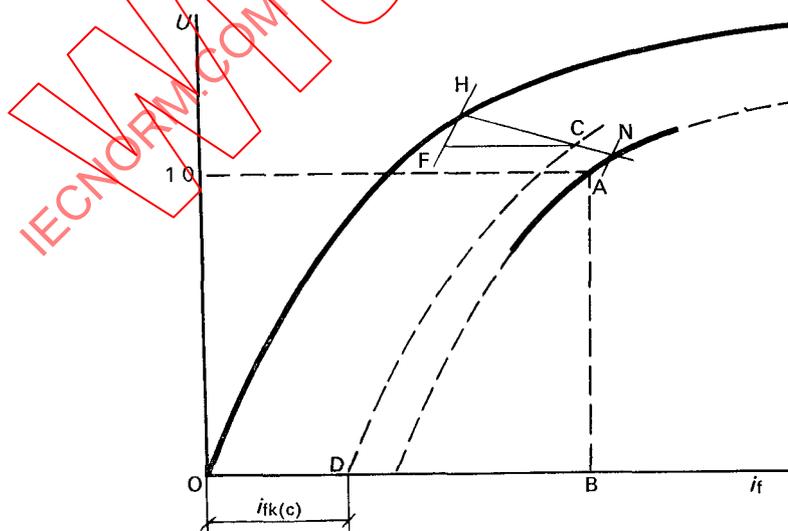


FIGURE 2

Un vecteur OD, égal au courant d'excitation qui correspond au courant d'induit i sur la caractéristique en court-circuit, est porté le long de l'axe des abscisses. Du point C, un segment CF de longueur égale à celle de OD est tracé en direction de la caractéristique à vide parallèlement à l'axe des abscisses. On trace, passant par le point F, une droite parallèle à la partie linéaire de la caractéristique à vide, cette droite et la caractéristique à vide se coupent au point H. On trace ensuite une demi-droite issue du point H et passant par le point C, sur laquelle on porte le point N tel que :

$$\frac{HN}{HC} = \frac{1}{i}$$

i étant le courant correspondant au point C

On fait subir à la caractéristique à vide la translation HN

L'abscisse OB du point A de cette nouvelle courbe dont l'ordonnée est la tension nominale représente le courant d'excitation qui correspond à la tension nominale et au courant nominal pour un facteur de puissance nul (surexcitation)

30 **Détermination de la réactance de Potier à partir des caractéristiques à vide et en court-circuit triphasé permanent et du courant d'excitation correspondant à la tension nominale et au courant d'induit nominal à facteur de puissance nul (surexcitation)**

La réactance de Potier (article 14) est déterminée graphiquement. Les caractéristiques à vide et en court-circuit triphasé sont reportées sur un même diagramme (figure 3), ainsi qu'un point A dont l'ordonnée est la tension nominale et l'abscisse le courant d'excitation mesuré qui correspond au courant d'induit nominal et à un facteur de puissance nul en surexcitation.

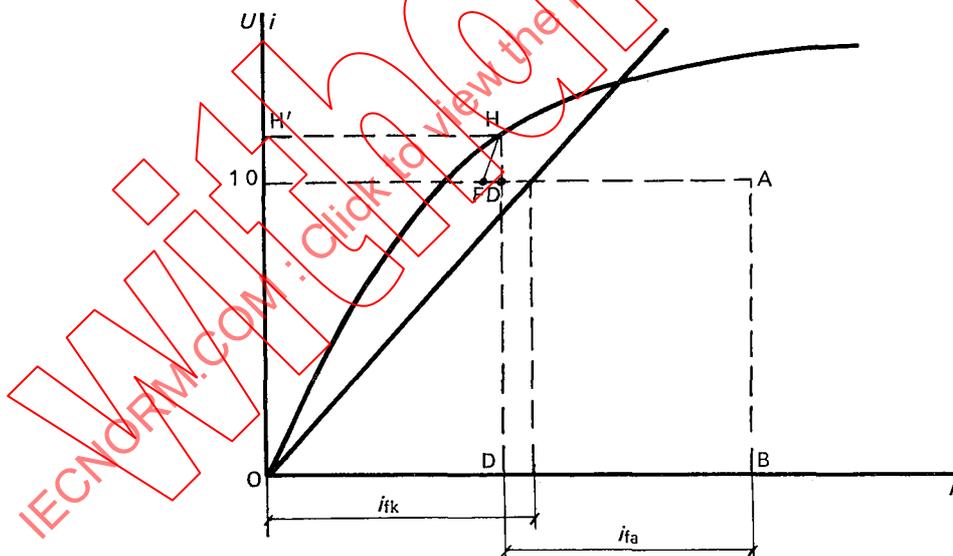


FIGURE 3

A gauche du point A et parallèlement à l'axe des abscisses, on porte une longueur AF égale au courant d'excitation (i_k) qui correspond au courant d'induit nominal sur la caractéristique en court-circuit. Une ligne parallèle à la partie inférieure rectiligne de la caractéristique à vide est tracée à partir du point F jusqu'à son intersection (point H) avec la partie supérieure de la caractéristique à vide. La longueur HG de la perpendiculaire abaissée du point H sur la ligne AF représente la chute de tension dans la réactance x_p pour le courant d'induit nominal. En valeur réduite, $x_p = HG$.

31 Détermination du courant d'excitation nominal au moyen du diagramme de Potier

Pour déterminer le courant d'excitation nominal (voir article 23) au moyen du diagramme de Potier, on se sert de la caractéristique à vide (voir paragraphe 25 1), de la caractéristique en court-circuit (voir paragraphe 26 1) et de la réactance de Potier x_p (voir articles 14 et 30)

Le vecteur du courant d'induit nominal (i_n) de la machine essayée est porté le long de l'axe des abscisses. Le vecteur de la tension nominale (u_n) est tracé à l'angle φ_n (considéré comme positif dans le cas d'une génératrice surexcitée) qui correspond au facteur de puissance nominal (figure 4)

Le vecteur de la chute de tension ($i_n x_p$) dans la réactance du Potier pour le courant d'induit nominal est reporté à l'extrémité du vecteur de la tension, perpendiculairement au vecteur du courant d'induit. La chute de tension dans la résistance de l'enroulement induit est négligée en général. On peut en tenir compte, si on le juge nécessaire, en traçant le vecteur de la chute de tension directe dans la résistance directe de l'enroulement induit (voir article 16) à partir de l'extrémité du vecteur de la tension et parallèlement au vecteur du courant

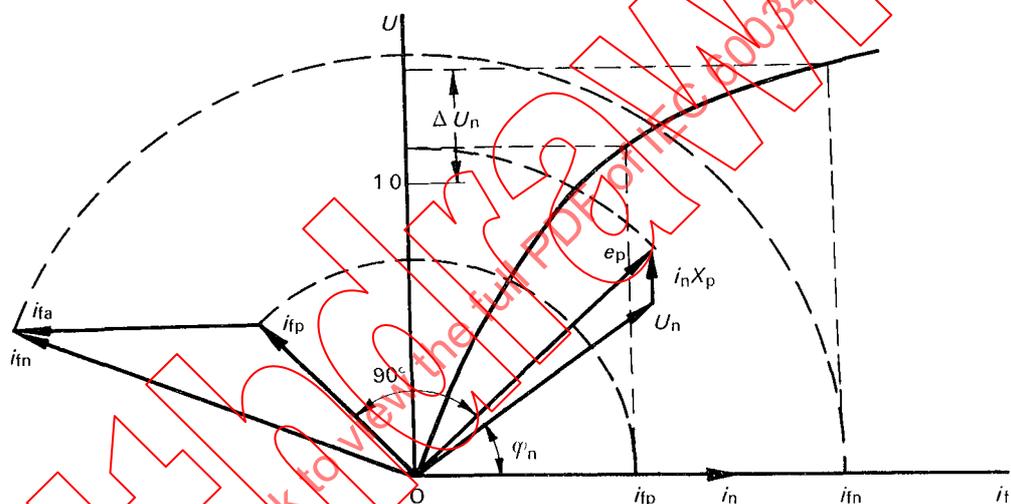


FIGURE 4

Ce vecteur est disposé dans le diagramme (figure 4) dans le sens du vecteur du courant d'induit pour les génératrices et dans le sens opposé pour les moteurs

La somme vectorielle de la tension nominale et de la chute de tension dans la réactance x_p donne le vecteur e_p de la f é m. Le courant d'excitation i_{fp} correspondant à cette f é m est déterminé sur la caractéristique à vide et est tracé sur le diagramme à partir de l'origine et à 90° du vecteur de la f é m

La composante du courant d'excitation qui compense la réaction d'induit au courant d'induit nominal (i_{fa}) est déterminée en faisant la différence entre le courant d'excitation qui correspond au courant d'induit nominal sur la caractéristique en court-circuit triphasé permanent et le courant d'excitation qui correspond à la chute de tension dans x_p due au courant nominal d'induit sur la caractéristique de saturation à vide (figure 3). Le vecteur i_{fa} est tracé à partir de l'extrémité du vecteur i_{fp} parallèlement au vecteur du courant d'induit. Le courant d'excitation nominal i_{fn} est la somme vectorielle de i_{fp} et i_{fa} .

Si la réactance de Potier x_p n'est pas connue, elle peut être remplacée dans le tracé de la figure 4 par (ax_a) , dans laquelle x_a désigne la réactance de l'induit mesurée avec le rotor sorti (voir para-

31 **Determination of the rated excitation current by Potier diagram**

To determine the rated excitation current (see Clause 23) by Potier's diagram, use is made of the no-load saturation characteristic (see Sub-clause 25 1), sustained short-circuit characteristic (see Sub-clause 26 1) and Potier reactance x_p (see Clauses 14 and 30)

The vector of the rated armature current (i_n) of the tested machine is laid off along the abscissa (Figure 4) At the power-factor angle φ_n (which is considered to be positive for an overexcited generator) to it draw the rated voltage vector (u_n)

The vector of the voltage drop ($i_n x_p$) in the Potier reactance at the rated current is drawn from the end of the voltage vector as a perpendicular to the armature current vector The voltage drop in the armature winding resistance is usually neglected If necessary, it may be taken into account by drawing the vector of positive phase sequence voltage drop in the positive phase sequence armature winding resistance (see Clause 16) from the end of the voltage vector parallel to the current vector

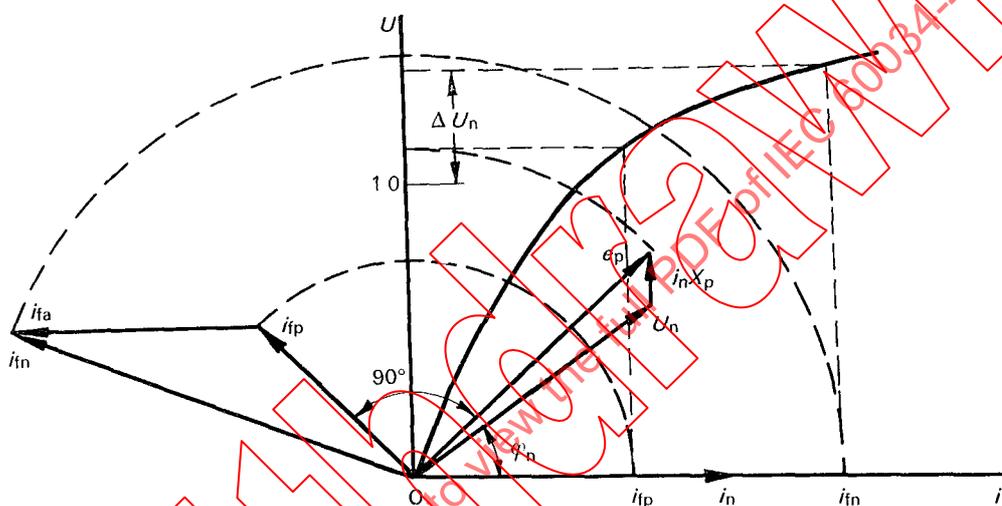


FIGURE 4

This vector should be laid off on the diagram (Figure 4) in the direction of the armature current vector for generators and in the opposite direction for motors

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

The excitation current component compensating armature reaction at rated armature current (i_{fa}) is determined as the difference between the excitation current corresponding to the rated armature current on the sustained short-circuit characteristic, and the excitation current corresponding to the voltage drop in x_p due to armature rated current on the no-load saturation characteristic (Figure 3) Vector i_{fa} is laid off from the end of the vector i_{fp} parallel to the armature current vector The rated excitation current i_{fn} is the vector sum of i_{fp} and i_{fa}

If the Potier reactance x_p is unknown, it may be replaced in the construction of Figure 4 by (ax_a) , where λ_a is the armature reactance measured without rotor (see Sub-clause 31 2), and a is a

factor taken equal to 1.0 for salient pole machines and 0.6 (0.65) for non-salient pole machines (unless more precise figures are available from previous experience on machines of similar construction)

31.1 The test without rotor is conducted with three-phase voltage at rated frequency applied to terminals of the armature winding. The applied voltage is so chosen that the armature current is near the rated value. During the test, measurements are made of the terminal voltage (U), line current (I) and supplied active power (P).

