

**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 $\tau'_{do}$ . . . . .   | 24 |
| 18. Constante de temps transitoire longitudinale en court-circuit $\tau'_d$ . . . . .      | 24 |
| 19. Constante de temps subtransitoire longitudinale en court-circuit $\tau''_d$ . . . . .  | 26 |
| 20. Constante de temps en court-circuit de l'induit $\tau_a$ . . . . .                     | 26 |
| 21. Temps d'accélération $\tau_j$ . . . . .                                                | 26 |
| 22. Énergie cinétique réduite $H$ . . . . .                                                | 26 |
| 23. Courant d'excitation assigné $I_{fn}$ . . . . .                                        | 28 |
| 24. Variation assignée de tension $\Delta U_n$ . . . . .                                   | 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<br>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 $\tau'_{do}$ . . . . .             | 25 |
| 18. Direct-axis transient short-circuit time constant $\tau_d$ . . . . .                | 25 |
| 19. Direct-axis subtransient short-circuit time constant $\tau''_d$ . . . . .           | 27 |
| 20. Armature short-circuit time constant $\tau_a$ . . . . .                             | 27 |
| 21. Acceleration time $\tau_j$ . . . . .                                                | 27 |
| 22. Stored energy constant $H$ . . . . .                                                | 27 |
| 23. Rated excitation current $I_{fn}$ . . . . .                                         | 29 |
| 24. Rated voltage regulation $\Delta U_n$ . . . . .                                     | 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 $\delta$ . . . . .                                                                                                                                               | 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 $\tau_{do}$ 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 $\tau_d$ 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 $\tau_j$ 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 $\tau_j$ et de $H$ à partir de l'essai d'oscillation avec pendule auxiliaire . . . . .                                                                                                           | 78 |
| 66. Essai de ralentissement à vide . . . . .                                                                                                                                                                          | 78 |
| 67. Détermination de $\tau_j$ 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 $\delta$ . . . . .                                                                                                                   | 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 $\tau_{do}$ 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 $\tau'_d$ from the field current decay test with the armature winding short-circuited . . . . .                                                           | 77 |
| 62. Suspended rotor oscillation test . . . . .                                                                                                                                 | 77 |
| 63. Determination of $\tau_j$ and $H$ from suspended rotor oscillation test . . . . .                                                                                          | 77 |
| 64. Auxiliary pendulum swing test . . . . .                                                                                                                                    | 79 |
| 65. Determination of $\tau_j$ and $H$ from the auxiliary pendulum swing test . . . . .                                                                                         | 79 |
| 66. No-load retardation test . . . . .                                                                                                                                         | 79 |
| 67. Determination of $\tau_j$ 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 $\tau_j$ 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 $\tau_j$ 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 $X_\sigma$                                                          | 94  |
| A12. Impédance de démarrage initiale des moteurs synchrones $Z_{st}$                                  | 96  |
| A13. Constante de temps transitoire longitudinale à circuit ouvert $\tau'_{do}$                       | 96  |
| A14. Constante de temps transitoire longitudinale en court-circuit $\tau'_d$                          | 96  |
| A15. Constante de temps transitoire transversale à circuit ouvert $\tau'_{qo}$                        | 96  |
| A16. Constante de temps transitoire transversale en court-circuit $\tau'_q$                           | 96  |
| A17. Constante de temps subtransitoire longitudinale à circuit ouvert $\tau''_{do}$                   | 98  |
| A18. Constante de temps subtransitoire transversale à circuit ouvert $\tau''_{qo}$                    | 98  |
| A19. Constante de temps subtransitoire transversale en court-circuit $\tau''_q$                       | 98  |
| A20. Constante de temps longitudinale à circuit ouvert de l'enroulement d'excitation $\tau_{fdo}$     | 100 |
| A21. Constante de temps longitudinale à circuit ouvert du circuit amortisseur équivalent $\tau_{kdo}$ | 100 |
| A22. Constante de temps longitudinale en court-circuit de l'enroulement d'excitation $\tau_{fd}$      | 100 |
| A23. Constante de temps longitudinale en court-circuit du circuit amortisseur équivalent $\tau_{kd}$  | 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 $\tau_J$ 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 $\tau_J$ 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 $X_\sigma$ . . . . .                                                    | 95  |
| A12. Initial starting impedance of synchronous motors $Z_{st}$ . . . . .                                | 97  |
| A13. Direct-axis transient open-circuit time constant $\tau'_{do}$ . . . . .                            | 97  |
| A14. Direct-axis transient short-circuit time constant $\tau'_d$ . . . . .                              | 97  |
| A15. Quadrature-axis transient open-circuit time constant $\tau'_{qo}$ . . . . .                        | 97  |
| A16. Quadrature-axis transient short-circuit time constant $\tau'_q$ . . . . .                          | 97  |
| A17. Direct-axis subtransient open-circuit time constant $\tau''_{do}$ . . . . .                        | 99  |
| A18. Quadrature-axis subtransient open-circuit time constant $\tau''_{qo}$ . . . . .                    | 99  |
| A19. Quadrature-axis subtransient short-circuit time constant $\tau''_q$ . . . . .                      | 99  |
| A20. Direct-axis open-circuit excitation winding time constant $\tau_{fdo}$ . . . . .                   | 101 |
| A21. Direct-axis open-circuit equivalent damper circuit time constant $\tau_{kdo}$ . . . . .            | 101 |
| A22. Direct-axis short-circuit excitation winding time constant $\tau_{fd}$ . . . . .                   | 101 |
| A23. Direct-axis short-circuit equivalent damper winding time constant $\tau_{kd}$ . . . . .            | 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 $\tau'_{d0}$ 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 $\tau'_d$ 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 $\tau'_{do}$ 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 $\tau'_d$ 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 des 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<br>2G(BC)8<br>2G(BC)18 | 2G(BC)6<br>2G(BC)12<br>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.

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60034-4:1985

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

| Six Months' Rule               | Report on Voting                |
|--------------------------------|---------------------------------|
| 2G(CO)4<br>2G(CO)8<br>2G(CO)18 | 2G(CO)6<br>2G(CO)12<br>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.

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60034-4:1985

## 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  $\tau'_{do}$  (voir article 17) et de  $\tau'_d$  (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),  $\tau'_{do}$  (see Clause 17) and  $\tau'_d$  (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  $1 \Omega$ .

**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  $\tau'_{do}$**

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  $\tau'_d$  (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  $\tau'_d$**

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  $\tau'_{do}$**

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  $\tau'_d$  (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  $\tau'_d$**

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  $\tau'_{do}$  (voir article 17) au moyen de la formule indiquée à l'article 72.

Si un essai de court-circuit brusque est exécuté pour déterminer  $X'_d$ ,  $\tau'_d$  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 $\tau''_d$

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 $\tau_a$

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 $\tau_j$

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  $\tau'_{do}$  (see Clause 17) by the formula given in Clause 72.

If a sudden short-circuit test is performed for determining  $X'_d$ , then  $\tau'_d$  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 $\tau''_d$

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 $\tau_a$

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 $\tau_j$

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 $\Delta U_n$

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 $\Delta U_n$

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



no-load voltage taken from the air-gap line at some excitation and the sustained short-circuit current value taken from the short-circuit characteristic at the same excitation current (Figure 1):

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

The value of  $X_d$  determined in such a way corresponds to an unsaturated state of the machine.

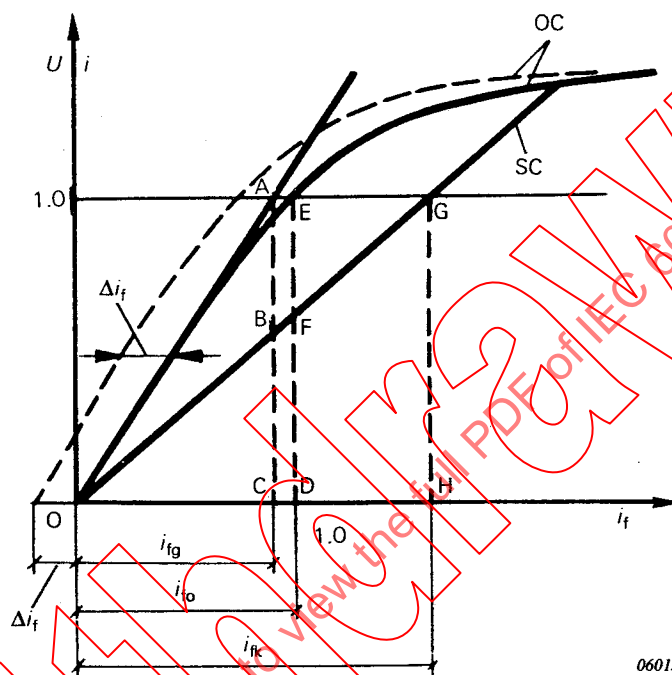


FIGURE 1

- 27.1 Short-circuit ratio (see Clause 5 and Sub-clause 5.1) is determined from the no-load saturation and three-phase sustained short-circuit characteristics as a quotient of the excitation current corresponding to the rated voltage on the no-load saturation curve and the excitation current corresponding to the rated current on the short-circuit curve (Figure 1):

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

## 28. Overexcitation test at zero power-factor

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

During the test, the excitation current is determined corresponding to values of voltage and armature current preferably differing by not more than  $\pm 0.15$  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).

