

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC
34-4**

Deuxième édition
Second edition
1985

Machines électriques tournantes

Partie 4:

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

Rotating electrical machines

Part 4:

Methods for determining synchronous machine
quantities from tests



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 34-4:1985

Validité de la présente publication

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu par la CEI afin qu'il reflète l'état actuel de la technique.

Des renseignements relatifs à la date de reconfirmation de la publication sont disponibles auprès du Bureau Central de la CEI.

Les renseignements relatifs à ces révisions, à l'établissement des éditions révisées et aux amendements peuvent être obtenus auprès des Comités nationaux de la CEI et dans les documents ci-dessous:

- **Bulletin de la CEI**
- **Annuaire de la CEI**
Publié annuellement
- **Catalogue des publications de la CEI**
Publié annuellement et mis à jour régulièrement

Terminologie

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la CEI 50: *Vocabulaire Electrotechnique International* (VEI), qui se présente sous forme de chapitres séparés traitant chacun d'un sujet défini. Des détails complets sur le VEI peuvent être obtenus sur demande. Voir également le dictionnaire multilingue de la CEI.

Les termes et définitions figurant dans la présente publication ont été soit tirés du VEI, soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

Symboles graphiques et littéraux

Pour les symboles graphiques, les symboles littéraux et les signes d'usage général approuvés par la CEI, le lecteur consultera:

- la CEI 27: *Symboles littéraux à utiliser en électro-technique*;
- la CEI 417: *Symboles graphiques utilisables sur le matériel. Index, relevé et compilation des feuilles individuelles*;
- la CEI 617: *Symboles graphiques pour schémas*;

et pour les appareils électromédicaux,

- la CEI 878: *Symboles graphiques pour équipements électriques en pratique médicale*.

Les symboles et signes contenus dans la présente publication ont été soit tirés de la CEI 27, de la CEI 417, de la CEI 617 et/ou de la CEI 878, soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

Publications de la CEI établies par le même comité d'études

L'attention du lecteur est attirée sur les listes figurant à la fin de cette publication, qui énumèrent les publications de la CEI préparées par le comité d'études qui a établi la présente publication.

Validity of this publication

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC, thus ensuring that the content reflects current technology.

Information relating to the date of the reconfirmation of the publication is available from the IEC Central Office.

Information on the revision work, the issue of revised editions and amendments may be obtained from IEC National Committees and from the following IEC sources:

- **IEC Bulletin**
- **IEC Yearbook**
Published yearly
- **Catalogue of IEC publications**
Published yearly with regular updates

Terminology

For general terminology, readers are referred to IEC 50: *International Electrotechnical Vocabulary* (IEV), which is issued in the form of separate chapters each dealing with a specific field. Full details of the IEV will be supplied on request. See also the IEC Multilingual Dictionary.

The terms and definitions contained in the present publication have either been taken from the IEV or have been specifically approved for the purpose of this publication.

Graphical and letter symbols

For graphical symbols, and letter symbols and signs approved by the IEC for general use, readers are referred to publications:

- IEC 27: *Letter symbols to be used in electrical technology*;
- IEC 417: *Graphical symbols for use on equipment. Index, survey and compilation of the single sheets*;
- IEC 617: *Graphical symbols for diagrams*;

and for medical electrical equipment,

- IEC 878: *Graphical symbols for electromedical equipment in medical practice*.

The symbols and signs contained in the present publication have either been taken from IEC 27, IEC 417, IEC 617 and/or IEC 878, or have been specifically approved for the purpose of this publication.

IEC publications prepared by the same technical committee

The attention of readers is drawn to the end pages of this publication which list the IEC publications issued by the technical committee which has prepared the present publication.

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC
34-4**

Deuxième édition
Second edition
1985

Machines électriques tournantes

Partie 4:

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

Rotating electrical machines

Part 4:

Methods for determining synchronous machine
quantities from tests

© CEI 1985 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 3, rue de Varembe Genève Suisse



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

XC

Pour prix, voir catalogue en vigueur
For price, see current catalogue

SOMMAIRE

	Pages
PRÉAMBULE	10
PRÉFACE	10

SECTION UN – DOMAINE D'APPLICATION ET OBJET

Articles

1. Domaine d'application	14
2. Objet	14

SECTION DEUX – GÉNÉRALITÉS

3. Généralités	14
----------------------	----

SECTION TROIS – TERMINOLOGIE ET MÉTHODES D'ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

4. Réactance synchrone longitudinale X_d	18
5. Rapport de court-circuit K_c	18
6. Réactance synchrone transversale X_q	18
7. Réactance transitoire longitudinale X'_d	20
8. Réactance subtransitoire longitudinale X''_d	20
9. Réactance subtransitoire transversale X''_q	20
10. Réactance inverse X_2	22
11. Résistance inverse R_2	22
12. Réactance homopolaire X_0	22
13. Résistance homopolaire R_0	22
14. Réactance de Potier X_p	24
15. Résistance en courant continu de l'induit et de l'enroulement R_a et R_f	24
16. Résistance directe de l'enroulement d'induit R_l	24
17. Constante de temps transitoire longitudinale à circuit ouvert τ'_{do}	24
18. Constante de temps transitoire longitudinale en court-circuit τ'_d	24
19. Constante de temps subtransitoire longitudinale en court-circuit τ''_d	26
20. Constante de temps en court-circuit de l'induit τ_a	26
21. Temps d'accélération τ_j	26
22. Énergie cinétique réduite H	26
23. Courant d'excitation assigné I_{fn}	28
24. Variation assignée de tension ΔU_n	28

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

25. Essai de saturation à vide	28
26. Essai en court-circuit triphasé permanent	30
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
29. Détermination du courant d'excitation correspondant à la tension assignée et au courant d'induit assigné à facteur de puissance nul (surexcitation)	34
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 assignée et au courant d'induit assigné à facteur de puissance nul (surexcitation)	36

CONTENTS

FOREWORD	Page 11
PREFACE	11

SECTION ONE – SCOPE AND OBJECT

Clause

1. Scope	15
2. Object	15

SECTION TWO – GENERAL

3. General	15
------------------	----

SECTION THREE – TERMINOLOGY AND METHODS OF DETERMINATION

4. Direct-axis synchronous reactance X_d	19
5. Short-circuit ratio K_c	19
6. Quadrature-axis synchronous reactance X_q	19
7. Direct-axis transient reactance X'_d	21
8. Direct-axis subtransient reactance X''_d	21
9. Quadrature-axis subtransient reactance X''_q	21
10. Negative-sequence reactance X_2	23
11. Negative-sequence resistance R_2	23
12. Zero-sequence reactance X_0	23
13. Zero-sequence resistance R_0	23
14. Potier reactance X_p	25
15. Armature and excitation winding direct-current resistance R_a and R_f	25
16. Positive-sequence armature winding resistance R_1	25
17. Direct-axis transient open-circuit time constant τ_{do}	25
18. Direct-axis transient short-circuit time constant τ_d	25
19. Direct-axis subtransient short-circuit time constant τ''_d	27
20. Armature short-circuit time constant τ_a	27
21. Acceleration time τ_j	27
22. Stored energy constant H	27
23. Rated excitation current I_{fn}	29
24. Rated voltage regulation ΔU_n	29

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

25. No-load saturation test	29
26. Sustained three-phase short-circuit test	31
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. Determination of the excitation current corresponding to the rated voltage and rated armature current at zero power-factor (overexcitation)	35
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)	37

31. Détermination du courant d'excitation assigné au moyen du diagramme de Potier	36
32. Détermination du courant d'excitation assigné au moyen du diagramme de l'ASA	40
33. Détermination du courant d'excitation assigné au moyen du diagramme suédois	42
34. Essai d'excitation négative	44
35. Détermination de X_q à partir de l'essai d'excitation négative	44
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	50
40. Essai de court-circuit triphasé brusque	50
41. Détermination des grandeurs à partir de l'essai de court-circuit triphasé brusque	56
42. Essai de rétablissement de la tension	58
43. Détermination des grandeurs à partir de l'essai de rétablissement de la tension	60
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	62
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	64
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	66
50. Essai de rotation inverse	66
51. Détermination des grandeurs à partir de l'essai de rotation inverse	68
52. Essai d'alimentation en monophasé des trois phases	68
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	70
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	72
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	76
60. Essai de décroissance du courant d'excitation avec l'enroulement d'induit en court-circuit	76
61. Détermination de τ'_d à partir de l'essai de décroissance du courant d'excitation avec l'enroulement d'induit en court-circuit	76
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	80
68. Essai de ralentissement en charge de machines accouplées mécaniquement avec la machine synchrone fonctionnant en moteur	80