31.2 The armature reactance without rotor (X_a) is calculated from the following relations:

$$X_a = \sqrt{Z^2 - R^2} \Omega$$

where

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

$$\left[x_a = \sqrt{z^2 - r^2}; \quad z = \frac{u}{i}, \quad r = \frac{p}{i^2} \right]$$

32 **Determination of the rated excitation current by the ASA diagram**

To determine the rated excitation current of the machine (see Clause 23) by the ASA vector diagram (Figure 5), use is made of the no-load saturation characteristic (see Sub-clause 25.1), the sustained three-phase short-circuit characteristic (see Sub-clause 26.1) and the Potier reactance (see Clause 14)

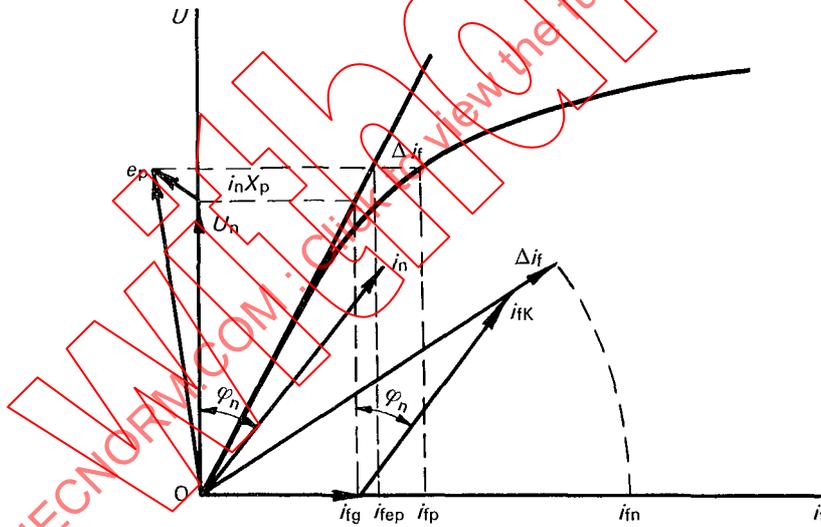


FIGURE 5

The determination of $e_m f e_p$ is made in accordance with Clause 31. The excitation current for the air-gap line at the rated armature voltage (i_{fg}) is determined from the no-load saturation characteristic. The vector current i_{fg} is laid off from the origin along the abscissa axis. From its end, at the rated power-factor angle φ_n (which is considered to be positive for an overexcited generator) to the right of the vertical the vector of excitation current i_{ik} corresponding to rated armature current on the sustained three-phase short-circuit characteristic (see Clause 30) is laid off.

Le long du vecteur somme géométrique de ces courants d'excitation, on porte un vecteur de courant correspondant à la différence (Δi_f) entre les courants d'excitation sur la caractéristique de saturation à vide (i_{fp}) et sur la partie rectiligne de celle-ci (i_{fep}), tous deux pour la tension e_p (voir figure 5) La somme de ces trois vecteurs correspond au courant d'excitation nominal

Le courant d'excitation nominal peut également être déterminé au moyen de la formule suivante (en valeurs réduites ou en grandeurs physiques):

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

Si la réactance de Potier est inconnue, elle peut être remplacée dans le tracé de la figure 5 par ax_a (voir article 31)

33 Détermination du courant d'excitation nominal au moyen du diagramme suédois

Pour déterminer le courant d'excitation nominal de la machine (voir article 23) au moyen du diagramme suédois, on utilise la caractéristique de saturation à vide (voir paragraphe 25 1), la caractéristique en court-circuit triphasé permanent (voir paragraphe 26 1) et le courant d'excitation correspondant à la tension nominale et au courant d'induit nominal à facteur de puissance nul (surexcitation) (voir article 29)

Trois valeurs du courant d'excitation sont portées sur l'axe des abscisses (voir figure 6)

OD correspondant à la tension nominale sur la caractéristique à vide

OB correspondant à la tension nominale et au courant d'induit nominal pour un facteur de puissance nul

OC correspondant au courant d'induit nominal sur la caractéristique en court-circuit permanent

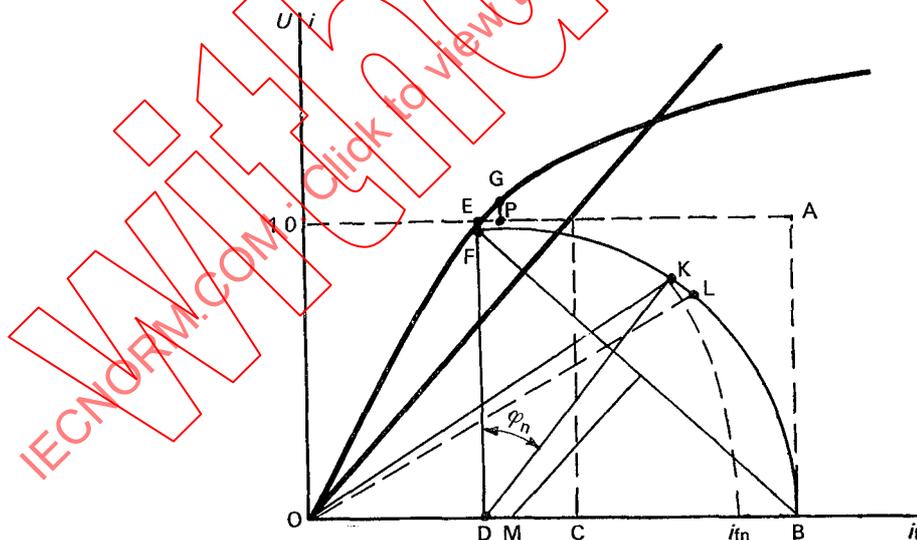


FIGURE 6

On élève une perpendiculaire à l'axe des abscisses au point D et on porte une longueur FD égale à $1,05 OC$. On réunit les points F et B par une ligne droite et on trace la médiatrice du segment FB, qui rencontre l'axe des abscisses en M. Du point M comme centre, on décrit un cercle passant par les points F et B.

The vector current corresponding to the difference (Δi_t) between the excitation currents of the no-load saturation characteristic (i_{fp}) and on the air-gap line (i_{fep}), both for the voltage e_p (see Figure 5) is laid off along the geometrical vector sum of the excitation currents. The sum of the three vectors corresponds to the rated excitation current.

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

$$i_{fn} = \Delta i_t + \sqrt{(i_{fg} + i_{fk} \sin \varphi_n)^2 + (i_{fk} \cos \varphi_n)^2}$$

If the Potier reactance is unknown, it may be replaced in the construction of Figure 5 by ax_a (see Clause 31)

33 **Determination of the rated excitation current by the Swedish diagram**

To determine rated excitation current of the machine (see Clause 23) by the Swedish diagram, use is made of the no-load saturation characteristic (see Sub-clause 25 1), the sustained three-phase short-circuit characteristic (see Sub-clause 26 1) and the excitation current corresponding to the rated voltage and armature current at zero power-factor (overexcited) (see Clause 29)

Three values of the excitation current are laid off on the abscissa axis (see Figure 6):

OD corresponding to the rated voltage on the no-load curve

OB corresponding to the rated voltage and armature current at zero power-factor

OC corresponding to the rated armature current on the sustained short-circuit characteristic

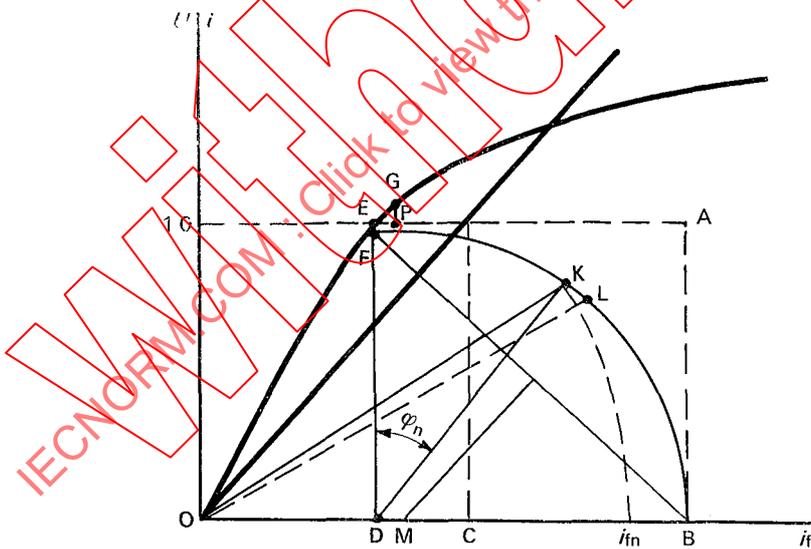


FIGURE 6

From point D a perpendicular to the abscissa axis is drawn on which the length FD equal to 1.05 OC is laid off. Points F and B are connected by a straight line and a perpendicular is drawn from the centre of this line down to the intersection with the abscissa in point M. From point M, as a centre, a circular arc is drawn through points F and B.

En partant du point D, on trace une droite faisant avec FD un angle φ_n (considéré comme positif dans le cas d'une génératrice surexcitée) correspondant au facteur de puissance nominal et qui rencontre l'arc FB au point K. La longueur OK correspond au courant d'excitation nominal de la machine.

Si on le juge nécessaire, on peut tenir compte de la chute de tension dans la résistance de l'induit de la façon suivante:

Une longueur KL est portée le long de l'arc FKB. Cette longueur est égale à la composante du courant d'excitation EP nécessaire pour augmenter la tension à vide de la quantité PG représentant la chute de tension dans la résistance directe de l'enroulement induit pour le courant nominal (voir article 16 et paragraphe 72.2). La longueur OL représente le courant d'excitation cherché.

Lorsque la machine fonctionne en moteur, la chute de tension dans la résistance directe de l'induit est reportée vers le bas à partir du point E, et le point L est reporté à la gauche du point K.

Lorsque le courant d'excitation correspondant à la tension nominale et au courant nominal à facteur de puissance nul n'est pas connu, la méthode suivante peut être utilisée pour sa détermination conformément au diagramme suédois. Le long de l'axe des ordonnées, on ajoute à la tension nominale d'induit la chute de tension produite dans ax_a (voir article 31) par le courant nominal d'induit (point H' - figure 3, page 34).

Une ligne parallèle à l'axe des abscisses est tracée à partir du point H' jusqu'à sa rencontre au point H avec la caractéristique à vide. On abaisse une perpendiculaire à partir de H jusqu'à son intersection avec l'axe des abscisses (point D - figure 3, page 34). À droite du point D, on porte le long de l'axe des abscisses un vecteur DB égal à i_{ra} (voir article 31). Le courant d'excitation représenté par le vecteur OB est le courant cherché à utiliser pour le tracé du diagramme suédois.

34 Essai d'excitation négative

L'essai est effectué sur la machine fonctionnant à vide en parallèle avec le réseau. Le courant d'excitation est réduit progressivement jusqu'à zéro, sa polarité est inversée, et il est ensuite augmenté jusqu'au moment où la machine glisse d'un pôle. Les valeurs de la tension, du courant d'induit et du courant d'excitation sont mesurées au cours de l'essai jusqu'au moment où la machine commence à glisser.