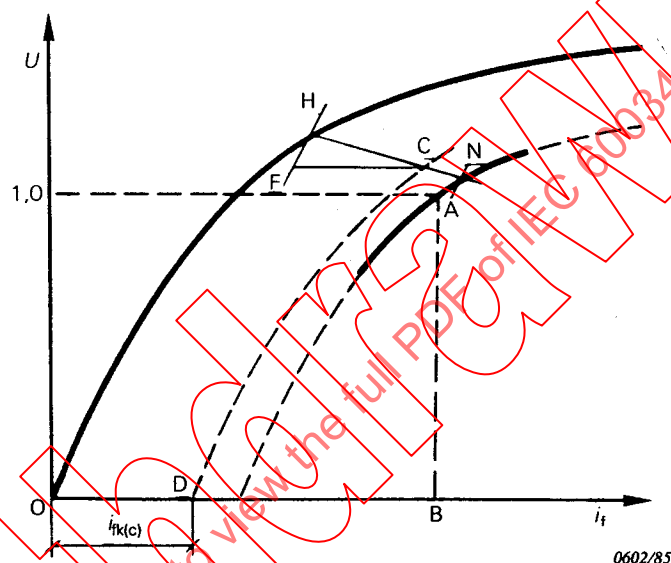


FIGURE 2

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  $\pm 0.15$  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).

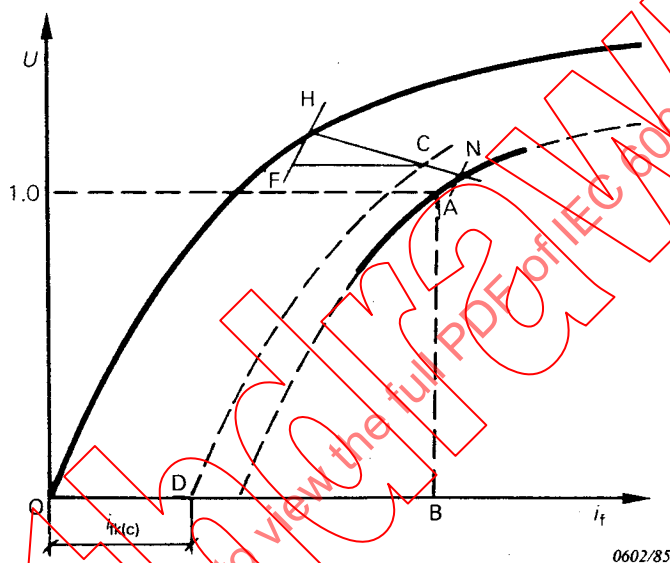


FIGURE 2

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.

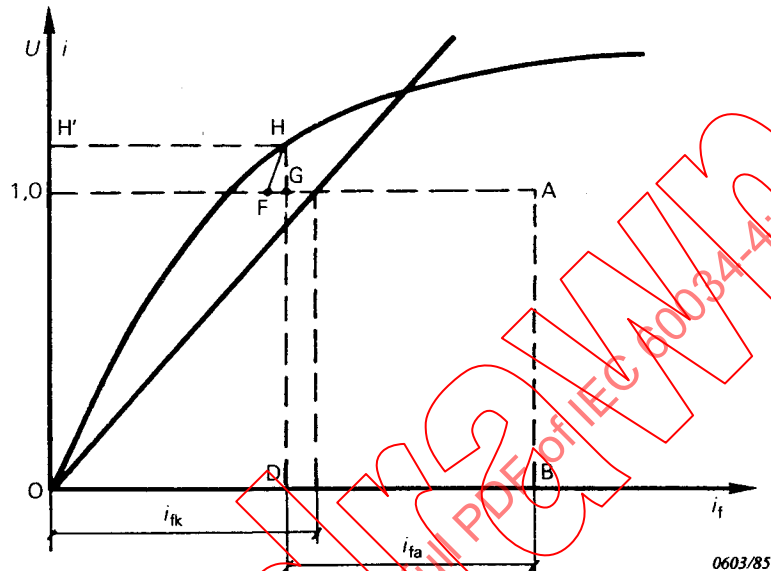


FIGURE 3

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  $\varphi_n$  (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).

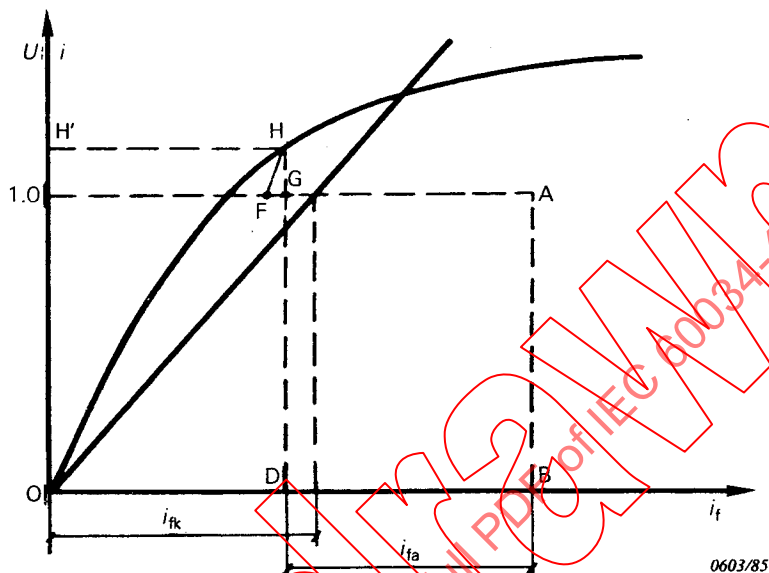


FIGURE 3

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  $\varphi_n$  (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.



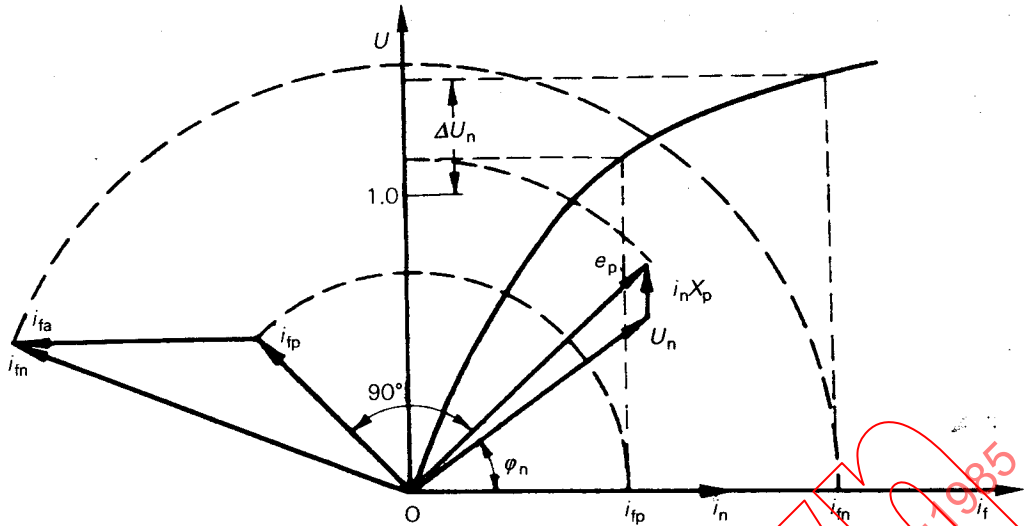


FIGURE 4

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

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

The excitation current component compensating armature reaction at rated armature current ( $i_{fa}$ ) is determined as the difference between the excitation current corresponding to the rated armature current on the sustained three-phase short-circuit characteristic, and the excitation current corresponding to the voltage drop in  $x_p$  due to armature rated current on the no-load saturation characteristic (Figure 3, page 37). Vector  $i_{fa}$  is laid off from the end of the vector  $i_{fp}$  parallel to the armature current vector. The rated excitation current  $i_{fn}$  is the vector sum of  $i_{fp}$  and  $i_{fa}$ .