31. Determination of the rated excitation current by the Potier diagram	37
32. Determination of the rated excitation current by the ASA diagram	41
33. Determination of the rated excitation current by the Swedish diagram	43
34. Negative excitation test	45
35. Determination of X_q from the negative excitation test	45
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	51
40. Sudden three-phase short-circuit test	51
41. Determination of quantities from the sudden three-phase short-circuit test	57
42. Voltage recovery test	59
43. Determination of quantities from the voltage recovery test	61
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	63
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	65
48. Line-to-line sustained short-circuit test	65
49. Determination of quantities from the line-to-line sustained short-circuit test	67
50. Negative-phase sequence test	67
51. Determination of quantities from the negative-phase sequence test	69
52. Single-phase voltage application to the three-phase test	69
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	71
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	73
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	77
60. Field current decay test with the armature winding short-circuited	77
61. Determination of τ'_d from the field current decay test with the armature winding short-circuited	77
62. Suspended rotor oscillation test	77
63. Determination of τ_j and H from suspended rotor oscillation test	77
64. Auxiliary pendulum swing test	79
65. Determination of τ_j and H from the auxiliary pendulum swing test	79
66. No-load retardation test	79
67. Determination of τ_j and H from the no-load retardation test	81
68. On-load retardation test of mechanically coupled machines with the synchronous machine operating as a motor	81

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	82
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 I	86
---------------------	----

ANNEXE A — Méthodes non confirmées pour la détermination à partir d'essais des grandeurs des machines synchrones	90
A1. Domaine d'application	90
A2. Objet	90
A3. Généralités	90

TERMINOLOGIE ET MÉTHODES D'ÉTUDES EXPÉRIMENTALES

A4. Courant d'excitation correspondant au courant d'induit assigné en court-circuit (i_{fk})	92
A5. Réactance synchrone longitudinale X_d	92
A6. Réactance synchrone transversale X_q	92
A7. Réactance transitoire longitudinale X'_d	94
A8. Réactance transitoire transversale X'_q	94
A9. Réactance subtransitoire transversale X''_q	94
A10. Réactance inverse X_2	94
A11. Réactance de fuites d'induit X_σ	94
A12. Impédance de démarrage initiale des moteurs synchrones Z_{st}	96
A13. Constante de temps transitoire longitudinale à circuit ouvert τ'_{do}	96
A14. Constante de temps transitoire longitudinale en court-circuit τ'_d	96
A15. Constante de temps transitoire transversale à circuit ouvert τ'_{qo}	96
A16. Constante de temps transitoire transversale en court-circuit τ'_q	96
A17. Constante de temps subtransitoire longitudinale à circuit ouvert τ''_{do}	98
A18. Constante de temps subtransitoire transversale à circuit ouvert τ''_{qo}	98
A19. Constante de temps subtransitoire transversale en court-circuit τ''_q	98
A20. Constante de temps longitudinale à circuit ouvert de l'enroulement d'excitation τ_{fdo}	100
A21. Constante de temps longitudinale à circuit ouvert du circuit amortisseur équivalent τ_{kdo}	100
A22. Constante de temps longitudinale en court-circuit de l'enroulement d'excitation τ_{fd}	100
A23. Constante de temps longitudinale en court-circuit du circuit amortisseur équivalent τ_{kd}	100
A24. Caractéristiques de réponse en fréquence	100

DESCRIPTION DES ESSAIS ET DÉTERMINATION DES GRANDEURS ET DES CARACTÉRISTIQUES À PARTIR DES ESSAIS

A25. Essai de surexcitation à facteur de puissance nul et à tension d'induit variable	102
A26. Détermination du courant d'excitation correspondant au courant d'induit assigné en court-circuit permanent (i_{fk})	104
A27. Essai avec angle interne variable	104
A28. Détermination des grandeurs à partir d'un essai avec angle interne variable	104
A29. Essai de suppression d'une basse tension appliquée à l'induit lors d'un essai à un très faible glissement	106
A30. Détermination des grandeurs à partir de l'essai de suppression d'une basse tension appliquée à l'induit lors d'un essai à un très faible glissement	106
A31. Essai de suppression d'une basse tension appliquée à l'induit, la machine tournant en asynchrone en charge	108

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	83
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 I	87
-------------------	----

APPENDIX A — Unconfirmed test methods for determining synchronous machine quantities from tests	91
A1. Scope	91
A2. Object	91
A3. General	91

TERMINOLOGY AND METHODS OF EXPERIMENTAL STUDY

A4. Excitation current corresponding to the rated armature short-circuit current (i_{fk})	93
A5. Direct-axis synchronous reactance X_d	93
A6. Quadrature-axis synchronous reactance X_q	93
A7. Direct-axis transient reactance X'_d	95
A8. Quadrature-axis transient reactance X'_q	95
A9. Quadrature-axis subtransient reactance X''_q	95
A10. Negative-sequence reactance X_2	95
A11. Armature-leakage reactance X_σ	95
A12. Initial starting impedance of synchronous motors Z_{st}	97
A13. Direct-axis transient open-circuit time constant τ'_{do}	97
A14. Direct-axis transient short-circuit time constant τ'_d	97
A15. Quadrature-axis transient open-circuit time constant τ'_{qo}	97
A16. Quadrature-axis transient short-circuit time constant τ'_q	97
A17. Direct-axis subtransient open-circuit time constant τ''_{do}	99
A18. Quadrature-axis subtransient open-circuit time constant τ''_{qo}	99
A19. Quadrature-axis subtransient short-circuit time constant τ''_q	99
A20. Direct-axis open-circuit excitation winding time constant τ_{fdo}	101
A21. Direct-axis open-circuit equivalent damper circuit time constant τ_{kdo}	101
A22. Direct-axis short-circuit excitation winding time constant τ_{fd}	101
A23. Direct-axis short-circuit equivalent damper winding time constant τ_{kd}	101
A24. Frequency response characteristics	101

DESCRIPTION OF THE TESTS AND DETERMINATION OF QUANTITIES AND CHARACTERISTICS FROM THESE TESTS

A25. Over-excitation test at zero power factor and variable armature voltage	103
A26. Determination of the excitation current corresponding to the rated armature sustained short-circuit current (i_{fk})	105
A27. Phase shifting test	105
A28. Determination of quantities from the phase shifting test	105
A29. Disconnecting applied low armature voltage at a very low-slip test	107
A30. Determination of quantities from the disconnecting applied low armature voltage at a very low-slip test	107
A31. Disconnecting applied low armature voltage test, the machine running asynchronously on load	109