35 Détermination de X_q à partir de l'essai d'excitation négative

X_q (voir article 6) est déterminé au moyen de l'essai d'excitation négative en utilisant la formule:

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

dans laquelle (e) est la f.é.m. à vide correspondant au courant d'excitation i_r , pour lequel la machine glisse d'un pôle. Elle est déterminée au moyen de la droite joignant l'origine au point de la caractéristique à vide qui correspond à la tension au moment de la perte du synchronisme (figure 7).

u_r est la tension au moment où la machine glisse d'un pôle.

(x_d) est la réactance synchrone longitudinale déterminée au moyen de la même caractéristique de saturation à vide rectifiée.

Si le courant d'induit (i_r) au moment où la machine glisse d'un pôle est mesuré au cours de cet essai, x_q est déterminé au moyen de la formule

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

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

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

The length KL is laid off along the arc FKB. This length is equal to the excitation current component EP required to increase the no-load voltage by the value of PG, representing the voltage drop in the positive sequence armature resistance (see Clause 16 and Sub-clause 72.2) at rated current. The length OL represents the required excitation current.

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

If the excitation current at rated voltage and current and zero power-factor is lacking, the following method may be used for its determination while using the Swedish diagram. Along the ordinate axis the voltage drop in ax_a (see Clause 31) at rated armature current is added to the rated armature voltage (point H' – Figure 3, page 35).

A line parallel to the abscissa axis is drawn from point H' to intersect with the no-load characteristic in point H. From that point, a perpendicular is drawn to the intersection with the abscissa-axis (point D – Figure 3, page 35). To the right of point D, vector i_{fa} (length DB) is added along the axis (see Clause 31). The excitation current equal to the length OB is the required current to be used in drawing the Swedish diagram.

34 Negative excitation test

The test is conducted with the machine operating under no-load in parallel with the network. The excitation current is steadily reduced to zero, its polarity reversed, and it is then increased up to the moment when the machine slips one pole pitch. The values of the voltage, armature current and excitation current are measured during the test up to the moment when the machine begins to slip.

35 Determination of X_q from the negative excitation test

The determination of X_q (see Clause 6) from the negative excitation test is made using the formula (in per unit or physical values):

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

where (e) is the no-load e.m.f. for the excitation current i_r at which the machine slips one pole pitch, it is determined from the straightened no-load saturation characteristic drawn through the point corresponding to the voltage at the moment of slipping one pole pitch (Figure 7).

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

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

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

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

The value of λ_q obtained from this test may, depending upon the value of u_r , include saturation. To obtain an unsaturated value, applied voltage usually must be lowered to 0.6 of rated value or lower.

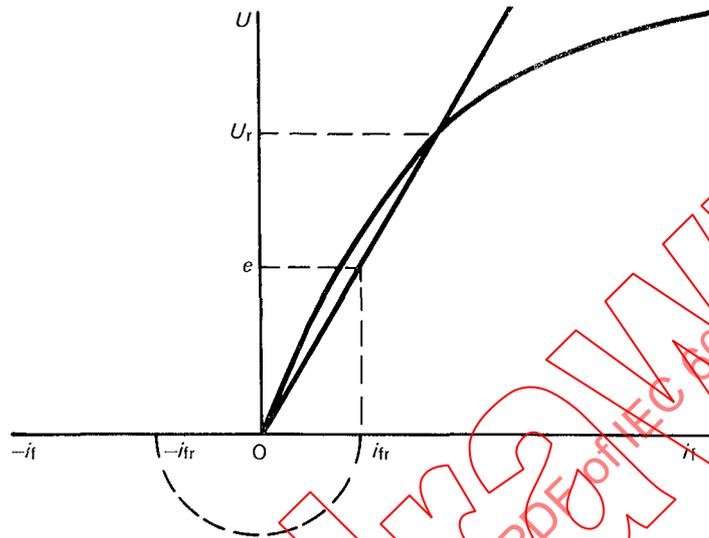


FIGURE 7

36 Low slip test

During the low slip test, subnormal symmetrical three-phase voltage ($0.01-0.2 U_n$) is applied to the armature terminals of the machine under test. The voltage should be such that the machine does not pull in. The excitation winding should be open-circuited, the rotor should be driven by a prime-mover at a slip less than 0.01 and for solid rotor machines much less than that value so that the currents induced in the damper circuits during synchronous operation will have negligible influence on the measurements. During switching on and off of the supply, the excitation winding should be closed (short-circuited or through a discharge resistance) to avoid possible damage. Armature current and voltage and the slip-ring voltage and slip are measured by indicating instruments or recorded by oscillograph. If the residual voltage measured before the test is larger than 0.3 of the supply test voltage, the rotor should be demagnetized. Demagnetizing might be done, for example, by connecting the field winding to a low-frequency source with current about 0.5 of the no-load rated voltage excitation current of the tested machine and gradually decreasing its amplitude and frequency (the latter if possible).

37 Détermination de X_q à partir de l'essai à faible glissement

Pour déterminer X_q (voir article 6) au moyen de l'essai à faible glissement, on mesure la tension et le courant d'induit au moment où la tension aux bornes de l'enroulement d'excitation (U_{fo}) est maximale, X_q est calculé d'après la formule

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

Note – Si I_{\max} ne coïncide pas avec U_{\min} , il convient de prendre I_{\max} comme base dans les calculs ainsi que la tension qui correspond à ce courant

Si, au cours de l'essai, la tension résiduelle (U_{res}) est comprise entre 10% et 30% de la tension d'alimentation utilisée pour l'essai, la valeur du courant est déterminée au moyen de la formule:

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

dans laquelle I_{av} est la demi-somme de deux maximums consécutifs de la courbe enveloppe du courant (figure 8)

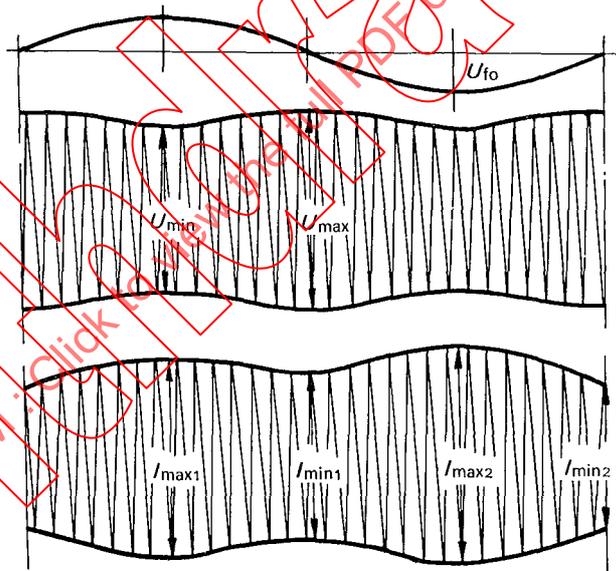


FIGURE 8

Une vérification de la valeur mesurée peut être faite en calculant X_d à partir du même essai, ce qui s'obtient en mesurant la tension et le courant au moment où la tension aux bornes de l'enroulement d'excitation à circuit ouvert est nulle, et en comparant avec sa valeur réelle. Dans ce cas,

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

37 **Determination of X_q from the low slip test**

To determine X_q (see Clause 6) from the low slip test, armature current and voltage are measured at maximum excitation winding voltage (U_{fo}), and X_q is calculated using the following formula:

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

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

If, during the test, the residual voltage of the machine (U_{res}) is in the limits of 0.1-0.3 of the supply test voltage, the value of the current is determined using the formula

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

where I_{av} is the half sum of the two consecutive maxima of the current envelope curve (Figure 8)

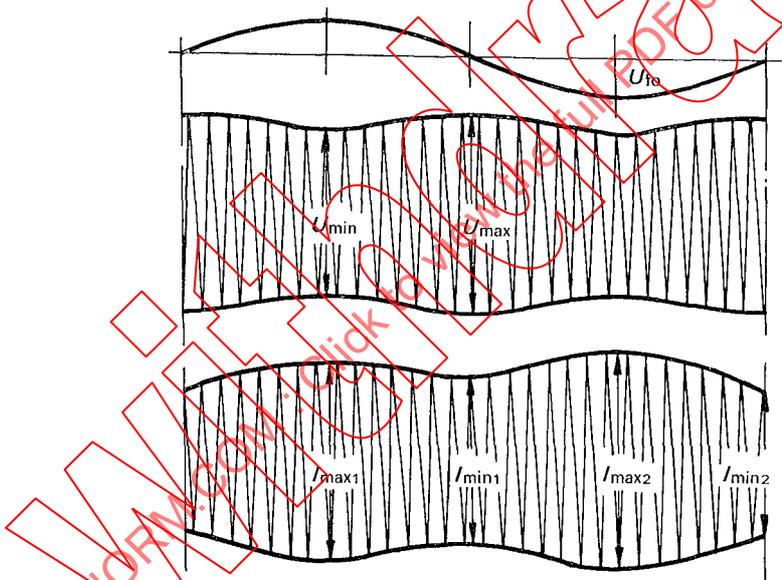


FIGURE 8

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

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

Si la tension résiduelle est inférieure à 30 % de la tension d'alimentation utilisée pour l'essai, I_{\min} est représenté par la demi-somme de deux minimums consécutifs de la courbe enveloppe du courant

Les résultats de la mesure X_q par la méthode de l'essai à faible glissement ne peuvent être considérés comme corrects que si la valeur de X_d obtenue au cours du même essai coïncide pratiquement avec celle obtenue conformément aux indications de l'article 27. S'il n'en est pas ainsi, l'essai doit être recommencé avec des valeurs de plus en plus faibles du glissement, et les valeurs successives de X_q sont extrapolées jusqu'à un glissement nul. La valeur de la réactance synchrone transversale obtenue au moyen de cet essai correspond pratiquement à la valeur non saturée

38 Essai en charge avec mesure de l'angle de charge δ

L'essai est exécuté sur la machine fonctionnant en parallèle avec le réseau et à une charge au moins égale à la moitié de la puissance nominale à facteur de puissance nominal

Au cours de l'essai, on mesure le courant dans l'induit (i), la tension aux bornes de l'induit (u), l'angle φ entre la tension et le courant (par la méthode des deux wattmètres) et l'angle δ (angle interne entre la tension aux bornes et la f.é.m.). L'angle de charge peut se mesurer en utilisant la méthode stroboscopique ou toute autre méthode de précision

39 Détermination de X_q à partir de l'essai en charge avec mesure de l'angle de charge

La détermination de X_q (voir article 6) par la méthode de la mesure de l'angle de charge s'effectue en utilisant la formule

$$X_q = \frac{U \operatorname{tg} \delta}{\sqrt{3} I (\cos \varphi - \sin \varphi \operatorname{tg} \delta)} \Omega, \quad \left[X_q = \frac{u \operatorname{tg} \delta}{i (\cos \varphi - \sin \varphi \operatorname{tg} \delta)} \right]$$

40 Essai de court-circuit triphasé brusque

L'essai de court-circuit triphasé brusque pour la détermination des grandeurs caractéristiques des machines synchrones est effectué à la vitesse de rotation nominale. L'essai est effectué en créant le court-circuit aux bornes de l'enroulement de l'induit lors du fonctionnement à vide de la machine sous la tension requise. L'excitation s'obtient, en général, à partir de la propre excitatrice qui doit être excitée séparément. Si on ne peut utiliser la propre excitatrice de la machine, on utilisera alors une excitatrice séparée, dont la valeur du courant nominal devra être au moins égale à deux fois le courant d'excitation à vide de la machine en essai et dont la résistance d'induit ne devra pas être supérieure à celle de l'excitatrice principale de la machine. Dans ce cas, l'excitatrice doit être à excitation séparée.