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

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

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

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

where:

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

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

### 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).

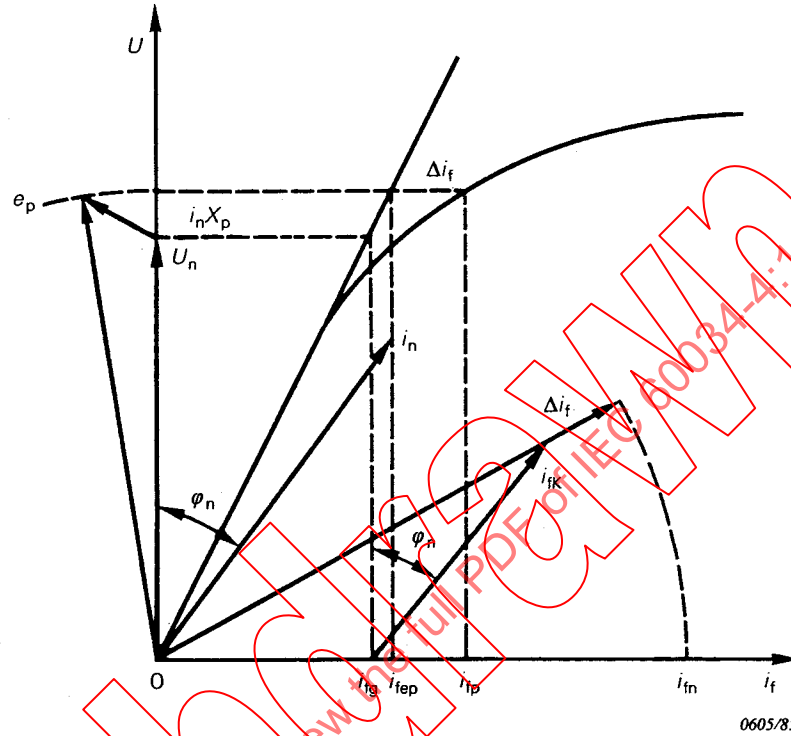


FIGURE 5

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  $\varphi_n$  (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 ( $\Delta i_f$ ) 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).

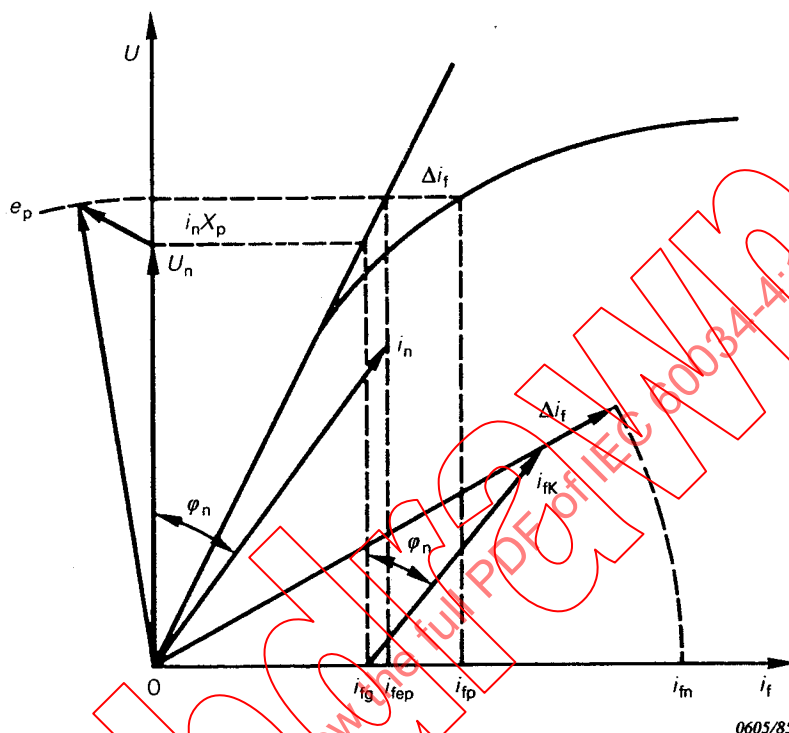


FIGURE 5

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

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

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

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.

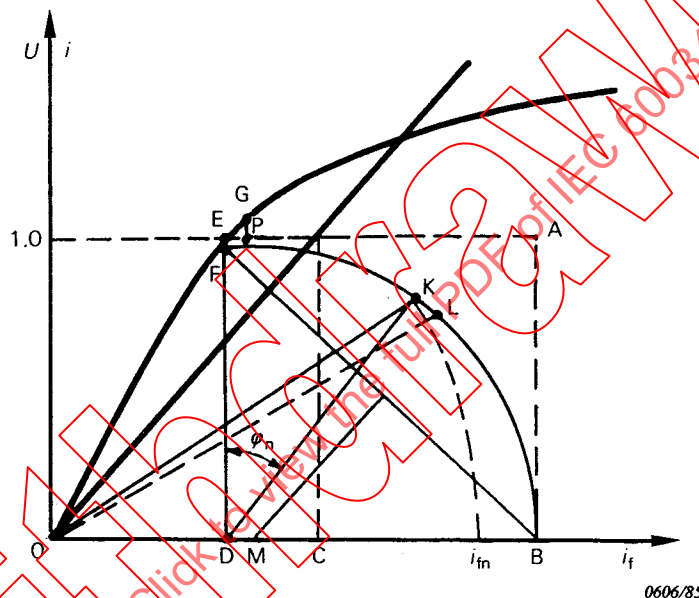


FIGURE 6

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  $\phi_n$  (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.

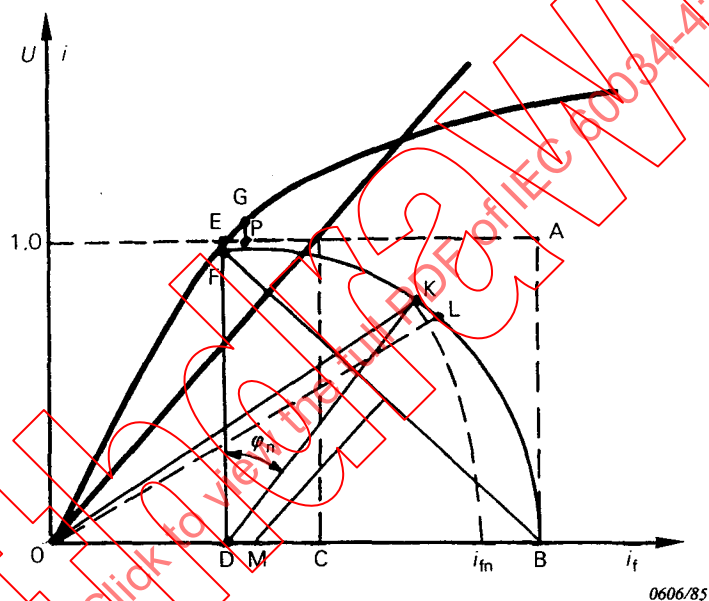


FIGURE 6

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  $\varphi_n$  (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

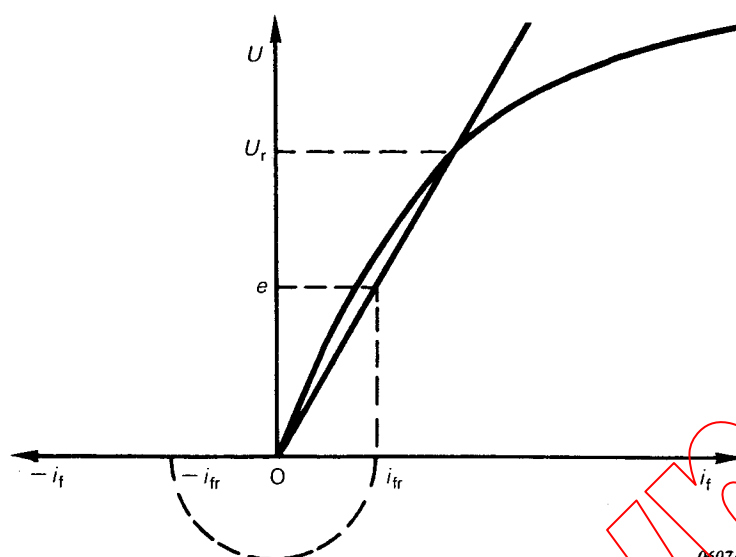


FIGURE 7

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:

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

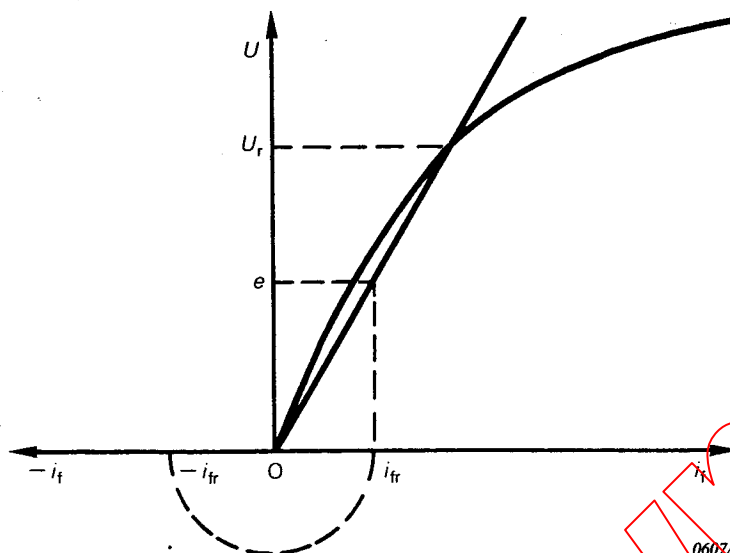


FIGURE 7

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).