A32.	Détermination des grandeurs à partir de l'essai de suppression brusque d'une basse tension appliquée à l'induit, la machine tournant en asynchrone en charge	110
A33.	Essai de mise en court-circuit brusque de la machine, tournant en charge, alimentée à basse tension	112
A34.	Détermination des grandeurs au moyen d'un court-circuit brusque de la machine tournant en charge au cours d'un essai à basse tension	112
A35.	Essai de court-circuit brusque entre deux phases	114
A36.	Détermination de la réactance inverse à partir de l'essai de court-circuit brusque entre deux phases	114
A37.	Essai de court-circuit triphasé brusque appliqué à la machine après déconnexion de la ligne	116
A38.	Détermination des grandeurs à partir de l'essai de court-circuit triphasé brusque appliqué à la machine après déconnexion de la ligne	116
A39.	Essai d'application d'une tension avec le rotor enlevé	116
A40.	Détermination des grandeurs à partir de l'essai d'application d'une tension	116
A41.	Essai à rotor bloqué	118
A42.	Détermination de l'impédance de démarrage initiale au moyen de l'essai à rotor bloqué	120
A43.	Essai d'application brusque de l'excitation avec l'enroulement d'induit à circuit ouvert	120
A44.	Détermination de τ_{d0} à partir de l'essai d'application brusque de l'excitation avec l'enroulement d'induit à circuit ouvert	122
A45.	Essai d'application brusque de l'excitation avec l'enroulement d'induit en court-circuit	122
A46.	Détermination de τ_d à partir de l'essai d'application brusque de l'excitation avec l'enroulement d'induit en court-circuit	122
A47.	Essai de rétablissement de la tension	122
A48.	Détermination des grandeurs à partir de l'essai de rétablissement de la tension	124
A49.	Essai d'extinction du champ avec l'enroulement d'induit à circuit ouvert	124
A50.	Détermination des grandeurs à partir de l'essai d'extinction du champ avec l'enroulement d'induit à circuit ouvert	124
A51.	Essai d'extinction du champ avec l'enroulement d'induit en court-circuit	128
A52.	Détermination des grandeurs à partir de l'essai d'extinction du champ avec l'enroulement d'induit en court-circuit	128
A53.	Essai de fonctionnement en asynchrone en charge	128
A54.	Détermination des caractéristiques de réponse en fréquence et des grandeurs à partir de l'essai de fonctionnement en asynchrone en charge	130
A55.	Essai de fonctionnement en asynchrone à basse tension	132
A56.	Détermination des caractéristiques de réponse en fréquence et des grandeurs à partir de l'essai de fonctionnement en asynchrone à basse tension	132
A57.	Essai d'application à l'arrêt d'une tension de fréquence variable	134
A58.	Détermination des caractéristiques de réponse en fréquence et des grandeurs à partir de l'essai d'application à l'arrêt d'une tension de fréquence variable	134
A59.	Essai de décroissance d'un courant continu dans l'enroulement d'induit à l'arrêt	138
A60.	Détermination des caractéristiques de réponse en fréquence et des grandeurs à partir de l'essai de décroissance d'un courant continu dans l'induit	140
A61.	Essai d'application brusque d'un courant continu à l'arrêt	146
A62.	Détermination des caractéristiques de réponse en fréquence à partir de l'essai d'application brusque d'un courant continu à l'arrêt	150
A63.	Détermination des grandeurs par calcul en utilisant des grandeurs connues au moyen d'essais	152
TABLEAU IA		154
LISTE DE RÉFÉRENCES		160
FIGURES A1 à A23		164

A32.	Determination of quantities from the sudden disconnection of applied low armature voltage, the machine running asynchronously on load, test	111
A33.	Sudden short-circuiting of machine, running on load at low-voltage, test	113
A34.	Determination of quantities from sudden short-circuiting, running on load at low voltage test	113
A35.	Sudden line-to-line short-circuit test	115
A36.	Determination of negative-sequence reactance from the sudden line-to-line short-circuit test	115
A37.	Suddenly applied short-circuit test following disconnection from line	117
A38.	Determination of quantities from the suddenly applied short-circuit test following disconnection from line	117
A39.	Applied voltage test with rotor removed	117
A40.	Determination of quantities from the applied voltage test	117
A41.	Locked rotor test	119
A42.	Determination of initial starting impedance from the locked rotor test	121
A43.	Suddenly applied excitation test with armature winding open-circuited	121
A44.	Determination of τ'_{do} from the suddenly applied excitation test with armature winding open-circuited	123
A45.	Suddenly applied excitation test with armature winding short-circuited	123
A46.	Determination of τ'_d from suddenly applied excitation test with armature winding short-circuited	123
A47.	Voltage recovery test	123
A48.	Determination of quantities from the voltage recovery test	125
A49.	Field extinguishing test with armature winding open-circuited	125
A50.	Determination of quantities from the field extinguishing test with armature winding open-circuited	125
A51.	Field extinguishing test with armature winding short-circuited	129
A52.	Determination of quantities from the field extinguishing test with armature winding short-circuited	129
A53.	Asynchronous operation on-load test	129
A54.	Determination of frequency response characteristics and quantities from the asynchronous operation on-load test	131
A55.	Asynchronous operation during the low-voltage test	133
A56.	Determination of the frequency response characteristics and quantities from the asynchronous low-voltage operation test	133
A57.	Applied variable frequency voltage test at standstill	135
A58.	Determination of the frequency response characteristics and quantities from the applied variable frequency voltage test at standstill	135
A59.	D.C. decay in the armature winding at standstill test	139
A60.	Determination of frequency response characteristics and quantities from the d.c. decay test	141
A61.	Suddenly applied d.c. at standstill test	147
A62.	Determination of frequency response characteristics from the suddenly applied d.c. at standstill test	151
A63.	Determination of quantities by calculation using known test quantities	153
TABLE IA		155
REFERENCE LIST		161
FIGURES A1 TO A23		164

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES

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

PRÉAMBULE

- 1) Les décisions ou accords officiels de la CEI en ce qui concerne les questions techniques, préparés par des Comités d'Etudes où sont représentés tous les Comités nationaux s'intéressant à ces questions, expriment dans la plus grande mesure possible un accord international sur les sujets examinés.
- 2) Ces décisions constituent des recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux.
- 3) Dans le but d'encourager l'unification internationale, la CEI exprime le vœu que tous les Comités nationaux adoptent dans leurs règles nationales le texte de la recommandation de la CEI, dans la mesure où les conditions nationales le permettent. Toute divergence entre la recommandation de la CEI et la règle nationale correspondante doit, dans la mesure du possible, être indiquée en termes clairs dans cette dernière.

PRÉFACE

La présente norme a été établie par le Sous-Comité 2G: Méthodes et procédures d'essai, du Comité d'Etudes n° 2 de la CEI: Machines tournantes.

Cette deuxième édition remplace la première édition de la Publication 34-4 (1967) de la CEI — comprenant la Modification n°1 (1973) — et la première édition de la Publication 34-4A (1972) de la CEI, premier complément.

En outre, cette nouvelle édition comporte des modifications rédactionnelles.

La présente norme constitue la quatrième partie d'une série de publications traitant de machines électriques tournantes, dont les autres parties sont:

- Première partie: Caractéristiques assignées et caractéristiques de fonctionnement, parue comme Publication 34-1 (1983) de la CEI.
- Deuxième partie: Méthodes pour la détermination des pertes et du rendement des machines électriques tournantes à partir d'essais (à l'exclusion des machines pour véhicules de traction), parue comme Publication 34-2 (1972) de la CEI.
- Troisième partie: Valeurs nominales et caractéristiques des turbo-machines triphasées à 50 Hz, parue comme Publication 34-3 (1968) de la CEI.
- Cinquième partie: Classification des degrés de protection par les enveloppes des machines tournantes, parue comme Publication 34-5 (1981) de la CEI.
- Sixième partie: Modes de refroidissement des machines tournantes, parue comme Publication 34-6 (1969) de la CEI.
- Septième partie: Symboles pour les formes de construction et les dispositions de montage des machines électriques tournantes, parue comme Publication 34-7 (1972) de la CEI.
- Huitième partie: Marques d'extrémités et sens de rotation des machines tournantes, parue comme Publication 34-8 (1972) de la CEI.
- Neuvième partie: Limites du bruit, parue comme Publication 34-9 (1972) de la CEI.
- Dixième partie: Conventions relatives à la description des machines synchrones, parue comme Publication 34-10 (1975) de la CEI.
- Onzième partie: Protection thermique incorporée, Chapitre I: Règles concernant la protection des machines électriques tournantes, parue comme Publication 34-11 (1978) de la CEI.
- Douzième partie: Caractéristiques de démarrage de moteurs triphasés à induction à cage à une seule vitesse pour des tensions d'alimentation inférieures ou égales à 660 V, parue comme Publication 34-12 (1980) de la CEI.
- Treizième partie: Spécification pour les moteurs auxiliaires pour laminoirs, parue comme Publication 34-13 (1980) de la CEI.
- Quatorzième partie: Vibrations mécaniques de certaines machines de hauteur d'axe supérieure ou égale à 56 mm — Mesurage, évaluation et limites de l'intensité vibratoire, parue comme Publication 34-14 (1982) de la CEI.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

ROTATING ELECTRICAL MACHINES

Part 4: Methods for determining synchronous machine quantities from tests

FOREWORD

- 1) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, prepared by Technical Committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.
- 2) They have the form of recommendations for international use and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 3) In order to promote international unification, the IEC expresses the wish that all National Committees should adopt the text of the IEC recommendation for their national rules in so far as national conditions will permit. Any divergence between the IEC recommendation and the corresponding national rules should, as far as possible, be clearly indicated in the latter.