Les trois phases doivent être mises en court-circuit pratiquement au même instant. La fermeture des contacts de chaque phase doit se produire avec un décalage inférieur ou égal à 15 degrés électriques entre les phases. Cette valeur peut être dépassée lors de l'essai si la composante en courant continu de l'induit est peu importante. Pour mesurer le courant de court-circuit, on peut utiliser des shunts non inductifs, des transformateurs sans fer ou des transformateurs de courant appropriés. Les transformateurs de courant ne doivent être utilisés que pour la mesure des composantes alternatives des courants, et doivent être choisis de manière que la pointe initiale de la composante subtransitoire du courant de court-circuit se trouve sur la partie droite de la caractéristique du transformateur.

Les transformateurs sans fer sont reliés à l'oscillographe par l'intermédiaire d'un amplificateur intégrateur. Lorsqu'il est nécessaire de déterminer seulement la valeur maximale de la composante aperiodique et de la composante symétrique-périodique du courant de court-circuit, il peut être fait usage d'un galvanomètre oscillographique intégrateur.

La résistance totale des appareils de mesure et des conducteurs qui les relient au secondaire des transformateurs de courant ne doit pas dépasser la valeur nominale admise pour le type de transformateurs utilisés.

With a residual voltage less than 0.3 of the supply test voltage, the half sum of the two consecutive minima of the envelope curve represents I_{\min} .

The results of X_q measurements from the low slip test may be considered correct only if the value of X_q obtained from this test practically agrees with its value obtained in accordance with Clause 27. Otherwise, the test is repeated at several low values of the slip, followed by extrapolation of X_q values to zero slip. The value of quadrature-axis synchronous reactance obtained from this test practically corresponds to the unsaturated value.

38 On-load test measuring the load angle δ

The test is conducted with the machine operating in parallel with the network. The loading of the machine should not be less than 0.5 of the rated active load at rated power-factor.

When conducting the test, measurements are made of the armature current (i) and voltage (u), angle φ between the voltage and the current (using the two wattmeter method) and load angle δ (the internal angle between the terminal voltage and e.m.f.). The load angle may be measured by using the stroboscopic method or any other accurate method.

39 Determination of X_q from the on-load test measuring the load angle

The determination of X_q (see Clause 6) by the method of load angle measurement is made using the formula

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

40 Sudden three-phase short-circuit test

The sudden three-phase short-circuit test for the determination of synchronous machine quantities is conducted at rated speed. The test is made by applying a short-circuit to the armature winding when operating at the desired voltage on no-load. Excitation of the machine is, as a rule, accomplished 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 field current of the tested machine and its armature resistance not greater than that of the main machine exciter. This exciter should be separately excited.

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

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

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

La tension aux bornes de la machine, le courant d'excitation et la température de l'enroulement d'excitation sont mesurés immédiatement avant la mise en court-circuit

Pour obtenir des grandeurs correspondant à l'état non saturé de la machine, l'essai est effectué à plusieurs tensions d'induits, de 0,1 à 0,4 fois la tension nominale. Les grandeurs sont déterminées pour chaque essai et reportées sur une courbe en fonction des valeurs initiales des courants d'induit alternatifs transitoires et subtransitoires. En partant de cette courbe, on peut obtenir les grandeurs désirées pour le courant alternatif d'induit qui correspond à sa valeur nominale.

Pour obtenir les grandeurs correspondant à l'état saturé de la machine, l'essai est effectué avec une tension aux bornes avant mise en court-circuit de l'induit égale à la tension nominale.

Si l'essai de court-circuit brusque ne peut pas être exécuté à la tension nominale d'induit, il est recommandé d'effectuer des essais à plusieurs tensions d'induit (par exemple à 0,3, 0,5 et 0,7 fois la tension nominale) et de déterminer les grandeurs pour chacun de ces essais. Les résultats sont reportés sur une courbe en fonction de la tension à circuit ouvert avant mise en court-circuit, et les grandeurs correspondant à la tension d'induit nominale sont approximativement déterminées par extrapolation.

Pour déterminer les grandeurs caractéristiques de la machine, on enregistre à l'oscillographe le courant dans les trois phases de l'induit et le courant dans le circuit d'excitation.

L'enregistrement oscillographique doit se poursuivre pendant un temps au moins égal à $\tau_d + 0,2$ s après le court-circuit. L'enregistrement oscillographique du régime permanent doit également être effectué et les valeurs finales correspondant à ce régime doivent en outre être contrôlées au moyen d'appareils de mesure. Des enregistrements oscillographiques de plus courte durée peuvent être effectués si des essais exécutés sur des machines semblables ont montré que la valeur du courant décroît suivant une courbe exponentielle.

Les variations dans le temps de la composante aperiodique et de la composante periodique du courant dans chacune des phases de l'enroulement induit sont déterminées d'après les oscillogrammes du court-circuit triphasé en faisant respectivement la demi-somme algébrique et la demi-différence algébrique des ordonnées des enveloppes supérieure et inférieure du courant de court-circuit dans les différentes phases.

La composante periodique du courant de court-circuit de l'induit est prise égale à la moyenne des valeurs de la composante periodique du courant dans les trois phases.

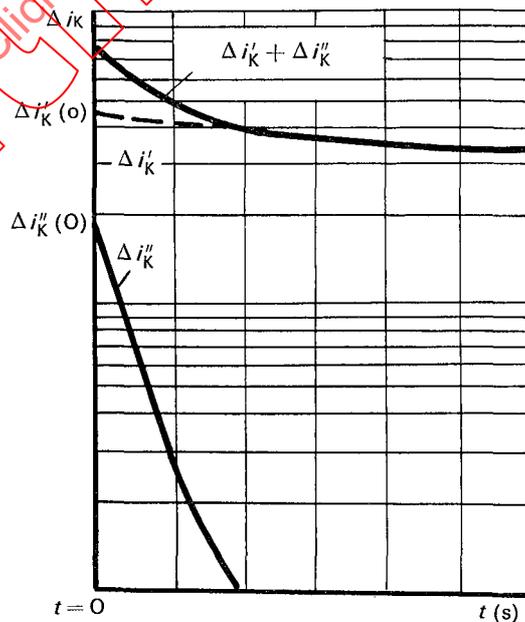


FIGURE 9

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

To obtain quantities corresponding to the unsaturated state of the machine, the test is performed at several armature voltages of (0.1-0.4) rated value. The quantities are obtained for each test and plotted against the initial values of a.c. transient or subtransient armature currents. From this relationship, the required quantities are obtained at the rated armature current value.

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

If the sudden short-circuit test cannot be performed at rated armature voltage, it is recommended that the tests should be conducted at several armature voltages (for example, 0.3, 0.5 and 0.7 of rated armature voltage), and the quantities determined for each test. They are then plotted against open-circuit voltage before short-circuiting and the approximate rated armature voltage quantity is found by the extrapolation method.

To determine the machine quantities, oscillograms are taken of the armature current in each phase and of the current in the excitation circuit.

Oscillograph recording should continue for a time interval not less than $\tau_1 + 0.2$ s after the short-circuit. The steady values should also be recorded by restarting the oscillogram following the establishment of steady conditions. The final values for a check shall be measured by instruments. Shorter oscillographic records may be taken if it is known from tests on similar machines that the current value decays as an exponential.

The change with time of aperiodic and periodic armature current components in each phase is determined from the three-phase short-circuit oscillograms as an algebraic half-sum and algebraic half-difference of the ordinates of the upper and lower envelopes of the short-circuit current in separate phases, respectively.

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

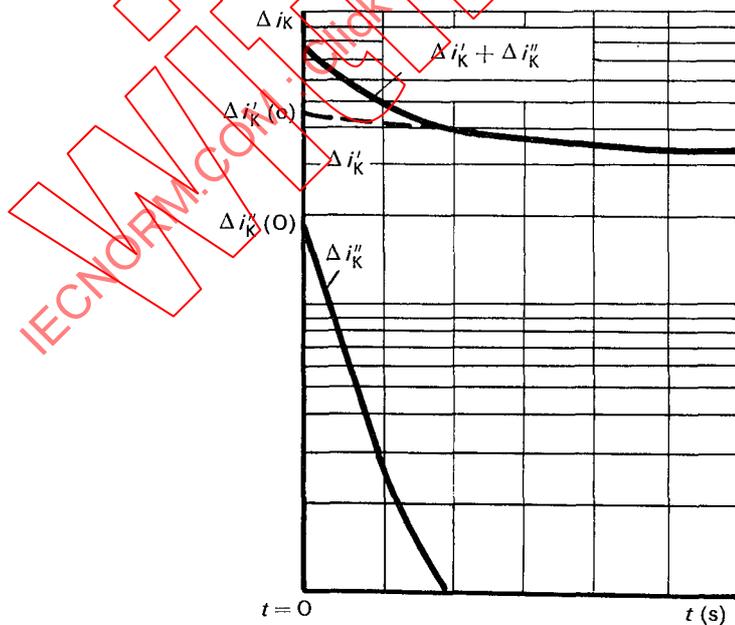


FIGURE 9

Pour déterminer les composantes transitoire (Δi_k) et subtransitoire (Δi_k), on retranche de la courbe donnant la variation de la composante périodique du courant induit la valeur du courant de la court-circuit en régime établi $i(\infty)$. La différence, qui représente la somme de Δi_k et de Δi_k , est reportée sur du papier à échelle semi-logarithmique. Le tracé peut être une droite ou une courbe

- a) Lorsque la deuxième partie de ce tracé est une droite (cas d'une exponentielle), le prolongement de celle-ci jusqu'à la droite $t = 0$ donne la valeur initiale $\Delta i_k(0)$ de la composante transitoire du courant de court-circuit (figure 9, page 50)
- b) Lorsque la deuxième partie de ce tracé est incurvée, l'amplitude du courant i_A est mesurée (voir figure 10, page 52) au temps OA' pris égal à 0,2 s ou au temps à partir duquel les phénomènes subtransitoires deviennent négligeables. Le temps OB' correspond au temps pour lequel le courant est $i_B = 1/\varepsilon i_A$. La constante de temps τ_d est prise égale à $(OB' - OA')$ secondes. La droite joignant les points représentatifs des valeurs des courants i_B et i_A est considérée comme représentant la valeur équivalente de Δi_k et son extrapolation jusqu'à la droite $t = 0$ donne la valeur initiale $\Delta i_k(0)$ de la composante transitoire du courant de court-circuit

La composante subtransitoire du courant de court-circuit est définie comme étant la différence entre la courbe $\Delta i_k + \Delta i_k$ et la droite représentant la valeur de Δi_k . La variation de la composante subtransitoire du courant en fonction du temps est reportée également en coordonnées semi-logarithmiques (figure 9)

Les composantes aperiodiques du courant des trois phases sont reportées sur un diagramme en coordonnées semi-logarithmiques. L'extrapolation de ces courbes jusqu'à l'origine des temps donne la valeur initiale des courants correspondants

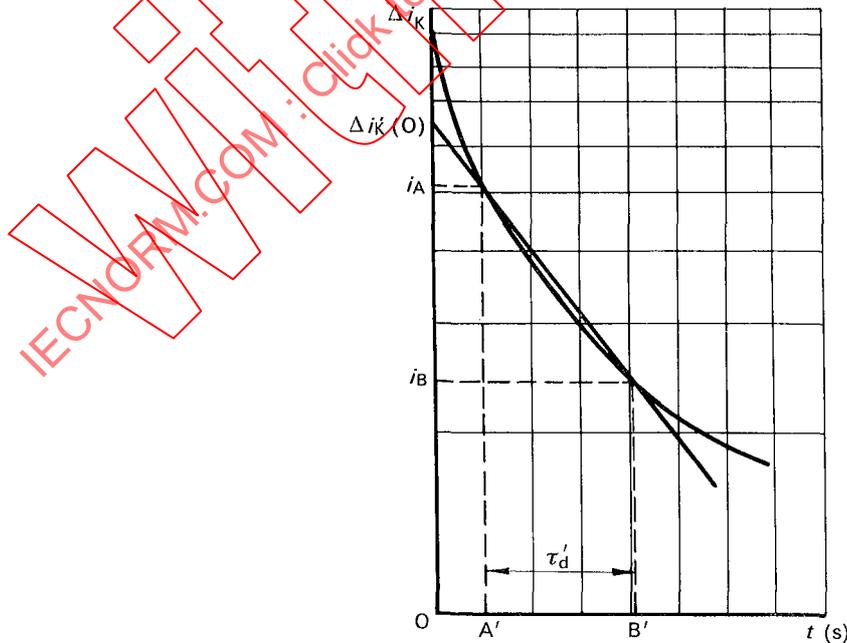


FIGURE 10

To determine the transient (Δi_k) and subtransient ($\Delta i_k'$) components, the value of the sustained short-circuit current $i(\infty)$ is subtracted from the curve of the armature current periodic component. The remainder, which is the sum of $\Delta i_k + \Delta i_k'$, is plotted on paper with a semi-log scale. This plot may be a straight line or a curve.