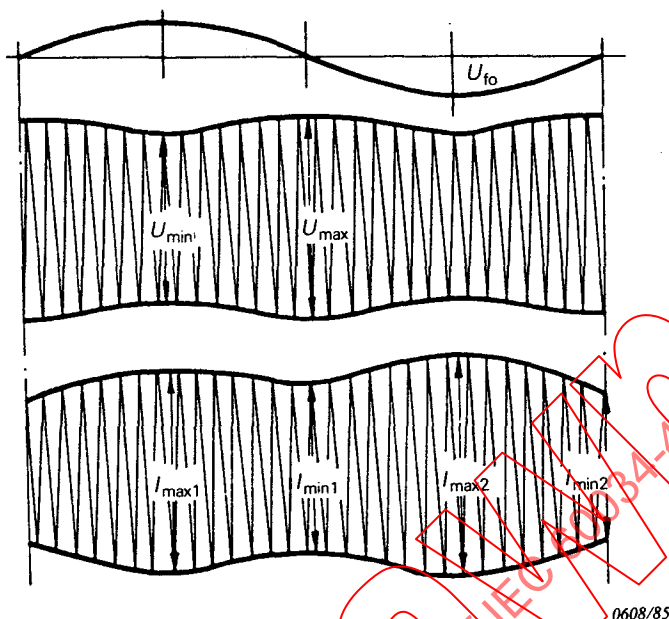


FIGURE 8

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 $\delta$

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  $\phi$  entre la tension et le courant (par la méthode des deux wattmètres) et l'angle  $\delta$  (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.

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

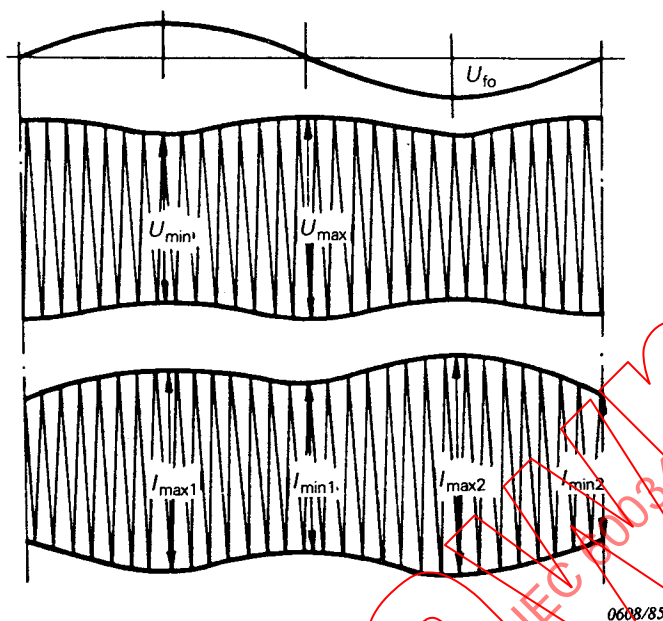


FIGURE 8

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

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

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

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

### 38. On-load test measuring the load angle $\delta$

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

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

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

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

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

### 40. Essai de court-circuit triphasé brusque

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### 40. Sudden three-phase short-circuit test

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

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

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

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

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

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

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

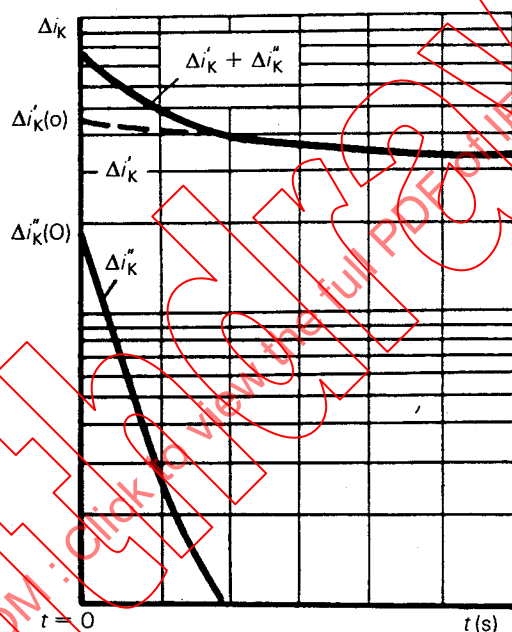
If the sudden short-circuit test cannot be performed at rated armature voltage, it is recommended that the tests should be conducted at several armature voltages (e.g. 0.3, 0.5 and 0.7 of rated armature voltage), and the quantities determined for each test. They are then plotted against open-circuit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

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

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

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

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



0609/85

FIGURE 9

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

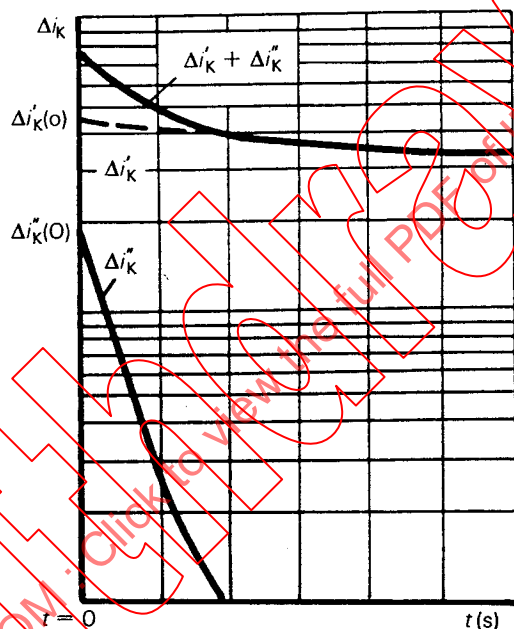
- Lorsque la deuxième partie de ce tracé est une droite (cas d'une exponentielle), le prolongement de celle-ci jusqu'à la droite  $t = 0$  donne la valeur initiale  $\Delta i'_k(0)$  de la composante transitoire du courant de court-circuit (figure 9).
- Lorsque la deuxième partie de ce tracé est incurvée, l'amplitude du courant  $i_A$  est mesurée (voir figure 10, page 54) au temps  $OA'$  pris égal à 0,2 s ou au temps à partir duquel les phénomènes subtransitoires deviennent négligeables. Le temps  $OB'$  correspond au temps pour lequel le courant est  $i_B = 1/e i_A$ . La constante de temps  $\tau'_d$  est prise égale à  $(OB' - OA')$  secondes. La

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

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

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

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



0609/85

FIGURE 9

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

- When the latter part of this plot is a straight line (corresponding to an exponential), then this line extrapolated to zero time gives the initial value  $\Delta i_k'(0)$  of the transient component of short-circuit current (Figure 9).
- When the latter part of this plot is a curve, the amplitude of the current  $i_A$  is measured (see Figure 10, page 55) at a time  $OA'$ , where  $OA'$  is taken as 0.2 s or the time at which subtransient effects become negligible. The time  $OB'$  is measured at the time at which the current is  $i_B = 1/e i_A$ . The time constant  $\tau_d'$  is taken as  $(OB' - OA')$  seconds. The straight line through the

droite joignant les points représentatifs des valeurs des courants  $i_B$  et  $i_A$  est considérée comme représentant la valeur équivalente de  $\Delta i'_k$  et son extrapolation jusqu'à la droite  $t = 0$  donne la valeur initiale  $\Delta i'_k(0)$  de la composante transitoire du courant de court-circuit.