PREFACE

This standard has been prepared by Sub-Committee 2G: Test Methods and Procedures, of IEC Technical Committee No. 2: Rotating Machinery.

This second edition replaces the first edition of IEC Publication 34-4 (1967) — incorporating Amendment No. 1 (1973) — and the first edition of IEC Publication 34-4A (1972), first supplement.

In addition, this new edition includes some editorial changes.

This standard forms Part 4 of a series of publications dealing with rotating electrical machinery, the other parts being:

- Part 1: Rating and Performance, issued as IEC Publication 34-1 (1983).
- Part 2: Methods for Determining Losses and Efficiency of Rotating Electrical Machinery from Tests (excluding Machines for Traction Vehicles), issued as IEC Publication 34-2 (1972).
- Part 3: Ratings and Characteristics of Three-phase, 50 Hz Turbine-type Machines, issued as IEC Publication 34-3 (1968).
- Part 5: Classification of Degrees of Protection provided by Enclosures for Rotating Machines, issued as IEC Publication 34-5 (1981).
- Part 6: Methods of Cooling Rotating Machinery, issued as IEC Publication 34-6 (1969).
- Part 7: Symbols for Types of Construction and Mounting Arrangements of Rotating Electrical Machinery, issued as IEC Publication 34-7 (1972).
- Part 8: Terminal Markings and Direction of Rotation of Rotating Machines, issued as IEC Publication 34-8 (1972).
- Part 9: Noise Limits, issued as IEC Publication 34-9 (1972).
- Part 10: Conventions for Description of Synchronous Machines, issued as IEC Publication 34-10 (1975).
- Part 11: Built-in Thermal Protection, Chapter 1: Rules for Protection of Rotating Electrical Machines, issued as IEC Publication 34-11 (1978).
- Part 12: Starting Performance of Single-speed Three-phase Cage Induction Motors for Voltages up to and Including 660 V, issued as IEC Publication 34-12 (1980).
- Part 13: Specification for Mill Auxiliary Motors, issued as IEC Publication 34-13 (1980).
- Part 14: Mechanical Vibration of Certain Machines with Shaft Heights 56 mm and Higher — Measurement, Evaluation and Limits of the Vibration Severity, issued as IEC Publication 34-14 (1982).

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

Règle des Six Mois	Rapport de vote
2G(BC)4 2G(BC)8 2G(BC)18	2G(BC)6 2G(BC)12 2G(BC)19

Pour de plus amples renseignements, consulter les rapports de vote correspondants mentionnés dans le tableau ci-dessus.

La publication suivante de la CEI est citée dans la présente norme:

Publication n° 51 (—): Appareils mesureurs électriques indicateurs analogiques à action directe et leurs accessoires.

Withdrawn

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

Six Months' Rule	Report on Voting
2G(CO)4 2G(CO)8 2G(CO)18	2G(CO)6 2G(CO)12 2G(CO)19

Further information can be found in the Reports on Voting indicated in the table above.

The following IEC publication is quoted in this standard:

Publication No. 51 (—): Direct Acting Indicating Analogue Electrical Measuring Instruments and their Accessories.

Withdrawn

MACHINES ÉLECTRIQUES TOURNANTES

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

La présente norme est applicable aux machines synchrones triphasées de puissance assignée égale à 1 kVA et au-dessus et dont la fréquence assignée 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 cette norme 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 cette norme qu'elle puisse être interprétée 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 assignée.

- 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, sauf indication contraire, appartenir à une classe de précision de 1,0 au plus (Publication 51 de la CEI: Appareils mesureurs électriques indicateurs analogiques à action directe 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 assignée 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).

ROTATING ELECTRICAL MACHINES

Part 4: Methods for determining synchronous machine quantities from tests

SECTION ONE — SCOPE AND OBJECT

1. Scope

This standard applies to three-phase synchronous machines of 1 kVA rating and larger with rated frequency of not more than 400 Hz and not less than 15 Hz.

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 this standard is to establish methods for determining characteristic quantities of three-phase synchronous machines from tests.

It is not intended that this standard 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: Direct Acting Indicating Analogue 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).

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

- 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 a fonctionné à vide avec son refroidissement normal ou a 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 à la présente norme correspond à un enroulement équivalent couplé en étoile.

- 3.4 Toutes les grandeurs et caractéristiques doivent être données en valeurs «réduites», en considérant les valeurs assignées 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:

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

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 assignée sur la caractéristique à vide qui doit être pris comme valeur de base du courant d'excitation.

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

Sauf indication contraire, le système mentionné ci-dessus a été adopté dans la présente norme. Les lettres minuscules désignent les grandeurs exprimées en valeur réduite et les majuscules désignent les grandeurs physiques.

- 3.5 Dans les formules données dans cette norme pour la détermination des réactances des machines synchrones, la résistance directe de l'induit est, sauf indication contraire, considérée comme étant négligeable.

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

- 3.6 Les définitions de la plupart des grandeurs et de leurs méthodes expérimentales de détermination, telles qu'elles figurent dans cette norme, 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 en tenant compte seulement d'une manière approximative.

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 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 ensure low starting temperature, and the temperatures should be carefully monitored or pre-determined so that the test may be discontinued before the temperature becomes excessive.

- 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 this standard 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:

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

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 this standard. Small letters designate the quantities in per unit values, and capital letters designate them in physical quantities.

- 3.5 In the formulae given in this standard 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 this standard, correspond to the widely accepted two-axis theory of synchronous machines with approximate representation of all circuits additional to the field winding, and stationary circuits relative to it, by two equivalent circuits, one along the direct axis and the other along the quadrature axis, neglecting armature resistance or taking it into consideration only approximately.

Il résulte de cette représentation approximative d'une machine que dans la présente norme les grandeurs suivantes interviennent pour l'étude des phénomènes transitoires: trois réactances (synchrone, transitoire et subtransitoire) et deux constantes de temps (transitoire et subtransitoire), 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 cette norme, sauf indication contraire, il convient d'entendre par «valeur saturée» d'une réactance ou d'une résistance sa valeur pour la tension assignée (induit) et par «valeur non saturée» sa valeur pour le courant assigné (induit), exception faite de la réactance synchrone qui n'est pas définie en régime saturé.

La valeur d'une telle grandeur à la tension assignée (induit) correspond à l'état magnétique de la machine au moment du court-circuit brusque de l'enroulement d'induit à partir des conditions de fonctionnement à vide sous tension assignée et à vitesse assignée.

La valeur d'une telle grandeur du courant assigné (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 assigné.

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 assignée.

- 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 assignée de l'induit à vide au courant d'excitation pour le courant assigné d'induit en court-circuit triphasé permanent, la machine tournant à sa vitesse assignée.

- 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 assignée.

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

These time constants are based on the assumption of an exponential decrease of the particular components of quantities involved (currents, voltages, etc.). If the plot of the measured component under consideration does not decrease as a pure exponential, as in the case, for example, of a solid rotor machine, the time constant should normally be interpreted as the time required for the component to decrease to $1/e \approx 0.368$ of its initial value. Exponential decay curves corresponding to these time constants 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 this standard, unless otherwise stated, the “saturated value” of reactances and resistances will be taken as the rated (armature) voltage value of the quantity, and their “unsaturated value” will be taken as the rated (armature) current value, except synchronous 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 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 assignée 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 indiquée dans 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 d'induit 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 assignée.

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'_{do} (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:

- a) application de tension dans les deux positions de l'axe polaire (voir article 44 et paragraphe 45.1);
- b) 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 assignée par la valeur de ce courant, la machine tournant à sa vitesse assignée.

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 norme, 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 assignée, par la valeur de ce courant, la machine tournant à sa vitesse assignée.

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:

- a) court-circuit permanent entre deux phases (voir articles 48 et 49 et paragraphe 49.1);
- b) essai de rotation inverse (voir articles 50 et 51);
- c) 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 indiquée 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 assignée, par cette composante du courant, la machine tournant à sa vitesse assignée.