- a) When the latter part of this plot is a straight line (corresponding to an exponential), then this line extrapolated to zero time gives the initial value $\Delta i_k(0)$ of the transient component of short-circuit current (Figure 9, page 51)
- b) When the latter part of this plot is a curve, the amplitude of the current i_A is measured (see Figure 10, page 53) at a time OA' , where OA' is taken as 0.2 s or the time at which subtransient effects become negligible. The time OB' is measured at which the current is $i_B = 1/\epsilon i_A$. The time constant τ_d' is taken as $(OB' - OA')$ seconds. The straight line through the values of current i_B and i_A is assumed to represent the equivalent value of $\Delta i_k'$ and, when it is extrapolated to zero time, it gives the initial value $\Delta i_k'(0)$ of the transient component of short-circuit current.

The subtransient short-circuit current component is defined as the difference between the $\Delta i_k + \Delta i_k'$ curve and the straight line representing the value of Δi_k . The variation of the subtransient current component with time is also plotted on the semi-log scale (Figure 9).

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

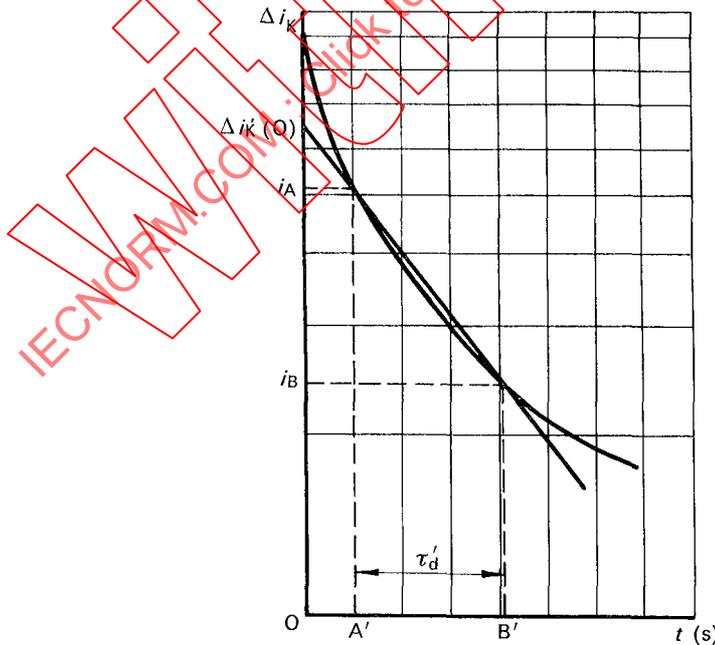


FIGURE 10

Pour déterminer la plus grande valeur possible de la composante aperiodique, les valeurs initiales des composantes aperiodiques des différentes phases, obtenues par extrapolation, sont reportées sous forme de vecteurs sur trois lignes faisant, entre elles, des angles de 60°, à partir d'une origine commune, le plus long des trois vecteurs est tracé sur la ligne médiane. Des perpendiculaires sont élevées à l'extrémité de chacun des vecteurs. Le vecteur joignant l'origine au centre du triangle déterminé par les intersections de ces perpendiculaires représente la plus grande valeur possible de la composante aperiodique, égale à la valeur initiale de l'amplitude de la composante periodique (figure 11)

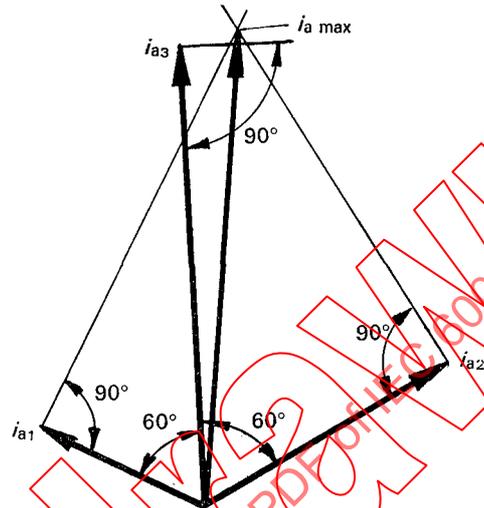


FIGURE 11

La plus grande valeur possible de la composante aperiodique du courant peut également être déterminée analytiquement au moyen de la formule (en valeurs réduites ou en grandeurs physiques):

$$i_{a \max} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{i_{a2}^2 + i_{a3}^2 + i_{a2} i_{a3}}$$

dans laquelle i_{a3} est la valeur initiale algébrique la plus élevée des composantes aperiodiques des courants et i_{a2} la composante aperiodique du courant dans une quelconque des deux autres phases

La variation en fonction du temps de la composante periodique du courant d'excitation est déterminée à partir de l'oscillogramme du courant d'excitation et est tracée en coordonnées semi-logarithmiques. L'extrapolation de la courbe obtenue jusqu'à l'origine des temps donne la valeur initiale de la composante periodique du courant d'excitation

41 Détermination des grandeurs à partir de l'essai de court-circuit triphasé brusque

La réactance transitoire longitudinale (voir article 7) est déterminée à partir de l'essai de court-circuit triphasé brusque comme étant le rapport de la tension à vide, mesurée immédiatement avant l'essai de court-circuit [$u(0)$], à la valeur initiale de la composante periodique du courant de court-circuit sans tenir compte de la composante subtransitoire (figure 9, page 50)

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

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

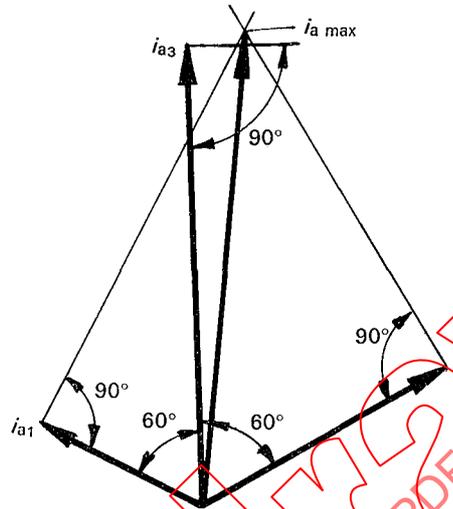


FIGURE 11

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

$$i_{a \max} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{i_{a2}^2 + i_{a3}^2 + i_{a2} i_{a3}}$$

where i_{a3} is the highest initial algebraic value of the aperiodic components of the current and i_{a2} the aperiodic current component in either of the two other phases

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

41 Determination of quantities from the sudden three-phase short-circuit test

The direct-axis transient reactance (see Clause 7), as determined from the sudden short-circuit test, is the ratio of the no-load voltage, measured immediately before the short-circuit [$u(0)$] to the initial value of the periodic component of the short-circuit current neglecting the subtransient component (Figure 9, page 51)

$$X_d = \frac{U(0)}{\sqrt{3} [I(\infty) + \Delta I'_k(0)]} \Omega, \quad \left[x_d = \frac{u(0)}{i(\infty) + \Delta i'_k(0)} \right]$$

- 41 1 La réactance subtransitoire longitudinale (voir article 8) est déterminée à partir de l'essai de court-circuit triphasé brusque comme étant le rapport de la tension à vide, mesurée immédiatement avant le court-circuit, à la valeur initiale de la composante périodique du courant de court-circuit obtenue par l'analyse des oscillogrammes (figure 9, page 50)

$$X_d = \frac{U(0)}{\sqrt{3} [I(\infty) + \Delta I'_k(0) + \Delta I''_k(0)]} \Omega, \left[x_d = \frac{u(0)}{i(\infty) + \Delta i'_k(0) + \Delta i''_k(0)} \right]$$

- 41 2 La constante de temps transitoire longitudinale en court-circuit (voir article 18 et paragraphe 18 1) est déterminée à partir de l'essai de court-circuit triphasé brusque comme étant le temps nécessaire pour que la composante transitoire du courant induit décroisse jusqu'à $1/e \approx 0,368$ fois sa valeur initiale (mais voir article 40b)
- 41 3 La constante de temps subtransitoire longitudinale en court-circuit (voir article 19 et paragraphe 19 1) est déterminée à partir de l'essai de court-circuit triphasé brusque comme étant le temps nécessaire pour que la composante subtransitoire du courant induit décroisse jusqu'à $1/e \approx 0,368$ fois sa valeur initiale
- 41 4 La constante de temps en court-circuit de l'induit (voir article 20) est déterminée comme étant le temps nécessaire pour que la composante périodique du courant d'excitation décroisse jusqu'à $1/e \approx 0,368$ fois sa valeur initiale
- 41 5 La constante de temps en court-circuit de l'induit (voir article 20) déduite de la décroissance des composantes apériodiques des courants dans chaque phase de l'induit est déterminée comme étant le temps nécessaire pour que ces composantes décroissent jusqu'à $1/e \approx 0,368$ fois leur valeur initiale. Toute phase dans laquelle la composante apériodique initiale est inférieure à 0,4 fois la valeur initiale maximale trouvée ne doit pas être considérée pour la détermination de la constante de temps en court-circuit de l'induit.
La détermination de la constante de temps en court-circuit de l'induit à partir de la décroissance de la composante apériodique du courant d'induit n'est admise que si le courant d'induit est mesuré au cours de l'essai de court-circuit brusque au moyen de shunts non inductifs
- 41 6 La plus grande valeur instantanée possible du courant initial de court-circuit est déterminée à partir de l'essai de court-circuit triphasé brusque comme étant la somme des valeurs des composantes périodique et apériodique une demi-période après le début du court-circuit.
La valeur de la composante périodique à cet instant est égale à la somme des composantes permanentes transitoire et subtransitoire du courant de court-circuit brusque.
Ces deux dernières composantes sont lues directement sur le diagramme (figure 9, page 50) à l'instant correspondant.
La valeur de la composante apériodique est donnée par la formule (en valeurs réduites ou en grandeurs physiques)

$$i_a = i_{a \max} e^{-\frac{0,5}{f \tau_a}}$$

dans laquelle

$i_{a \max}$ = plus grande valeur possible de la composante apériodique du courant lors du court-circuit brusque

e = la base des logarithmes naturels

τ_a = constante de temps en court-circuit de l'induit (voir article 20)

f = la fréquence en hertz ($\frac{0,5}{f}$ correspond à une demi-période)

- 41 1 The direct-axis subtransient reactance (see Clause 8), as determined from the sudden short-circuit test, is the ratio of the no-load voltage, measured immediately before the short-circuit, to the initial value of the periodic component of the short-circuit current, obtained from the analysis of the oscillogram (Figure 9, page 51):

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

- 41 2 The direct-axis transient short-circuit time constant (see Clause 18 and Sub-clause 18 1), as determined from the sudden three-phase short-circuit test, is the time required for the transient armature current component to decrease to $1/e \approx 0.368$ of its initial value (but see Clause 40b)
- 41 3 The direct-axis subtransient short-circuit time constant (see Clause 19 and Sub-clause 19 1), as determined from the sudden three-phase short-circuit test, is the time required for the subtransient armature current component to decrease to $1/e \approx 0.368$ of its initial value
- 41 4 The armature short-circuit time constant (see Clause 20) is determined as the time required for the excitation current periodic component to decrease to $1/e \approx 0.368$ of its initial current
- 41 5 The armature short-circuit time constant (see Clause 20) from the decrease of the aperiodic armature current components in each phase is determined as the average time required for these components to decrease to $1/e \approx 0.368$ of their initial value. Any phase whose initial aperiodic component is less than 0.4 of the initial resolved value should be disregarded in determining the armature short-circuit time constant