La composante subtransitoire du courant de court-circuit est définie comme étant la différence entre la courbe  $\Delta i'_k + \Delta i''_k$  et la droite représentant la valeur de  $\Delta i'_k$ . La variation de la composante subtransitoire du courant en fonction du temps est reportée également en coordonnées semi-logarithmiques (figure 9, page 52).

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

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

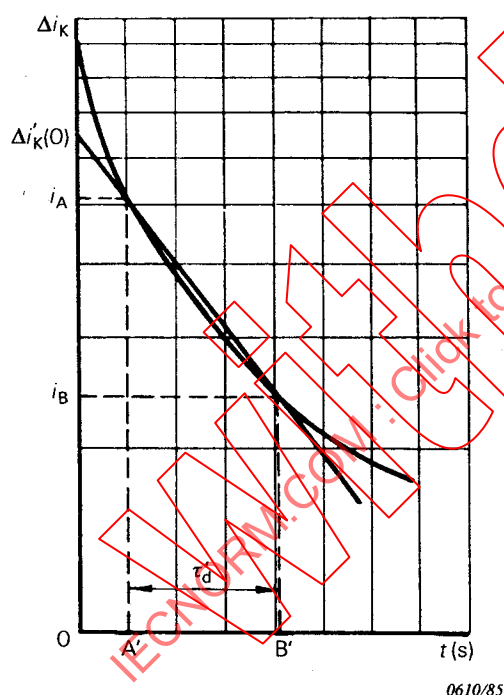


FIGURE 10

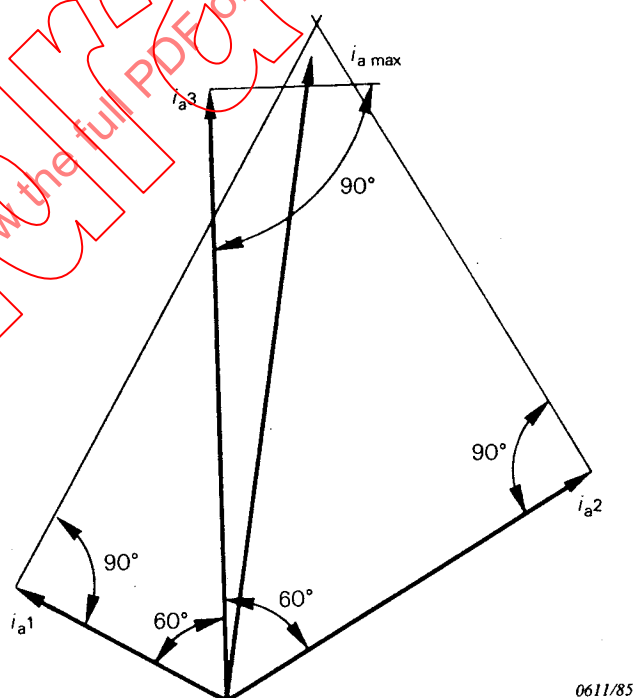


FIGURE 11

values of current  $i_B$  and  $i_A$  is assumed to represent the equivalent value of  $\Delta i'_k$  and, when it is extrapolated to zero time, it gives the initial value  $\Delta i'_k(0)$  of the transient component of short-circuit current.

The subtransient short-circuit current component is defined as the difference between the  $\Delta i'_k + \Delta i''_k$  curve and the straight line representing the value of  $\Delta i'_k$ . The variation of the subtransient current component with time is also plotted on the semi-log scale (Figure 9, page 53).

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

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

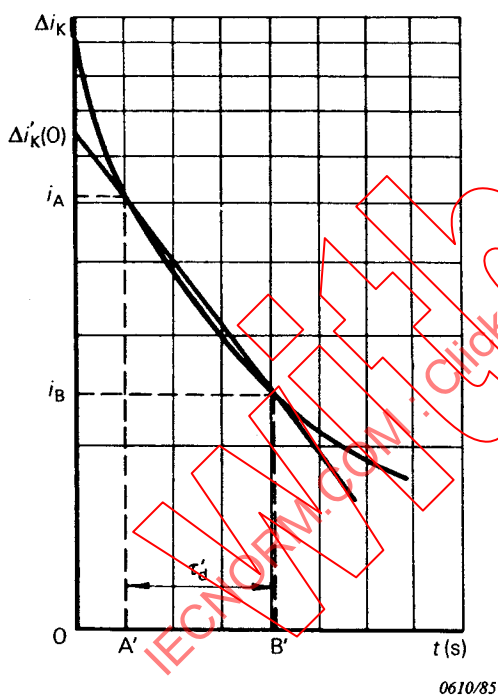


FIGURE 10

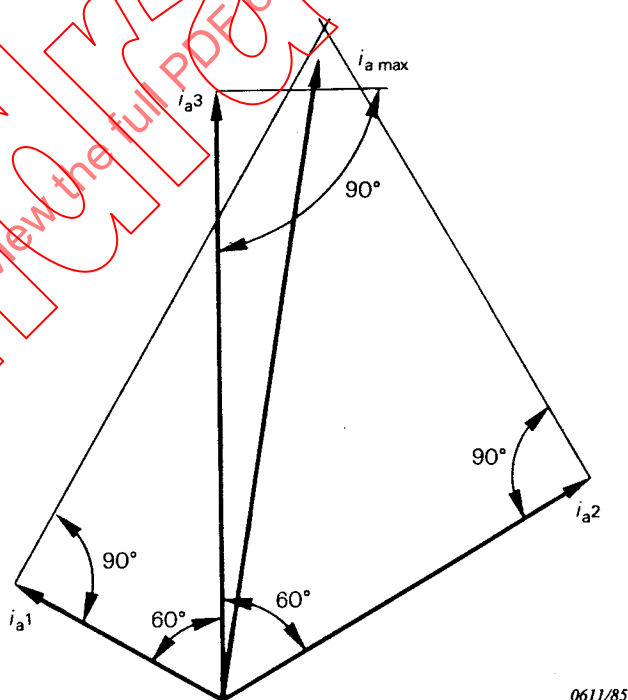


FIGURE 11

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

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

où  $i_{a3}$  est la valeur initiale absolue la plus élevée (c'est-à-dire indépendamment du signe) de la composante apériodique du courant donnée par l'essai et  $i_{a2}$  est la valeur initiale absolue de toute autre composante apériodique de courant dans une quelconque des deux autres phases.

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

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

La réactance transitoire longitudinale (voir article 7) est déterminée à partir de l'essai de court-circuit triphasé brusque comme étant le rapport de la tension à vide, mesurée immédiatement avant l'essai de court-circuit [ $u(0)$ ], à la valeur initiale de la composante périodique du courant de court-circuit sans tenir compte de la composante subtransitoire (figure 9, page 52):

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

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

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

- 41.2 La constante de temps transitoire longitudinale en court-circuit (voir article 18 et paragraphe 18.1) est déterminée à partir de l'essai de court-circuit triphasé brusque comme étant le temps nécessaire pour que la composante transitoire du courant d'induit décroisse jusqu'à  $1/e \approx 0,368$  fois sa valeur initiale (mais voir article 40, point b)).
- 41.3 La constante de temps subtransitoire longitudinale en court-circuit (voir article 19 et paragraphe 19.1) est déterminée à partir de l'essai de court-circuit triphasé brusque comme étant le temps nécessaire pour que la composante subtransitoire du courant d'induit décroisse jusqu'à  $1/e \approx 0,368$  fois sa valeur initiale.
- 41.4 La constante de temps en court-circuit de l'induit (voir article 20) est déterminée comme étant le temps nécessaire pour que la composante périodique du courant d'excitation décroisse jusqu'à  $1/e \approx 0,368$  fois sa valeur initiale.
- 41.5 La constante de temps en court-circuit de l'induit (voir article 20) déduite de la décroissance des composantes apériodiques des courants dans chaque phase de l'induit est déterminée comme étant le temps nécessaire pour que ces composantes décroissent jusqu'à  $1/e \approx 0,368$  fois la valeur initiale. Toute phase dans laquelle la composante apériodique initiale est inférieure à 0,4 fois leur valeur initiale maximale trouvée ne doit pas être considérée pour la détermination de la constante de temps en court-circuit de l'induit.

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

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

where  $i_{a3}$  is the highest absolute initial value (i.e. regardless of sign) of the aperiodic component of the current found from the test and  $i_{a2}$  is the absolute initial value of the aperiodic current component in either of the two other phases.

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

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

The direct-axis transient reactance (see Clause 7), as determined from the sudden short-circuit test, is the ratio of the no-load voltage, measured immediately before the short-circuit [ $u(0)$ ] to the initial value of the periodic component of the short-circuit current neglecting the subtransient component (Figure 9, page 53):

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

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

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

41.2 The direct-axis transient short-circuit time constant (see Clause 18 and Sub-clause 18.1), as determined from the sudden three-phase short-circuit test, is the time required for the transient armature current component to decrease to  $1/e \approx 0.368$  of its initial value (but see Clause 40, Item *b*)).