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 assignée, par la valeur de ce courant, la machine tournant à sa vitesse assignée.

13.1 La réactance et la résistance homopolaires sont déterminées au moyen des essais suivants:

- a) application d'une tension monophasée aux trois phases connectées en série (en triangle ouvert) ou en parallèle (voir articles 52 et 53);
- b) court-circuit permanent entre deux conducteurs de phase et le point neutre (voir articles 54 et 55 et paragraphe 55.1).

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 a 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-sequence 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) line-to-line and to neutral sustained short-circuit (see Clauses 54 and 55 and Sub-clause 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 conformément aux 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 1Ω .

16. Résistance directe de l'enroulement d'induit R_l

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 assignée.

16.1 La résistance directe de l'enroulement d'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 assignée.

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 dans 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 assignée.

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);

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 $1\ \Omega$.

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 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) décroissance du courant d'excitation avec l'enroulement d'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 d'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 assignée.

- 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 aperiodique, 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 assignée.

- 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 aperiodiques des courants dans les phases de l'enroulement d'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 assignée sous l'action d'un couple d'accélération constant et égal au quotient de la puissance active assignée par la vitesse angulaire assignée.

Notes 1. — Pour les compensateurs synchrones, la puissance active assignée est remplacée par la puissance apparente assignée.

- 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 assignées de la machine synchrone de base.

22. Energie cinétique réduite H

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

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

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 group of machines and the stored energy constant are determined by the following methods:

- a) suspended rotor oscillation (see Clauses 62 and 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 apparente de la machine en essai.

23. Courant d'excitation assigné I_{fn}

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

23.1 Le courant d'excitation assigné est déterminé au moyen des méthodes suivantes:

- a) mesure directe au cours d'un fonctionnement au régime assigné;
- 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 assignée de tension ΔU_n

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

La variation assignée 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 assigné (voir article 23 et paragraphe 23.1) déterminés par des essais.

SECTION QUATRE — DESCRIPTION DES ESSAIS ET DÉTERMINATION DES GRANDEURS DES MACHINES À 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.

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 assignée de la machine essayée, et être poursuivi jusqu'à 0,2 fois cette tension assignée, 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

- 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 MACHINES 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.

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 quantities mentioned above, it is necessary to

courant dans l'induit. A chaque échelon de tension, plusieurs lectures doivent être faites afin de déterminer la valeur minimale 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 assignée par seconde.

Si la machine essayée à un taux de décélération supérieur à 0,02 fois la vitesse assignée par seconde, son excitation doit être fournie par une source séparée, de manière à maintenir une excitation stable pendant l'essai. Avant de séparer la machine du réseau, celle-ci est excitée à la tension la plus élevée jugée nécessaire, c'est-à-dire celle qui correspond à l'excitation de pleine charge, et au minimum à 1,3 fois sa tension assignée. 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) assignée — 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 32).

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

26. Essai en court-circuit triphasé permanent

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 d'induit assigné. La vitesse de rotation (ou la fréquence) peut différer de sa valeur assignée mais ne doit pas être inférieure à 0,2 fois la valeur assignée.

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

- 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

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 33).

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 second. If the machine under test has a rate of deceleration above 0.04 rated speed per second, excitation from a separate source is required in order to have more stable excitation during the test.

- 26.1 The three-phase sustained short-circuit characteristic, the relationship between the armature short-circuited winding current and the excitation current, is drawn from the data of the three-phase sustained short-circuit test.

27. Determination of quantities from the no-load saturation and sustained three-phase short-circuit characteristics

Direct-axis synchronous reactance (see Clause 4 and Sub-clause 4.1) is determined from the no-load saturation and three-phase sustained short-circuit characteristics as a quotient of the

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):

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

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

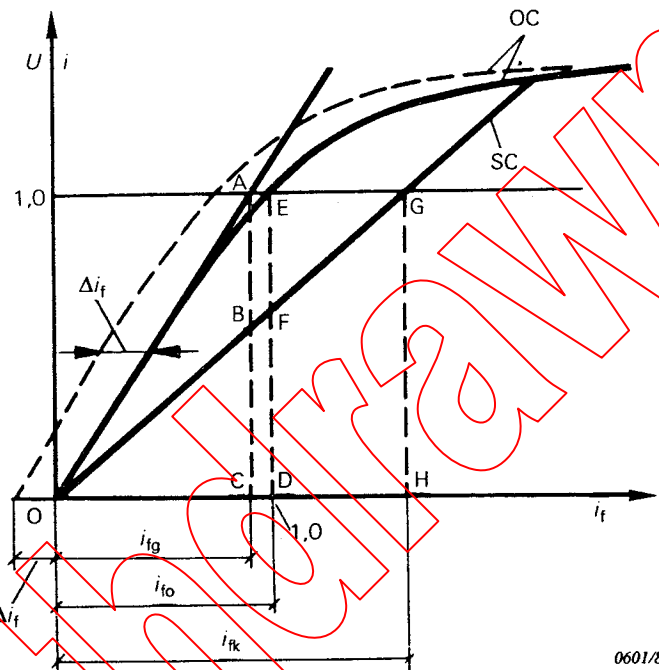


FIGURE 1

- 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 assignée sur la caractéristique de saturation à vide par le courant d'excitation qui correspond au courant assigné sur la caractéristique en court-circuit (figure 1):

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

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 moins de $\pm 0,15$ des valeurs respectives assignées, à un facteur de puissance nul en fonctionnement surexcité.

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

FIGURE 1

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

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. Détermination du courant d'excitation correspondant à la tension assignée et au courant d'induit assigné à facteur de puissance nul (surexcitation)

Si, au cours de l'essai à facteur de puissance nul, la tension diffère de sa valeur assignée de moins de $\pm 0,15$ (valeur réduite), le courant d'excitation correspondant à la tension assignée et au courant assigné 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 mesurées au cours de l'essai à facteur de puissance nul (point C, figure 2).

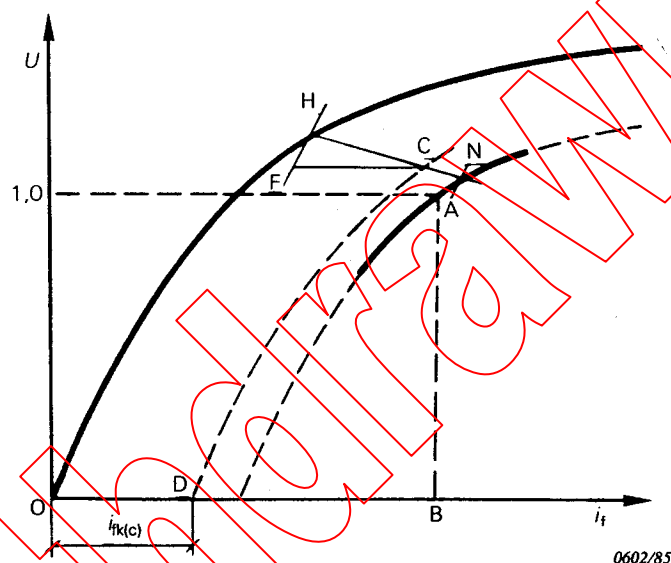


FIGURE 2

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:

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

où i est 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 assignée représente le courant d'excitation qui correspond à la tension assignée et au courant d'induit assigné pour un facteur de puissance nul (surexcitation).

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).