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

- 41 6 The largest possible instantaneous initial short-circuit current is determined from the sudden three-phase short-circuit test as the sum of the values of periodic and aperiodic components at a half-cycle after the instant of the short-circuit
- The value of the periodic component for this instant is equal to the sum of the sustained, transient and subtransient components of the sudden short-circuit current
- The two latter components are taken directly from the diagram (Figure 9, page 51) for the corresponding instant
- The value of the aperiodic component is determined by the formula (in per unit or physical values)

$$i_a = i_{a \max} e^{-\frac{0.5}{f \tau_a}}$$

where

- $i_{a \max}$ = the largest possible value of the aperiodic current component of the sudden short-circuit
- e = base of natural logarithm
- τ_a = the armature short-circuit time constant (see Clause 20)
- f = frequency in hertz (cycle per second) ($\frac{0.5}{f}$ corresponds to a half-period)

42 **Essai de rétablissement de la tension**

L'essai de rétablissement de la tension après suppression d'un court-circuit triphasé est effectué sur la machine tournant à sa vitesse nominale et avec son induit préalablement court-circuité au moyen d'un disjoncteur

La machine est mise en route, son enroulement d'induit étant court-circuité et son courant d'excitation fixé à une valeur correspondant à un point de la partie linéaire de la courbe de saturation à vide qui généralement correspond à une tension ne dépassant pas 0,7 fois la tension nominale d'induit à circuit ouvert, le régime étant stable à l'instant de l'ouverture du disjoncteur

Les grandeurs fournies par cet essai correspondent à l'état non saturé de la machine. Les précautions à observer en ce qui concerne le système d'excitation sont les mêmes que celles indiquées à l'article 40

Le court-circuit permanent doit être pratiquement coupé simultanément sur les trois phases. Les trois courants étant interrompus dans un intervalle de temps inférieur ou égal à une demi-période de la fréquence fondamentale (soit 180 degrés électriques). Une tension de rétablissement en ligne et un courant de phase dans l'induit sont enregistrés à l'oscillographe

La différence entre la tension en régime établi et la tension déterminée par les enveloppes de la tension de rétablissement est reportée en fonction du temps en coordonnées semi-logarithmiques, puis extrapolée jusqu'à l'instant où le court-circuit a été supprimé (Courbe 1, figure 12)

L'extrapolation de la partie rectiligne de la courbe jusqu'à l'axe des ordonnées donne la valeur initiale de la composante transitoire de la tension $\Delta u' (0)$

La différence entre la tension déterminée par la courbe et la composante transitoire ($\Delta u'$) de la tension donne la valeur de la composante subtransitoire ($\Delta u''$) de la tension au même instant

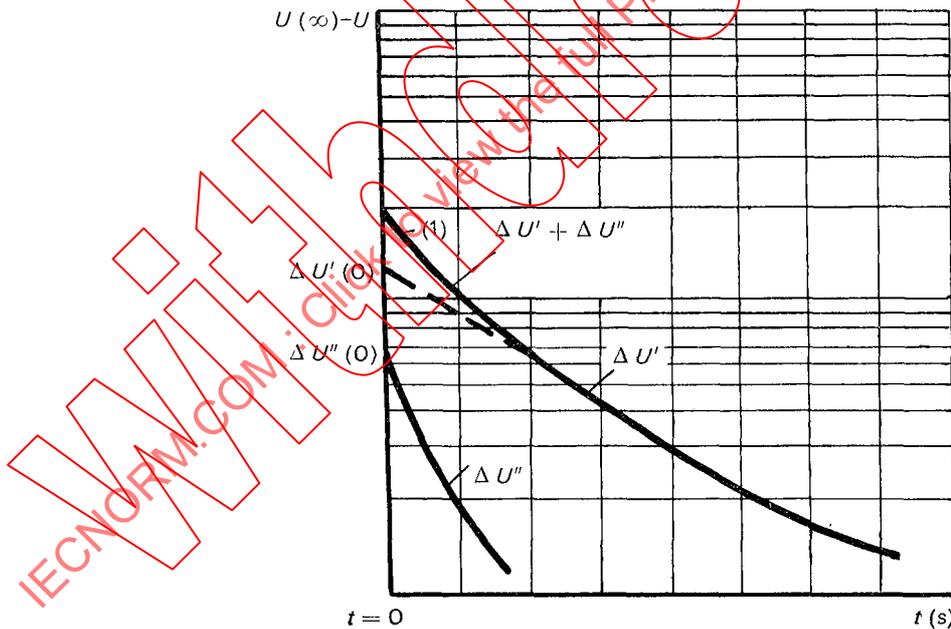


FIGURE 12

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

La réactance transitoire longitudinale (voir article 7) est déterminée à partir de l'essai de rétablissement de la tension comme étant le rapport de la différence entre la tension en régime établi $u(\infty)$ et la valeur initiale de la composante transitoire de la tension $\Delta u' (0)$ au courant dans l'induit (i_k) mesuré immédiatement avant la suppression du court-circuit (figure 12)

42 **Voltage recovery test**

The voltage recovery test after disconnection of a sustained three-phase short-circuit is conducted on a machine running at rated speed with the armature winding short-circuited by a circuit-breaker at the beginning of the test

The machine is operated with the armature winding short-circuited and with excitation current set at a value corresponding to the linear portion of the no-load saturation curve, which as a rule is not higher than 0.7 of rated open-circuit armature voltage, conditions being steady at the instant of operation of the circuit-breaker

Quantities obtained from this test will correspond to the unsaturated state of the machine. The requirements for the excitation system are the same as those given in Clause 40

The sustained short-circuit should be switched off practically simultaneously in all three phases with the currents being interrupted within 180 electrical degrees, or half a cycle. Oscillographic records (initial part at high speed) of one line voltage recovery and one armature current are required

The difference between the sustained voltage and the voltage determined by the envelope of recovery voltage is plotted on a semi-log scale against time, and then extrapolated to the instant of the switching off of the short-circuit (Curve 1, Figure 12)

The extrapolation of the straight portion of Curve 1 to the ordinate gives the initial value of the transient voltage component $\Delta u'(0)$

The difference between the voltage determined by Curve 1 and the transient voltage component ($\Delta u'$) gives the subtransient voltage ($\Delta u''$) for the corresponding instants

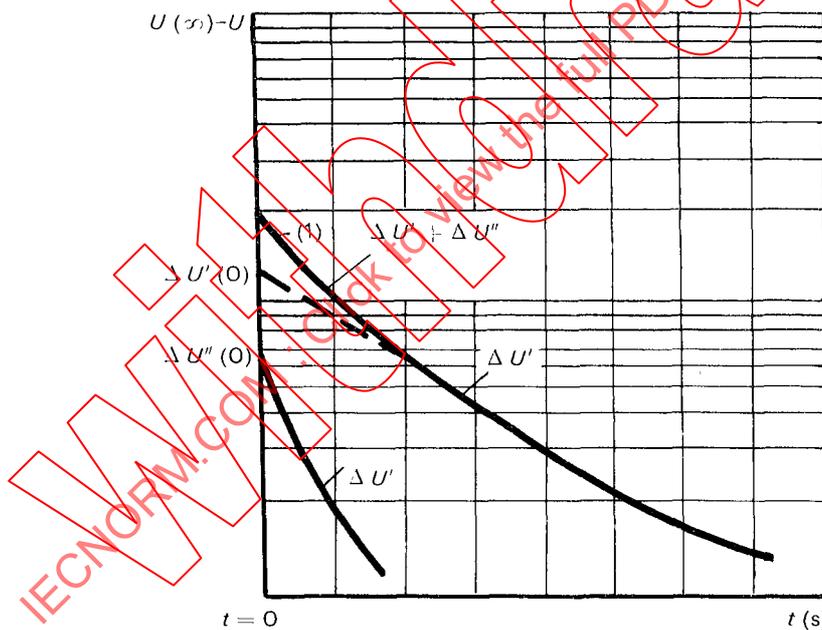


FIGURE 12

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

Direct-axis transient reactance (see Clause 7) is determined from the voltage recovery test as the ratio of the difference between the sustained voltage $u(\infty)$ and the initial value of the transient voltage component $\Delta u'(0)$ to the armature current (i_k) measured immediately before the disconnection of the short-circuit (Figure 12)

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

- 43 1 La réactance subtransitoire longitudinale (voir article 8) est déterminée à partir de l'essai de rétablissement de la tension comme étant le rapport de la différence entre la tension en régime établi $u(\infty)$ et la somme des valeurs initiales des composantes transitoires $\Delta u'(0)$ et subtransitoires $\Delta u''(0)$ au courant dans l'induit (i_k) mesuré immédiatement avant la suppression du court-circuit (figure 12, page 58)

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

- 43 2 La constante de temps transitoire 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 transitoire de la tension $\Delta u'$ décroisse jusqu'à $1/e \approx 0,368$ fois sa valeur initiale

44 **Essai d'application de tension pour les positions longitudinale et transversale de l'axe des pôles du rotor par rapport à l'axe du champ d'induit**

Pour exécuter cet essai, une tension alternative à la fréquence nominale est appliquée entre deux bornes de ligne quelconque de l'enroulement d'induit

L'enroulement d'excitation doit être mis en court-circuit. La durée d'application de la tension doit être limitée pour réduire l'échauffement des pièces massives

Le rotor est tourné lentement de manière à déterminer les deux positions angulaires correspondant à la valeur maximale et à la valeur pratiquement nulle du courant dans l'enroulement d'excitation. La première position correspond à l'axe longitudinal, la seconde à l'axe transversal. La tension d'alimentation, le courant dans l'induit et la puissance absorbée sont mesurés dans chacune de ces deux positions du rotor. Le courant dans l'enroulement d'excitation n'est mesuré que pour déterminer les deux positions (axe longitudinal ou axe transversal) du rotor. Sa mesure ne nécessite donc pas obligatoirement un appareil de grande précision

Si les essais ne peuvent pas être exécutés au courant nominal ou à la tension nominale d'induit, la détermination des grandeurs rapportées à l'état non saturé ou saturé de la machine doit être effectuée en partant de plusieurs essais à différentes tensions d'alimentation (0,2 à 0,7) U_n

Les grandeurs sont reportées en fonction de la tension appliquée ou du courant dans l'induit et les valeurs cherchées sont déterminées par extrapolation

Pour les machines à encoches d'induit fermées ou semi-fermées et les encoches d'enroulement d'amortisseur fermées, la tension d'alimentation ne doit pas être inférieure à 0,2 fois la tension nominale

45 **Détermination des grandeurs à partir de l'essai d'application de tension pour les positions longitudinale et transversale de l'axe des pôles du rotor par rapport à l'axe du champ de l'induit du rotor**

La réactance subtransitoire longitudinale (voir article 8) est déterminée à partir de l'essai d'application de tension au moyen de la formule

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

dans laquelle

$$Z_d = \frac{U}{2I} \Omega, \quad R_d = \frac{P}{2I^2} \Omega$$

$$\left[x_d = \sqrt{z_d^2 - r_d^2}, \quad z_d = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{u}{i}, \quad r_d = \frac{3}{2} \frac{p}{i^2} \right]$$

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

- 43 1 The direct-axis subtransient reactance (see Clause 8) is determined from the voltage recovery test as the ratio of the difference between the sustained voltage $u(\infty)$ and the sum of the initial values of transient $\Delta u'(0)$ and subtransient $\Delta u''(0)$ voltage components of the armature current (i_k) measured immediately before the disconnection of the short-circuit (Figure 12, page 59)

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

- 43 2 The direct-axis transient open-circuit time constant (see Clause 17) is determined from the voltage recovery test as the time required for the transient voltage component Δu to decrease to $1/e \approx 0.368$ of its initial value

44 **Applied voltage test with the rotor in direct and quadrature axis positions with respect to the armature winding field axis**

To conduct the test, a c voltage at rated frequency is applied to any two line terminals of the armature winding

The excitation winding should be short-circuited. The duration of the voltage application should be limited to avoid serious over-heating of solid parts.