41.3 The direct-axis subtransient short-circuit time constant (see Clause 19 and Sub-clause 19.1), as determined from the sudden three-phase short-circuit test, is the time required for the subtransient armature current component to decrease to  $1/e \approx 0.368$  of its initial value.

41.4 The armature short-circuit time constant (see Clause 20) is determined as the time required for the excitation current periodic component to decrease to  $1/e \approx 0.368$  of its initial current.

41.5 The armature short-circuit time constant (see Clause 20) from the decrease of the aperiodic armature current components in each phase is determined as the average time required for these components to decrease to  $1/e \approx 0.368$  of their initial value. Any phase whose initial aperiodic component is less than 0.4 of the initial maximum resolved value should be disregarded in determining the armature short circuit time-constant.

La détermination de la constante de temps en court-circuit de l'induit à partir de la décroissance de la composante apériodique du courant d'induit n'est admise que si le courant d'induit est mesuré au cours de l'essai de court-circuit brusque au moyen de shunts non inductifs.

- 41.6 La plus grande valeur instantanée possible du courant initial de court-circuit est déterminée à partir de l'essai de court-circuit triphasé brusque comme étant la somme des valeurs des composantes périodique et apériodique une demi-période après le début du court-circuit.

La valeur de la composante périodique à cet instant est égale à la somme des composantes permanentes transitoire et subtransitoire du courant de court-circuit brusque.

Ces deux dernières composantes sont lues directement sur le diagramme (figure 9, page 52) à l'instant correspondant.

La valeur de la composante apériodique est déterminée par la formule (en valeurs réduites ou en grandeurs physiques):

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

où:

- $i_{a \max}$  = plus grande valeur possible de la composante apériodique du courant lors du court-circuit brusque  
 $e$  = base des logarithmes naturels  
 $\tau_a$  = constante de temps en court-circuit de l'induit (voir article 20)  
 $f$  = fréquence en hertz ( $\frac{0.5}{f}$  correspond à une demi-période)

## 42. Essai de rétablissement de la tension

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

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

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

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

La différence entre la tension en régime établi et la tension déterminée par les enveloppes de la tension de rétablissement est reportée en fonction du temps en coordonnées semi-logarithmiques, puis extrapolée jusqu'à l'instant où le court-circuit a été supprimé. (Courbe 1, figure 12, page 60.)

L'extrapolation de la partie rectiligne de la courbe 1 jusqu'à l'axe des ordonnées donne la valeur initiale de la composante transitoire de la tension  $\Delta u'(0)$ .

La différence entre la tension déterminée par la courbe 1 et la composante transitoire ( $\Delta u'$ ) de la tension donne la valeur de la composante subtransitoire ( $\Delta u''$ ) de la tension au même instant.

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

- 41.6 The largest possible instantaneous initial short-circuit current is determined from the sudden three-phase short-circuit test as the sum of the values of periodic and aperiodic components at a half-cycle after the instant of the short-circuit.

The value of the periodic component for this instant is equal to the sum of the sustained, transient and subtransient components of the sudden short-circuit current.

The two latter components are taken directly from the diagram (Figure 9, page 53) for the corresponding instant.

The value of the aperiodic component is determined by the formula (in per unit or physical quantities):

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

where:

$i_{a \max}$  = the largest possible value of the aperiodic current component of the sudden short circuit

$e$  = base of natural logarithm

$\tau_a$  = the armature short-circuit time constant (see Clause 20)

$f$  = frequency in hertz (cycle per second)  $\left(\frac{0.5}{f}\right)$  corresponds to a half-period

## 42. Voltage recovery test

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

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

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

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

The difference between the sustained voltage and the voltage determined by the envelope of recovery voltage is plotted on a semi-log scale against time, and then extrapolated to the instant of the switching off of the short circuit (Curve 1, Figure 12, page 61).

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

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

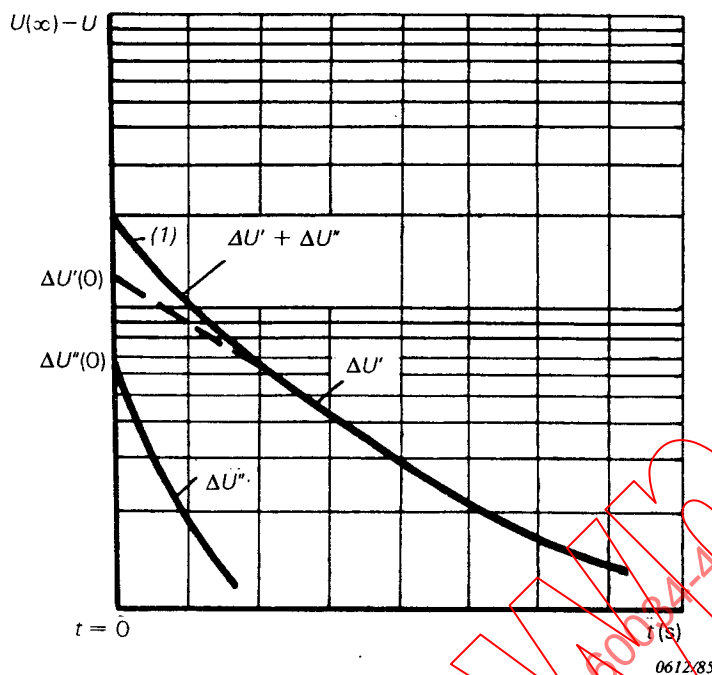


FIGURE 12

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

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

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

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

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

- 43.2 La constante de temps transitoire longitudinale à circuit ouvert (voir article 17) est déterminée à partir de l'essai de rétablissement de la tension comme étant le temps nécessaire pour que la composante transitoire de la tension  $\Delta u'$  décroisse jusqu'à  $1/e \approx 0,368$  fois sa valeur initiale.

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

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

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

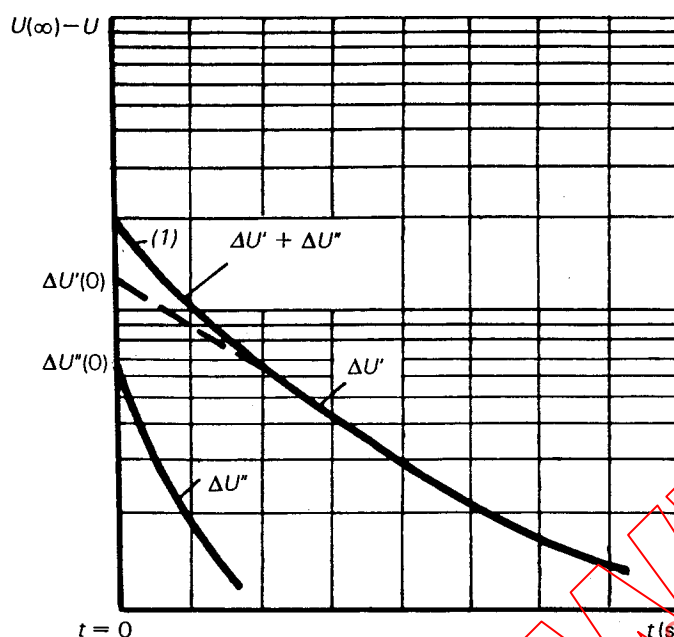


FIGURE 12

#### 43. Determination of quantities from the voltage recovery test

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

où:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

where:

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

$$\left[ x''_d = \sqrt{z''_d{}^2 - r''_d{}^2}, \quad z''_d = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{u}{i}; \quad r''_d = \frac{3}{2} \cdot \frac{p}{i^2} \right]$$

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

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

**46. Applied voltage test with the rotor in any arbitrary position**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$x''_d = x_{\text{moy}} \pm \Delta x$$

où:

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

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

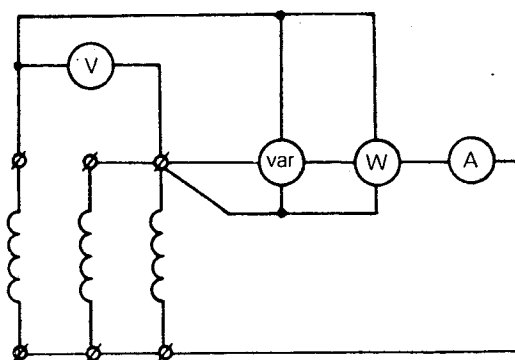
Le signe qui précède  $\Delta x$  est déterminé d'après la règle suivante: plus (+), si le plus grand des trois courants mesurés dans l'enroulement d'excitation correspond à la plus grande réactance mesurée de l'induit; moins (-), si le plus grand des trois courants mesurés dans l'enroulement d'excitation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

**47.1 La réactance subtransitoire transversale (voir article 9) est déterminée à partir de l'essai d'application de tension dans une position quelconque du rotor de façon analogue à la méthode décrite dans l'article 47.**

Le signe qui précède  $\Delta x$  est déterminé par la règle suivante: plus (+), si le plus petit des trois courants mesurés dans l'enroulement d'excitation correspond à la plus grande des réactances mesurées entre une paire de bornes de ligne de l'enroulement d'induit; moins (-), si le plus petit des trois courants d'excitation mesurés correspond à la plus petite réactance mesurée de l'induit.