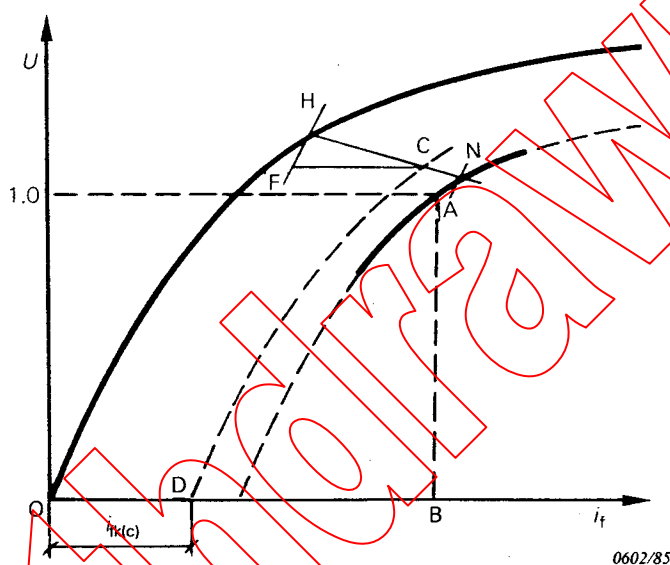


FIGURE 2

Vector OD equal to the excitation current, corresponding to the armature current i on the three-phase short-circuit curve, is laid off along the abscissa axis. From the point C, a length CF equal to OD is laid off towards the no-load saturation characteristic and parallel to the abscissa axis. A line FH is then drawn parallel to the extended straight line portion of the no-load saturation characteristic intersecting the latter at H. Line HC is extended to a point N such that:

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

where i is the current corresponding to point C.

The no-load saturation curve is then transferred to the right and downwards parallel to itself and by a distance HN.

Point A is found on this curve which corresponds to the rated voltage. The abscissa of this point (OB) represents the excitation current corresponding to the rated voltage and armature current at zero power-factor (overexcitation).

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 assignée et au courant d'induit assigné à facteur de puissance nul (surexcitation)

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

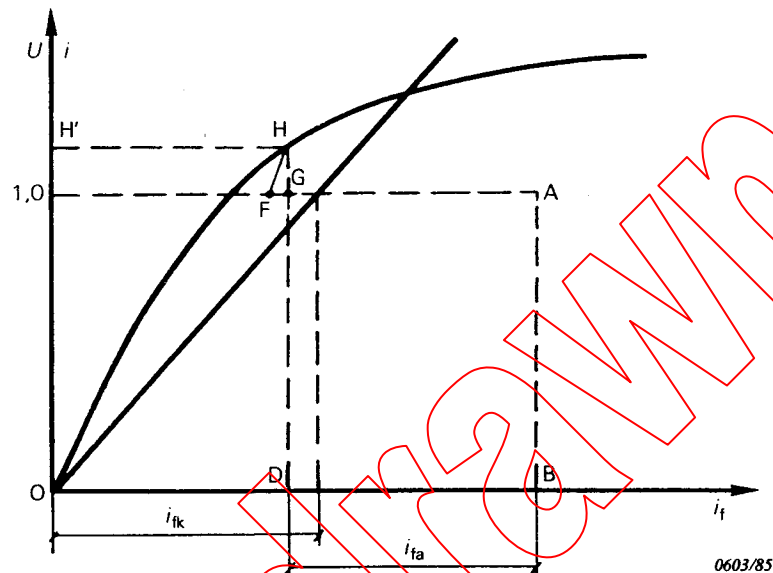


FIGURE 3

A gauche du point A et parallèlement à l'axe des abscisses, on porte une longueur AF égale au courant d'excitation (i_{fk}) qui correspond au courant d'induit assigné 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 assigné. En valeur réduite, $x_p = HG$.

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

Pour déterminer le courant d'excitation assigné (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 permanent (voir paragraphe 26.1) et de la réactance de Potier x_p (voir articles 14 et 30).

Le vecteur du courant d'induit assigné (i_n) de la machine essayée est porté le long de l'axe des abscisses. Le vecteur de la tension assignée (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 assignée (figure 4, page 38).

Le vecteur de la chute de tension ($i_n x_p$) dans la réactance de Potier pour le courant d'induit assigné 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 d'induit est généralement négligée. 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 d'induit (voir article 16) à partir de l'extrémité du vecteur de la tension et parallèlement au vecteur du courant.

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)**

The Potier reactance (Clause 14) is determined graphically. The no-load and three-phase sustained short-circuit characteristics are plotted on a diagram (Figure 3) as well as a point the ordinate of which is the rated voltage and the abscissa—the excitation current, measured at rated armature current and zero power-factor at overexcitation (point A).

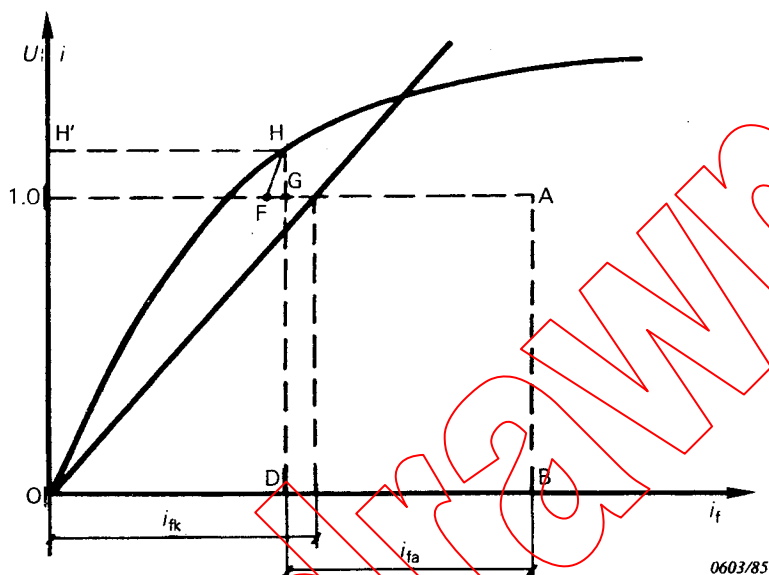


FIGURE 3

To the left from the point A, parallel to the abscissa, a length AF equal to the excitation current (i_{fk}) for the rated armature sustained short-circuit current is laid off. A line parallel to the initial lower portion of the no-load characteristic is drawn through the point F up to the intersection with the upper part of the no-load characteristic (point H). The length of perpendicular from point H to point G (intersection with AF line) represents the voltage drop on reactance x_p at the rated armature current. In per unit values $x_p = HG$.

31. **Determination of the rated excitation current by the 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. 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). (Figure 4, page 39).

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

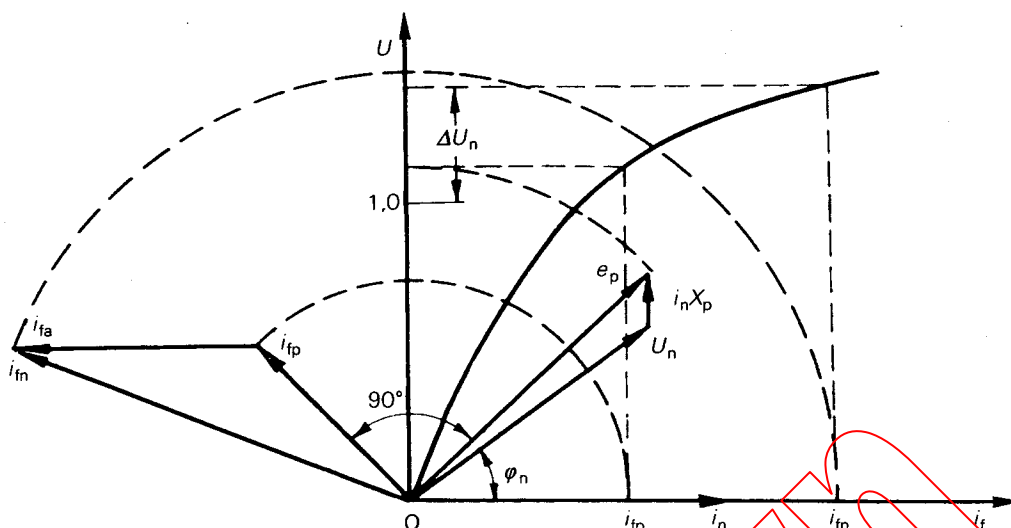


FIGURE 4

Ce vecteur doit être 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 assignée 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_p 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 assigné (i_{fa}) est déterminée en faisant la différence entre le courant d'excitation qui correspond au courant d'induit assigné 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 d'induit assigné sur la caractéristique de saturation à vide (figure 3, page 36). 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 assigné i_m 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 paragraphe 31.2) et où l'on admet que le facteur a est égal à 1,0 pour les machines à pôles saillants et à 0,6 (0,65) pour les machines à pôles lisses, à moins que l'on puisse fournir des valeurs plus précises résultant d'expériences antérieures sur des machines de construction similaire.