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

If tests cannot be performed at the rated armature current or voltage, the determination of quantities referred to the unsaturated or saturated state of the machine must be done from several tests with different supply voltages (0.2 - 0.7) U_n .

The quantities are plotted against applied voltage or armature current and the required values are found by extrapolation.

For machines with closed or semi-closed armature slots and closed damper winding slots, the supply voltage must not be lower than 0.2 of the rated value.

45 **Determination of quantities from the applied voltage test with the rotor in direct and quadrature axis positions with respect to the armature winding field axis**

Direct-axis subtransient reactance (see Clause 8) from the applied voltage tests is determined using the formula

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

where

$$Z_d = \frac{U}{2I} \Omega, \quad R_d = \frac{P}{2I^2} \Omega$$

$$\left[x_d = \sqrt{z_d^2 - r_d^2}; \quad z_d = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{u}{i}; \quad r_d = \frac{3}{2} \frac{p}{i^2} \right]$$

U , I et P étant la tension, le courant et la puissance absorbée pour la position du rotor où le courant dans l'enroulement d'excitation est maximal

- 45 1 La réactance subtransitoire transversale (voir article 9) est déterminée à partir de l'essai d'application de tension pour la position où le courant dans l'enroulement d'excitation est pratiquement nul, en appliquant la formule de l'article 45 dans laquelle l'indice « d » est remplacé par l'indice « q »

46 **Essai d'application de tension dans une position quelconque du rotor**

Pour exécuter cet essai, une tension alternative est appliquée successivement à chacune des paires de bornes de ligne de l'enroulement d'induit de la machine essayée, cette dernière étant à l'arrêt

L'enroulement d'excitation doit être mis en court-circuit. Il est nécessaire que la position reste identique pour les trois applications successives de la tension d'essai

Le rotor doit être calé s'il est nécessaire. La durée d'application de la tension doit être limitée pour réduire l'échauffement des pièces massives

La tension appliquée, le courant et la puissance absorbée par l'enroulement d'induit, ainsi que le courant dans l'enroulement d'excitation, sont mesurés pour chaque application de la tension à l'une des paires de bornes

Les conditions pour l'obtention des grandeurs rapportées à l'état non saturé ou saturé de la machine sont analogues à celles de l'article 44

47 **Détermination des grandeurs à partir de l'essai d'application de tension dans une position quelconque du rotor**

La réactance subtransitoire longitudinale (voir article 8) est déterminée à partir de l'essai d'application de tension dans une position quelconque du rotor de la manière suivante

Les réactances entre chaque paire de bornes de ligne de l'enroulement d'induit x_{12} , x_{23} et x_{31} , sont calculées d'après les formules (données à l'article 45, en remplaçant l'indice « d » par l'indice 12, 23 ou 31 selon les bornes alimentées)

La réactance subtransitoire longitudinale est alors calculée au moyen de la formule (en valeurs réduites ou en grandeurs physiques)

$$x_d = x_{\text{moy}} \pm \Delta x$$

dans laquelle:

$$x_{\text{moy}} = \frac{x_{12} + x_{23} + x_{31}}{3}$$

$$\Delta x = \frac{2}{3} \sqrt{x_{12}(x_{12} - x_{23}) + x_{23}(x_{23} - x_{31}) + x_{31}(x_{31} - x_{12})}$$

Le signe qui précède Δx est déterminé d'après la règle suivante : plus (+), si le plus grand des trois courants mesurés dans l'enroulement d'excitation correspond à la plus grande réactance mesurée de l'induit, moins (—), si le plus grand des trois courants mesurés dans l'enroulement d'excitation correspond à la plus petite des réactances mesurées entre une paire de bornes de ligne de l'enroulement d'induit

- 47 1 La réactance subtransitoire transversale (voir article 9) est déterminée à partir de l'essai d'application de tension dans une position quelconque du rotor de façon analogue à la méthode décrite à l'article 47. Le signe qui précède Δx est déterminé par la règle suivante : plus (+), si le plus petit des trois courants mesurés dans l'enroulement d'excitation correspond à la plus grande des réactances mesurées

The values of the voltage, current and power input are measured for the rotor position which gives the maximum excitation winding current

- 45 1 Quadrature-axis subtransient reactance (see Clause 9) from the applied voltage test is determined using the formulae given in Clause 45 where index “d” is replaced by index “q” The voltage current and power input are measured for the rotor position which gives practically zero excitation winding current

46 Applied voltage test with the rotor in any arbitrary position

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

The excitation winding should be short-circuited It is necessary that the rotor position remains the same for all three applications of test voltage

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

The applied voltage, current and power input to the armature, and the excitation winding current are measured when applying a c supply voltage to each pair of the terminals

Requirements for obtaining quantities referred to the unsaturated or saturated state of the machine are similar to Clause 44

47 Determination of quantities from the applied voltage test with the rotor in any arbitrary position

Direct-axis subtransient reactance (see Clause 8) from the applied voltage test with the rotor in any arbitrary position is determined as follows

The reactances between each pair of the line terminals of the armature winding x_{12} , x_{23} and x_{31} are calculated from the formulae given in Clause 45 (replacing subscript “d” by subscripts 12, 23 and 31 according to the terminals between which voltage is applied)

The direct-axis subtransient reactance is then calculated from the formula (in per unit or physical values):

$$x_d = x_{med} \pm \Delta x$$

where:

$$x_{med} = \frac{x_{12} + x_{23} + x_{31}}{3}$$

$$\Delta x = \frac{2}{3} \sqrt{x_{12}(x_{12} - x_{23}) + x_{23}(x_{23} - x_{31}) + x_{31}(x_{31} - x_{12})}$$

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

- 47 1 Quadrature-axis subtransient reactance (see Clause 9) from the stationary impedance test with the rotor in any arbitrary position is determined similarly to the method described in Clause 47

The sign before Δx is determined from the following relations plus (+), if the minimum of the three measured current values of the excitation circuit corresponds to the largest measured reactance

entre une paire de bornes de ligne de l'enroulement induit, moins (—), si le plus petit des trois courants d'excitation mesurés correspond à la plus petite réactance mesurée de l'induit

48 Essai de court-circuit permanent entre deux phases

Pour exécuter l'essai de court-circuit permanent entre deux phases, deux bornes de ligne quelconques sont mises en court-circuit (figure 13) et la machine est entraînée à sa vitesse de synchronisme au moyen d'un moteur approprié

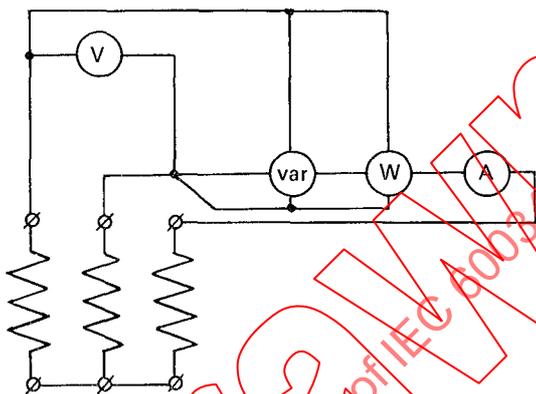


FIGURE 13

Le courant de court-circuit (I_{k2}), le courant d'excitation et la tension (U_{k2}) entre la borne à circuit ouvert et les deux bornes mises en court-circuit sont mesurés

Pour augmenter la précision des mesures en présence des harmoniques de la tension et du courant, il est recommandé de mesurer la puissance active (P) et la puissance réactive (Q)

Les mesures sont faites pour plusieurs valeurs du courant de court-circuit

Pour éviter un échauffement exagéré des pièces massives, la durée de l'essai de court-circuit entre deux phases pour des courants supérieurs à $0,3 I_n$ doit être limitée à l'intervalle de temps nécessaire à la lecture des appareils

Pour les machines à pôles saillants, le courant peut être augmenté jusqu'à sa valeur nominale si les vibrations de la machine ne dépassent pas les limites admissibles. Pour les machines à rotor lisse, le courant est limité habituellement à la moitié de sa valeur nominale

49 Détermination des grandeurs à partir de l'essai de court-circuit permanent entre deux phases

La réactance inverse (voir article 10) est déterminée à partir de l'essai de court-circuit permanent entre deux phases en appliquant les formules

$$X_2 = \frac{P}{\sqrt{3} I_{k2}^2} \Omega, \quad \left[x_2 = \sqrt{3} \frac{p}{i_{k2}^2} \right]$$

Cette formule s'applique dans les cas où l'on peut négliger les harmoniques du courant ou de la tension

between a pair of armature winding line terminals; minus (—), if the minimum of the three measured current values of the excitation circuit corresponds to the smallest measured armature reactance

48 **Line-to-line sustained short-circuit test**

To conduct the line-to-line sustained short-circuit test, any two line terminals are short-circuited (Figure 13) and the machine is driven at rated speed by some prime-mover

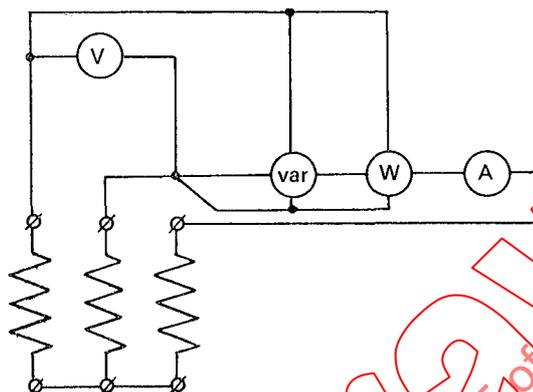


FIGURE 13

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

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

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

To avoid serious overheating of solid parts, the duration of the line-to-line sustained short-circuit test at currents above $0.3 I_n$ should be limited to the time required for taking the readings of the instruments

For salient pole machines the current may be increased up to the rated value, if the vibration of the machine does not exceed permissible values. For non-salient pole machines the armature current is usually limited to 0.5 of the rated value

49 **Determination of quantities from the line-to-line sustained short-circuit test**

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

$$X_2 = \frac{P}{\sqrt{3} I_{k2}^2} \Omega, \left[\lambda_2 = \sqrt{3} \frac{P}{i_{k2}^2} \right]$$

This formula applies when voltage or current harmonics may be ignored

$$X_2 = \frac{U^2}{P} - \frac{P^2}{P^2 + Q^2} \frac{1}{\sqrt{3}}; \left[x_2 = \frac{u^2}{p} - \frac{p^2}{p^2 + q^2} \frac{1}{\sqrt{3}} \right]$$

Cette formule s'applique dans les cas où l'on doit tenir compte des harmoniques du courant ou de la tension

La réactance inverse est déterminée pour chacune des valeurs mesurées du courant de court-circuit X_2 est reporté sur un diagramme en fonction du courant

Note – La valeur de X_2 obtenue pour un courant entre deux phases égal à $\sqrt{3}$ fois le courant nominal d'induit sera considérée comme la valeur de la réactance inverse pour le courant nominal

- 49 1 La résistance inverse (voir article 11) est déterminée à partir de l'essai de court-circuit permanent entre deux phases en appliquant la formule

$$R_2 = \frac{U^2}{Q} - \frac{Q^2}{P^2 + Q^2} \frac{1}{\sqrt{3}} \Omega; \left[r_2 = \frac{u^2}{q} - \frac{q^2}{p^2 + q^2} \frac{1}{\sqrt{3}} \right]$$

La résistance inverse est déterminée pour chacune des valeurs mesurées du courant de court-circuit R_2 est reportée sur un diagramme en fonction du courant

Note – La valeur de R_2 , obtenue pour un courant égal à $\sqrt{3}$ fois le courant nominal d'induit, sera considérée comme la valeur de la résistance inverse au courant nominal

50 Essai de rotation inverse

L'essai est effectué en appliquant une tension symétrique réduite (0,02 à 0,2) U_n fournie par une source extérieure ayant un ordre de succession des phases inverse, à la machine entraînée à sa vitesse nominale, c'est-à-dire que la machine fonctionne comme un frein électromagnétique avec un glissement égal à 2

L'enroulement d'excitation doit être mis en court-circuit

Si la tension résiduelle de la machine essayée dépasse 30 % de la tension d'alimentation, le rotor doit être démagnétisé avant de commencer l'essai (voir article 37) La tension et le courant des trois phases et la puissance fournie doivent être mesurés au cours de l'essai

51 Détermination des grandeurs à partir de l'essai de rotation inverse

La réactance inverse (voir articles 10 et 11) est déterminée à partir de l'essai de rotation inverse en appliquant les formules

$$X_2 = \sqrt{Z_2^2 - R_2^2} \Omega, \quad Z_2 = \frac{U}{\sqrt{3} I} \Omega, \quad R_2 = \frac{P}{3 I^2} \Omega$$

$$\left[x_2 = \sqrt{z_2^2 - r_2^2}, \quad z_2 = \frac{u}{i}, \quad r_2 = \frac{p}{i^2} \right]$$

dans lesquelles

P = puissance fournie

I = courant moyen mesuré

U = valeur moyenne mesurée de la tension appliquée

La réactance et la résistance inverses sont déterminées pour chacune des valeurs mesurées des tensions d'alimentation X_2 et R_2 sont reportées sur un diagramme en fonction du courant

52 Essai d'alimentation en monophasé des trois phases

L'essai d'application d'une tension monophasée aux bornes des trois phases montées en série ou en parallèle est exécuté sur la machine entraînée à la vitesse nominale ou au voisinage de celle-ci

$$X_2 = \frac{U^2}{P} \frac{P^2}{P^2 + Q^2} \frac{1}{\sqrt{3}}; \left[x_2 = \frac{u^2}{p} \frac{p^2}{p^2 + q^2} \frac{1}{\sqrt{3}} \right]$$

This formula applies when the voltage or current harmonics must be considered

Negative sequence reactance is determined for each measured short-circuit current value. On the basis of the test data X_2 is plotted against current.