**48. Essai de court-circuit permanent entre deux phases**

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



0614/85

FIGURE 13

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

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

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

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

$$x''_d = x_{\text{med}} \pm \Delta x$$

where:

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

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

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

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

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

#### 48. Line-to-line sustained short-circuit test

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

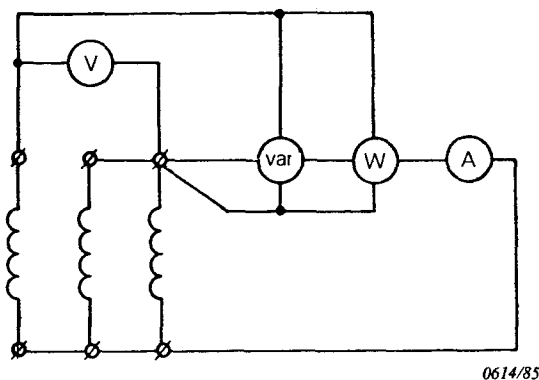


FIGURE 13

0614/85

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

#### 50. Essai de rotation inverse

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

This formula applies when voltage or current harmonics may be ignored.

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

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

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

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

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

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

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

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

#### 50. Negative-phase sequence test

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

The excitation winding should be short-circuited.

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

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

La réactance et la résistance inverses (voir articles 10 et 11) sont déterminées à partir de l'essai de rotation inverse en appliquant les formules:

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

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

où:

$P$  = puissance fournie

$I$  = courant moyen mesuré

$U$  = valeur moyenne mesurée de la tension appliquée

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

#### 52. Essai d'alimentation en monophasé des trois phases

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### 51. Determination of quantities from the negative-phase sequence test

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

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

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

where:

$P$  = input power

$I$  = average measured current

$U$  = average measured voltage applied.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

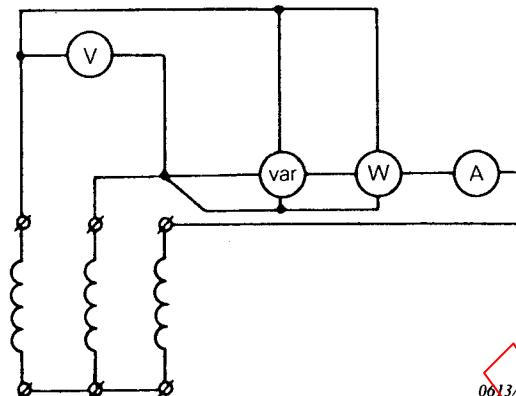


FIGURE 14

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Note. — La valeur de  $X_0$ , considérée comme la valeur au courant assigné, sera celle correspondant à un courant dans le point neutre égal à trois fois le courant de phase assigné.

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

#### 54. Line-to-line and to neutral sustained short-circuit test

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

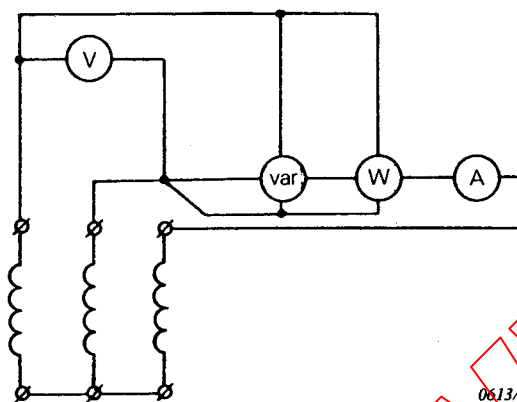


FIGURE 14

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

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

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

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

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

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

This formula applies when voltage or current harmonics may be ignored.

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

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

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

*Note.* — The value of  $X_0$  when the neutral current equals three times the rated phase current will be taken as the rated current value.

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

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

pour plusieurs valeurs du courant dans le point neutre.

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

*Note.* — La valeur de  $R_0$ , considérée comme la valeur au courant assigné, sera celle correspondant à un courant dans le point neutre égal à trois fois le courant de phase assigné.

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

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

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

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

L'intensité du courant au cours de la mesure de la résistance en courant continu doit être telle que l'échauffement supposé adiabatique de l'enroulement pendant l'essai ne dépasse pas 1 K. Pour calculer l'échauffement adiabatique, on utilisera la formule:

$$\Delta\vartheta = \frac{j^2}{c} \text{ degrés par seconde}$$

où:

$j$  = densité du courant pendant l'essai, en ampères par millimètre carré

$c$  = constante égale à 200 pour le cuivre et 86 pour l'aluminium

Si le calcul de l'échauffement adiabatique de l'enroulement ne peut être effectué, le courant ne doit pas dépasser 10% du courant assigné et ne doit pas être appliqué pendant plus de 1 min.

Le moment des mesures doit être tel qu'à l'instant où sont effectuées les lectures, les aiguilles des appareils soient immobiles (c'est-à-dire que les phénomènes transitoires aient disparu aussi bien dans les appareils eux-mêmes que dans les circuits dont on mesure les résistances).

La température de l'enroulement au cours de l'essai doit être mesurée au moyen de détecteurs thermiques incorporés ou noyés, lorsqu'il en existe.

Les thermomètres ou les couples thermoélectriques utilisés pour mesurer la température de l'enroulement doivent être en place depuis 15 min au moins et doivent être protégés contre toute influence extérieure.

## 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

Pour déterminer la résistance en courant continu de l'enroulement d'induit et celle de l'enroulement d'excitation par la méthode du voltmètre et de l'ampèremètre, il est recommandé de faire trois à cinq mesures pour différentes valeurs en régime établi du courant.

Les résistances des enroulements sont calculées à partir des mesures sur l'enroulement d'induit au moyen de la formule:

$$R = \frac{U}{I} \Omega; \quad \left[ r = 3 \cdot \frac{u}{i} \text{ pour l'enroulement d'induit} \right]$$

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

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

*Note.* — The value of  $R_0$ , when the neutral current equals three times the rated phase current, will be taken as the rated current value.

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

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

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

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

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

$$\Delta\vartheta = \frac{j^2}{c} \text{ degrees per second}$$

where:

$j$  = current density during test, in amperes per square millimetre

$c$  = constant, equal to 200 for copper and 86 for aluminium

If the winding heating is unknown, the current should not be more than 0.1 of the rated winding current and should be supplied for not longer than 1 min.

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

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

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

#### 57. Determination of winding d.c. resistance from the direct-current winding resistance measurements by the voltmeter and ammeter and by the bridge methods

To measure the d.c. resistance of the armature or of the excitation winding by the voltmeter and ammeter method, it is recommended to take three to five readings at various steady values of the current.

The winding resistances are calculated from the formula:

$$R = \frac{U}{I} \Omega; \quad \left[ r = 3 \cdot \frac{u}{i} \text{ for the armature winding} \right]$$

où:

$U$  = tension appliquée à l'enroulement, en volts

$I$  = courant dans l'enroulement, en ampères

La moyenne des résultats est prise comme valeur de la résistance. Dans la détermination de cette valeur moyenne, on ne tient pas compte des résultats de mesure qui diffèrent de plus de  $\pm 0,01$  de la valeur moyenne.

Si les mesures de résistance sont faites successivement entre chaque paire des bornes de ligne de l'enroulement d'induit, la résistance  $R_1$  de la phase 1 est calculée au moyen de l'une des formules suivantes (en valeurs réduites ou en grandeurs physiques):

— pour les enroulements connectés en étoile:

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

— pour les enroulements connectés en triangle:

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

où:

$R_{12}$ ,  $R_{23}$  et  $R_{31}$  désignent les résistances respectivement mesurées entre les bornes 1-2, 2-3 et 3-1.

- 57.1 Lorsque les résistances en courant continu de l'enroulement d'induit et ou de l'enroulement d'excitation sont mesurées par la méthode du pont, il est nécessaire de procéder à trois lectures au moins en changeant chaque fois l'équilibre du pont. La résistance d'un enroulement inducteur doit être mesurée à partir des bagues ou des extrémités de l'enroulement, afin de ne pas faire intervenir les résistances des balais et de leurs contacts.