- 31.1 L'essai à rotor sorti est effectué en appliquant une tension triphasée de fréquence assignée aux bornes de l'enroulement d'induit. La tension appliquée doit être choisie de manière que le courant dans l'induit soit voisin de la valeur assignée. Au cours de l'essai, on mesure la tension aux bornes (U), le courant en ligne (I) et la puissance active fournie (P).
- 31.2 La réactance de l'induit avec le rotor sorti (X_a) est calculée à l'aide de la relation suivante:

$$X_2 = \sqrt{Z^2 - R^2} \Omega$$

où:

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

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



0604/85

If the Potier reactance x_p is unknown, it may be replaced in the construction of Figure 4 by (ax_a) , where x_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).

- $$X_2 = \sqrt{Z^2 - R^2} \Omega$$

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

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

32. Détermination du courant d'excitation assigné au moyen du diagramme de l'ASA

Pour déterminer le courant d'excitation assigné de la machine (voir article 23) au moyen du diagramme vectoriel de l'ASA (figure 5), on utilise la caractéristique de saturation à vide (voir paragraphe 25.1), la caractéristique en court-circuit triphasé permanent (voir paragraphe 26.1) et la réactance de Potier (voir article 14).

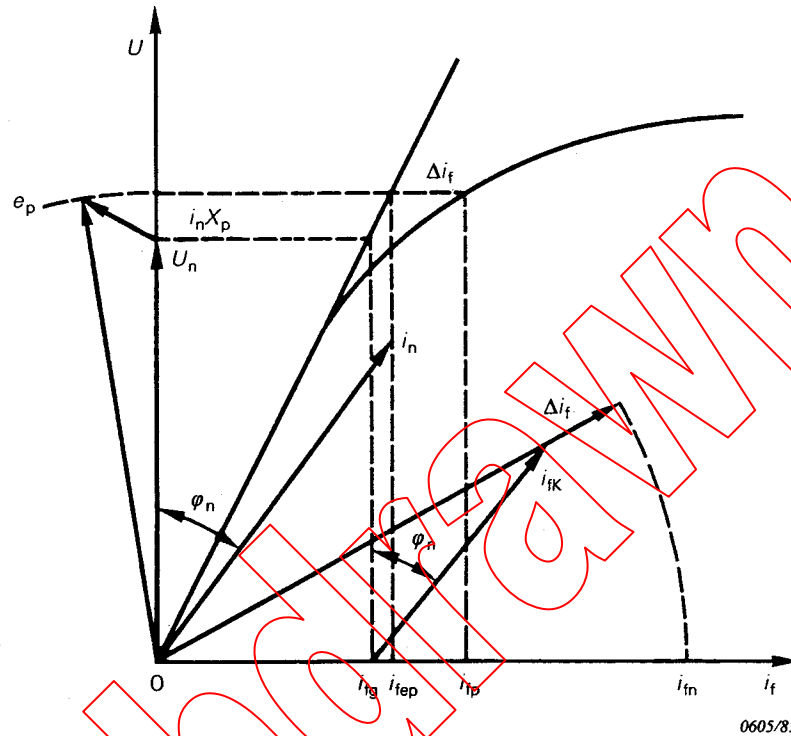


FIGURE 5

La détermination de la f.é.m. e_p s'effectue conformément à l'article 31. Le courant d'excitation correspondant à la partie rectiligne de la caractéristique pour la tension d'induit assignée (i_{fg}) est déterminé d'après la caractéristique de saturation à vide. Le vecteur du courant i_{fg} est porté à partir de l'origine le long de l'axe des abscisses. En partant de son extrémité, on porte, à droite de la verticale et suivant un angle φ_n (considéré comme positif dans le cas d'une génératrice surexcitée) correspondant au facteur de puissance assigné, le vecteur du courant d'excitation i_{fk} correspondant au courant d'induit assigné sur la caractéristique en court-circuit triphasé permanent (voir article 30).

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 assigné.

Le courant d'excitation assigné 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).

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).

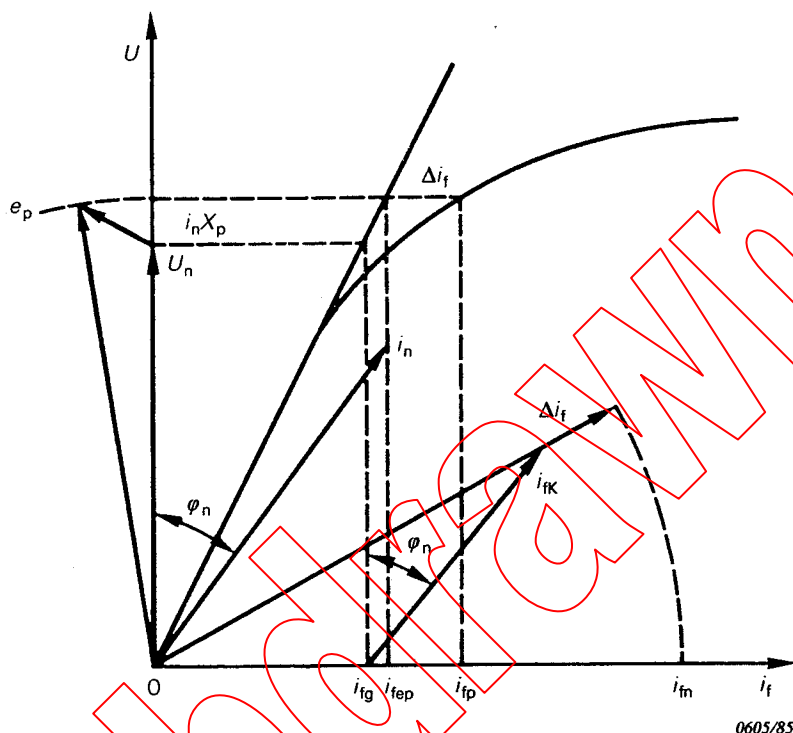


FIGURE 5

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_{fk} corresponding to rated armature current on the sustained three-phase short-circuit characteristic (see Clause 30) is laid off.

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

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

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

33. Détermination du courant d'excitation assigné au moyen du diagramme suédois

Pour déterminer le courant d'excitation assigné 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 assignée et au courant d'induit assigné 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 assignée sur la caractéristique à vide,

OB correspondant à la tension assignée et au courant d'induit assigné pour un facteur de puissance nul,

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

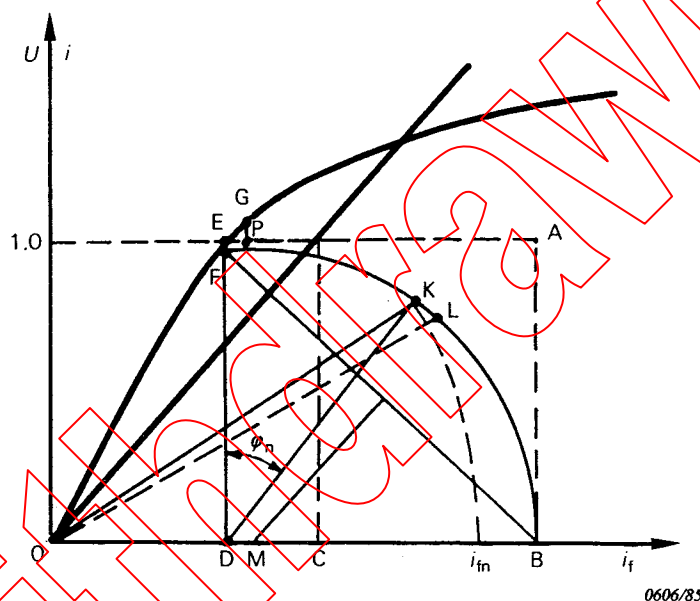


FIGURE 6

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.

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 assigné et qui rencontre l'arc FB au point K. La longueur OK correspond au courant d'excitation assigné 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 d'induit pour le courant assigné (voir article 16 et paragraphe 72.2). La longueur OL représente le courant d'excitation cherché.

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.