Note – The value of X_2 when the current equals $\sqrt{3}$ times the rated phase current will be taken as the rated current value.

- 49.1 Negative sequence resistance (see Clause 11) from the line-to-line sustained short-circuit test is determined using the formula

$$R_2 = \frac{U^2}{Q} \frac{Q^2}{P^2 + Q^2} \frac{1}{\sqrt{3}} \Omega, \left[r_2 = \frac{u^2}{q} \frac{q^2}{p^2 + q^2} \frac{1}{\sqrt{3}} \right]$$

Negative sequence resistance is determined for each measured short-circuit armature current. On the basis of the test data R_2 is plotted against armature current.

Note – The value of R_2 when the current equals $\sqrt{3}$ times the rated phase current will be taken as the rated current value.

50 Negative-phase sequence test

The test is conducted when the reduced symmetrical voltage (0.02 - 0.2) U_n is applied to a machine driven at rated speed connected to an external source of supply with negative-phase sequence, that is, operating as an electromagnetic brake with the slip equal to 2.

The excitation winding should be short-circuited.

If the residual voltage of the machine under test exceeds 0.30 of the supply voltage, the rotor should be demagnetized before testing the machine (see Clause 37). The voltage and current in all three phases and the supply power are measured during the test.

51 Determination of quantities from the negative-phase sequence test

Negative sequence reactance and resistance (see Clauses 10 and 11) are determined from the negative-phase sequence test by the formulae

$$X_2 = \sqrt{Z_2^2 - R_2^2} \Omega, \quad Z_2 = \frac{U}{\sqrt{3} I} \Omega, \quad R_2 = \frac{P}{3 I^2} \Omega$$

$$\left[x_2 = \sqrt{z_2^2 - i_2^2}; \quad z_2 = \frac{u}{i}; \quad r_2 = \frac{p}{i^2} \right]$$

where:

P = input power

I = average measured current

U = average measured voltage applied

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

52 Single-phase voltage application to the three-phase test

The test of single-phase voltage application across the terminals of the three phases connected in series or in parallel is conducted with the machine driven at rated speed.

Le raccordement des phases doit être effectué de telle sorte qu'à chaque instant les courants dans les trois phases aient la même direction, par exemple, de l'extrémité neutre vers l'extrémité ligne ou inversement, comme le comporte le régime homopolaire. L'enroulement d'excitation est court-circuité.

Les grandeurs mesurées sont la tension, le courant et la puissance absorbée et l'essai est effectué pour plusieurs valeurs de la tension d'alimentation. Les valeurs de la tension appliquée sont choisies de telle sorte que le courant dans l'enroulement induit soit de l'ordre de grandeur du courant nominal.

53 Détermination des grandeurs à partir de l'essai d'alimentation en monophasé des trois phases

La réactance et la résistance homopolaires (voir articles 12 et 13) sont déterminées à partir de l'essai d'application d'une tension monophasée aux bornes des trois phases en appliquant la formule:

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

dans le cas où les trois phases de l'enroulement sont montées en série

$$Z_0 = \frac{U}{3I} \Omega, \quad R_0 = \frac{P}{3I^2} \Omega; \quad \left[z_0 = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{u}{i}, \quad r_0 = \frac{p}{i^2} \right]$$

dans le cas où les trois phases de l'enroulement sont montées en parallèle

$$Z_0 = \frac{3U}{I} \Omega; \quad R_0 = \frac{3P}{I^2} \Omega, \quad \left[z_0 = 3\sqrt{3} \frac{u}{i}, \quad r_0 = \frac{9p}{i^2} \right]$$

54 Essai en court-circuit permanent entre deux conducteurs de phase et le point neutre

Pour effectuer l'essai en court-circuit permanent entre deux conducteurs de phase et le point neutre, l'enroulement induit est connecté en étoile, deux bornes de ligne sont reliées directement au point neutre, la machine est entraînée à sa vitesse nominale et est excitée (figure 14)

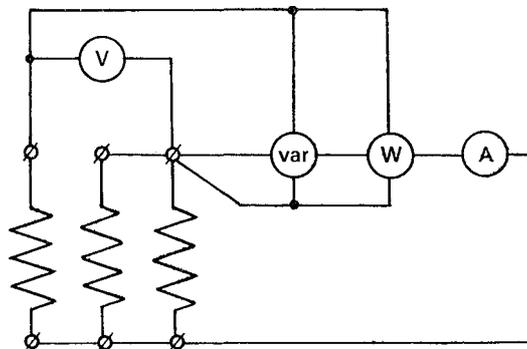


FIGURE 14

The connections should be arranged so that the current in the three phases at any instant should flow in the same sense, that is from neutral to line terminal or vice versa as defined by zero-sequence. The excitation winding is short-circuited.

Measurements are taken of the applied voltage, current and power input at several values of supply voltage. The values of the supplied voltage are chosen so that the armature winding current is of the order of the rated value.

53 **Determination of quantities from the single-phase voltage application to the three-phase test**

The zero sequence reactance and resistance (see Clauses 12 and 13) are determined from the test of single-phase voltage application across the terminals using the formula:

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} \Omega, \quad [x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}]$$

when the three phases of the winding are connected in series:

$$Z_0 = \frac{U}{3I} \Omega, \quad R_0 = \frac{P}{3I^2} \Omega, \quad [z_0 = \frac{u}{\sqrt{3}i}, r_0 = \frac{p}{i^2}]$$

when the three phases of the winding are connected in parallel:

$$Z_0 = \frac{3U}{I} \Omega, \quad R_0 = \frac{3P}{I^2} \Omega, \quad [z_0 = 3\sqrt{3} \frac{u}{i}, r_0 = \frac{9p}{i^2}]$$

54 **Line-to-line and to neutral sustained short-circuit test**

To conduct the line-to-line and to neutral sustained short-circuit test the armature winding is star connected, two line terminals are short-circuited to neutral, the machine is driven at rated speed and is excited (Figure 14).

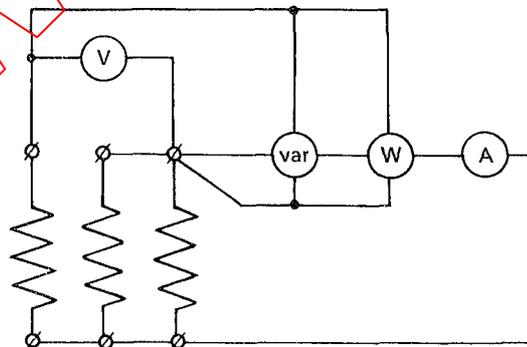


FIGURE 14

Les grandeurs mesurées sont la tension entre la borne à circuit ouvert et le point neutre (U_0) et le courant dans la connexion qui relie les bornes court-circuitées au point neutre (I_0)

Des mesures de la puissance active et de la puissance réactive sont faites pour tenir compte de l'influence des harmoniques

Les mesures sont faites pour plusieurs valeurs de courant dans le point neutre. Les valeurs du courant et la durée de l'essai sont limitées par l'échauffement ou par les vibrations

55 Détermination des grandeurs à partir de l'essai de court-circuit permanent entre deux conducteurs de phase et le point neutre

La réactance homopolaire (voir article 12) est déterminée à partir de l'essai de court-circuit permanent entre deux conducteurs de phase et le point neutre en appliquant les formules

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

Cette formule s'applique dans les cas où l'on peut négliger les harmoniques de courant ou de tension

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

Cette formule s'applique dans le cas où l'on doit tenir compte des harmoniques de courant ou de tension, dans lesquelles U , P et Q désignent respectivement les valeurs mesurées de la tension, de la puissance active et de la puissance réactive

La réactance homopolaire est déterminée pour plusieurs valeurs du courant dans le point neutre. X_0 est reporté sur un diagramme en fonction du courant dans le point neutre

Note – La valeur de X_0 considérée comme la valeur au courant nominal sera celle correspondant à un courant dans le point neutre égal à trois fois le courant de phase nominal

55 1 La résistance homopolaire (voir article 13) est déterminée à partir de l'essai de court-circuit permanent entre deux conducteurs de phase et le point neutre en appliquant la formule

$$R_0 = \frac{U_0^2}{P} \frac{P^2}{P^2 + Q^2} \Omega, \quad \left[r_0 = \frac{u_0^2}{p} \frac{p^2}{p^2 + q^2} \right]$$

pour plusieurs valeurs du courant dans le point neutre

R_0 est reporté sur un diagramme en fonction du courant dans le point neutre

Note – La valeur de R_0 considérée comme la valeur au courant nominal sera celle correspondant à un courant dans le point neutre égal à trois fois le courant de phase nominal

56 Mesures de la résistance en courant continu d'un enroulement au moyen de la méthode du voltmètre et de l'ampèremètre ou de la méthode du pont

Toute source de courant continu (batterie, génératrice, etc.) ayant une puissance suffisante et fournissant une tension stable peut être utilisée pour la mesure des résistances en courant continu par la méthode du voltmètre et de l'ampèremètre ou par la méthode du pont

La résistance doit être mesurée directement aux bornes de l'enroulement avec le rotor à l'arrêt

La résistance de l'enroulement d'induit doit être mesurée sur chaque phase séparément. Si, pour une raison quelconque, la résistance de chaque phase ne peut pas être mesurée directement, les mesures sont faites successivement entre chaque paire de bornes de ligne de l'enroulement d'induit

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

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

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

55 **Determination of quantities from the line-to-line and to neutral sustained short-circuit test**

The zero sequence reactance (see Clause 12) from the line-to-line and to neutral short-circuit test is determined by the formulae

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

This formula applies when voltage or current harmonics may be ignored

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

This formula applies when the voltage or current harmonics must be considered, where U , P and Q are measured values of the voltage, active and reactive power respectively

The zero sequence reactance is calculated for several neutral current values. On the basis of the test data, X_0 is plotted against neutral current

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

55.1 The zero sequence resistance (see Clause 13) from the line-to-line and to neutral short-circuit test is determined by the following formula for several neutral current values:

$$R_0 = \frac{U_0^2}{P} \frac{P^2}{P^2 + Q^2} \Omega, \quad \left[r_0 = \frac{u_0^2}{p} \frac{p^2}{p^2 + q^2} \right]$$

On the basis of the test data, R_0 is plotted against neutral current

Note – The value of R_0 when the neutral current equals three times the rated phase current, will be taken as the rated current value

56 **Direct-current winding resistance measurements by the voltmeter and ammeter method and by the bridge method**

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

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

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