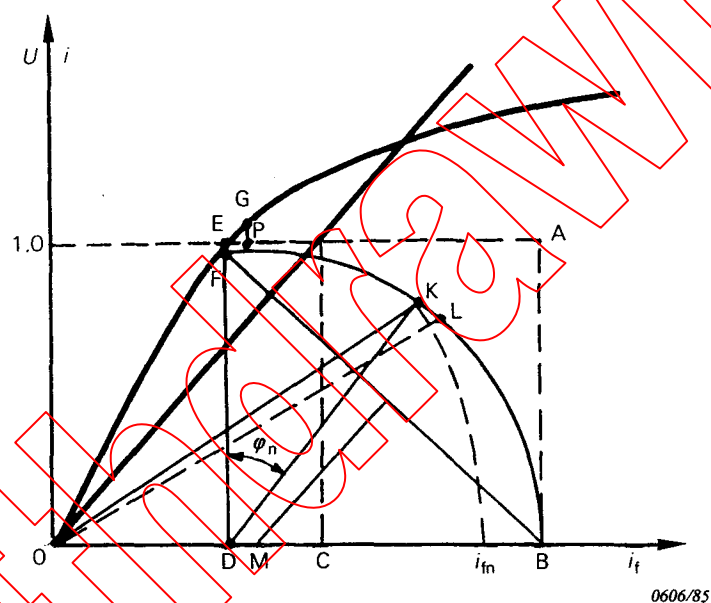


FIGURE 6

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 axis in point M. From point M, as a centre, a circular arc is drawn through points F and B.

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

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

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

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 assignée et au courant assigné 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 d'induit assignée la chute de tension produite dans ax_a (voir article 31) par le courant d'induit assigné (point H' — figure 3, page 36).

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). A droite du point D, on porte le long de l'axe des abscisses un vecteur DB égal à i_{fa} (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:

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

où:

(e) = f.é.m. à vide correspondant au courant d'excitation i_{fr} 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, page 46)

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

(x_d) = 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:

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

La valeur de x_q obtenue à partir de cet essai peut, selon la valeur de u_r , inclure l'effet de la saturation. Pour obtenir une valeur non saturée de x_q , la tension appliquée doit être habituellement inférieure ou égale à 0,6 fois la tension assignée.

36. Essai à faible glissement

Pendant l'essai à faible glissement, une tension triphasée symétrique inférieure à la normale (0,01 U_n à 0,2 U_n) est appliquée aux bornes de l'induit de la machine essayée. La tension doit être

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 37).

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). To the right of point D, vector i_{fa} (length DB) is added along the abscissa-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):

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

where:

(e) = no-load e.m.f. for the excitation current i_{fr} 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, page 47)

u_r = voltage at the moment of slipping the pole pitch

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

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

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

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

36. Low slip test

During the low slip test, subnormal symmetrical three-phase voltage ($0.01 U_n$ to $0.2 U_n$) is applied to the armature terminals of the machine under test. The voltage should be such that the machine

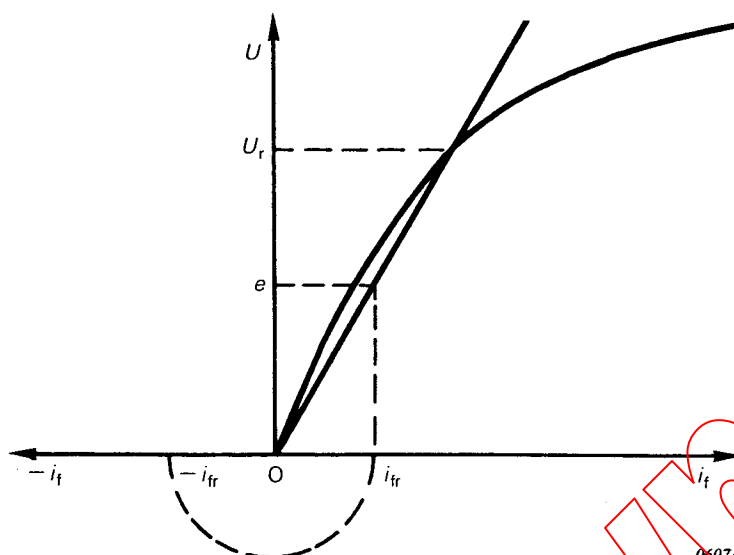


FIGURE 7

telle que la machine ne risque pas de s'accrocher. L'enroulement d'excitation doit être mis en circuit ouvert et le rotor est entraîné par un moteur de manière à tourner avec un glissement inférieur à 1%, et, dans le cas d'une machine à rotor massif, avec un glissement encore beaucoup plus faible, de telle sorte que les courants induits dans les circuits amortisseurs pendant la marche asynchrone aient une influence négligeable sur les mesures. L'enroulement d'excitation doit être mis en court-circuit directement ou sur une résistance de décharge pendant la mise en circuit et hors circuit de la source d'alimentation, de manière à éviter qu'il ne soit endommagé. Le courant et la tension de l'enroulement d'induit et la tension aux bagues collectrices ainsi que le glissement sont mesurés au moyen d'appareils indicateurs ou enregistrés à l'oscillographe. Si la tension rémanente mesurée avant l'essai est supérieure à 30% de la tension d'alimentation utilisée pour l'essai, le rotor doit être démagnétisé. Cette démagnétisation peut s'effectuer, par exemple, en alimentant l'enroulement inducteur par une source à très basse fréquence avec un courant d'environ la moitié du courant d'excitation correspondant à la tension assignée à vide, et en faisant décroître graduellement le courant et la fréquence (cette dernière si 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:

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

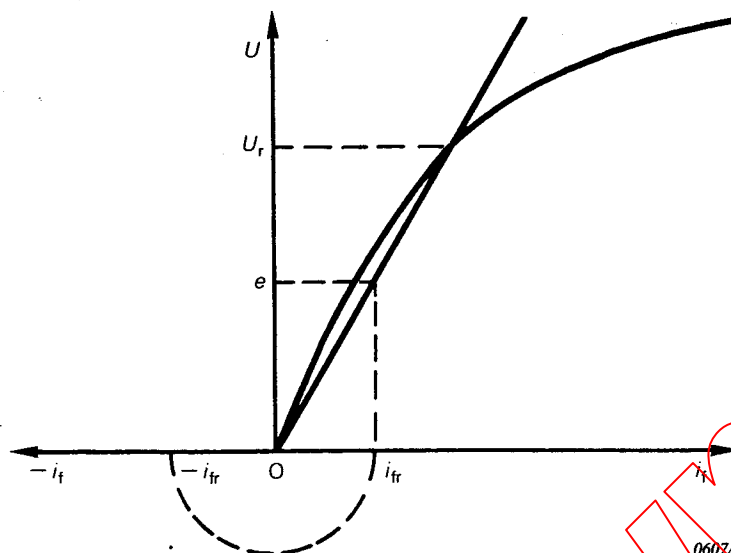


FIGURE 7

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. 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 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:

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

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

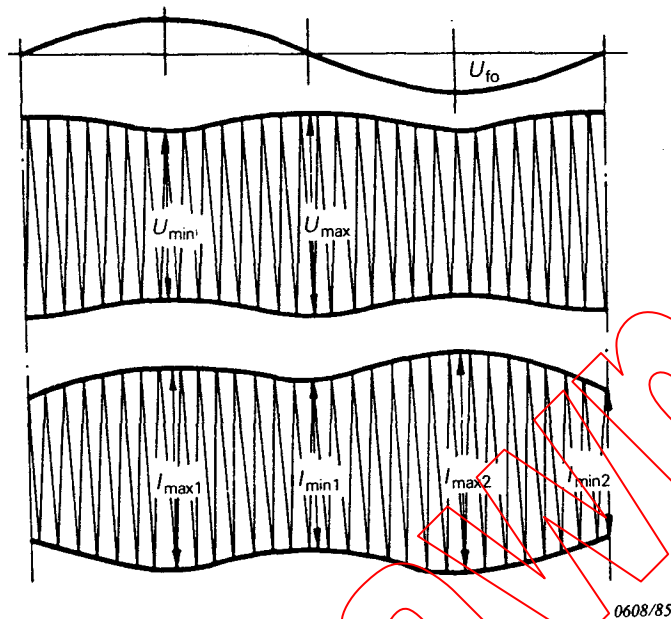


FIGURE 8

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,

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

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 assignée à facteur de puissance assigné.

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.