La moyenne des résultats est prise comme valeur de la résistance. Dans la détermination de cette valeur moyenne, on ne tient pas compte des résultats de mesure qui diffèrent de plus de  $\pm 0,01$  de la valeur moyenne.

Si les mesures de résistance sont faites successivement entre chaque paire des bornes de ligne de l'enroulement d'induit, les résistances de phase sont calculées conformément à l'article 57.

## 58. Essai de décroissance du courant d'excitation avec l'enroulement d'induit à circuit ouvert

L'essai de décroissance du courant d'excitation avec l'enroulement d'induit à circuit ouvert est effectué sur la machine entraînée à sa vitesse assignée par un moteur approprié et excitée à sa tension assignée; l'enroulement d'excitation est mis brusquement en court-circuit. Si cela est nécessaire, la source d'alimentation de l'enroulement d'excitation peut être séparée dans les 0,02 s qui suivent la mise en court-circuit.

Pour limiter le courant de court-circuit de la source à courant continu, il est possible de placer en série avec l'enroulement d'excitation des résistances de limitation.

On enregistre à l'oscillographe la tension aux bornes de l'enroulement d'induit, le courant dans l'enroulement d'excitation et la tension aux bagues collectrices. Les oscillogrammes permettent la détermination précise de l'instant où commence la décroissance du courant d'excitation (instant zéro) et de la valeur de la tension initiale à cet instant.

La différence entre la tension relevée à l'oscillogramme et la tension résiduelle est reportée en fonction du temps en coordonnées semi-logarithmiques.

where:

$U$  = voltage applied to the winding, in volts

$I$  = winding current, in amperes

The average value is taken for the resistance. In determining the average value, resistances which differ by more than  $\pm 0.01$  from the average per unit value should be disregarded.

If resistance measurements are made in turn between each pair of the line terminals of the armature winding, the resistance  $R_1$  phase 1 is calculated from the formula (in per unit or physical quantities):

— for star-connected winding:

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

— for delta-connected winding:

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

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

- 57.1 In measuring the d.c. resistance of the armature or of the excitation winding by the bridge method, it is necessary to take at least three readings, each time disturbing the bridge balance. The resistance should be measured on the slip-rings or winding terminals so that the resistance of the brushes and their contacts is not included.

The average value is taken for the resistance. In determining the average value, resistances which differ by more than  $\pm 0.01$  per unit value from the average should be disregarded.

If resistance measurements are made in turn between each pair of the line terminals of the armature winding, the phase resistances are calculated in accordance with Clause 57.

## 58. Field current decay test with the armature winding open-circuited

The field current decay test with the armature winding open-circuited is conducted with the machine driven by some prime-mover at rated speed, excited to rated voltage, and suddenly short-circuiting the excitation winding. When necessary, the excitation winding supply source should be disconnected within 0.02 s.

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

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

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

**59. Détermination de  $\tau'_{do}$  à partir de l'essai de décroissance du courant d'excitation avec l'enroulement d'induit à circuit ouvert**

La constante de temps transitoire longitudinale à circuit ouvert (voir article 17) est déterminée au cours de l'essai de décroissance du courant d'excitation comme étant le temps nécessaire pour que la différence de tension mentionnée dans l'article 58 décroisse jusqu'à  $1/e \approx 0,368$  fois sa valeur initiale.

**60. Essai de décroissance du courant d'excitation avec l'enroulement d'induit en court-circuit**

L'essai de décroissance du courant d'excitation avec l'enroulement d'induit en court-circuit est effectué sur la machine entraînée à sa vitesse assignée par un moteur approprié et excitée de façon que l'induit court-circuité soit parcouru par le courant assigné. L'enroulement d'excitation est alors mis brusquement en court-circuit. Les limites de durée et d'intensité du courant de court-circuit de la source d'alimentation de l'enroulement d'excitation sont les mêmes que dans l'article 58.

On enregistre à l'oscillographe une des valeurs du courant en ligne ainsi que le courant ou la tension d'excitation.

La différence entre le courant transitoire de l'induit lu sur l'oscillogramme et le courant dû à la tension résiduelle est reportée en fonction du temps en coordonnées semi-logarithmiques.

**61. Détermination de  $\tau'_d$  à partir de l'essai de décroissance du courant d'excitation avec l'enroulement d'induit en court-circuit**

La constante de temps transitoire longitudinale en court-circuit (voir article 18) est déterminée au cours de l'essai de décroissance du courant d'excitation comme étant le temps nécessaire pour que la différence de courant mentionnée à l'article 60 décroisse jusqu'à  $1/e \approx 0,368$  fois sa valeur initiale.

**62. Essai d'oscillation du rotor suspendu à un câble**

Pour effectuer cet essai, le rotor est suspendu à un câble ou à deux câbles de manière que son axe soit dans une position verticale. En tournant le rotor, on provoque des oscillations autour de l'axe de son arbre. Le temps nécessaire pour effectuer plusieurs oscillations est mesuré et la durée moyenne d'une période d'oscillation est calculée.

Dans le cas de la suspension à un seul câble, l'essai est exécuté deux fois, d'abord avec le rotor seul, puis avec le rotor auquel on adjoint un volant ou une poulie.

Le déplacement angulaire unidirectionnel ne doit pas dépasser  $45^\circ$  dans le cas de la suspension à un seul câble et  $10^\circ$  dans celui de la suspension à deux câbles.

**63. Détermination de  $\tau_J$  et de  $H$  à partir de l'essai d'oscillation du rotor suspendu à un câble**

Le temps d'accélération (voir article 21) et l'énergie cinétique réduite (voir article 22) sont calculés à partir de l'essai d'oscillation du rotor suspendu, au moyen des formules:

$$\tau_J = \frac{J\omega^2}{P_n} \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

$$H = \frac{J\omega^2}{2 S_n} 10^{-3} \text{ s}$$

Les formules sont exprimées en utilisant le Système International d'Unités.

$J$  = moment d'inertie, exprimé en kilogramme mètre carré

$\omega = \frac{\pi n}{30}$  vitesse angulaire, en radians par seconde

$n$  = vitesse assignée de rotation, en tours par minute

$P_n$  = puissance active assignée, en kilowatts

$S_n$  = puissance apparente assignée, en kilovoltampères

**59. Determination of  $\tau'_{d0}$  from the field current decay test with the armature winding open-circuited**

Direct-axis transient open-circuit time constant (see Clause 17) is determined from the field current decay test as the time required for the voltage difference mentioned in Clause 58 to decrease to  $1/e \approx 0.368$  of its initial value.

**60. Field current decay test with the armature winding short-circuited**

The field current decay test with the armature winding short-circuited is conducted with the machine driven by a prime-mover at rated speed and with rated armature current flowing, and suddenly short-circuiting the excitation winding. The limitation of the duration and the value of the supply source short-circuit current is made in accordance with Clause 58.

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

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

**61. Determination of  $\tau'_d$  from the field current decay test with the armature winding short-circuited**

Direct-axis transient short-circuit time constant (see Clause 18) from the field decay test is determined as the time required for the current difference mentioned in Clause 60 to decrease to  $1/e \approx 0.368$  of its initial value.

**62. Suspended rotor oscillation test**

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

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

The unidirectional displacement angle for one-filament suspension should be not more than  $45^\circ$  and for two-filament suspension not more than  $10^\circ$ .

**63. Determination of  $\tau_J$  and  $H$  from suspended rotor oscillation test**

The acceleration time (see Clause 21) and stored energy constant (see Clause 22) from the string suspended rotor oscillation test are calculated using the formulae:

$$\tau_J = \frac{J\omega^2}{P_n} \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

$$H = \frac{J\omega^2}{2 S_n} \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

The formulae are expressed in International System Units.

$J$  = moment of inertia, in kilogram metre squared

$\omega = \frac{\pi n}{30}$ , angular speed, in radians per second

$n$  = rated speed of rotation, in revolutions per minute

$P_n$  = rated active power, in kilowatts

$S_n$  = rated apparent power, in kilovoltamperes

Le moment d'inertie est calculé au moyen des formules suivantes:

- lorsque le rotor est suspendu à un seul câble:

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

- lorsque le rotor est suspendu à deux câbles:

$$J = \frac{T^2 \cdot a^2}{L} \cdot \frac{mg}{(4\pi)^2} \text{ kgm}^2$$

où:

$J_p$  = moment d'inertie connu de la poulie, exprimé en kilogramme mètre carré

$g$  = accélération de la pesanteur, en mètres par seconde carrée

$T$  = durée d'une période d'oscillation du rotor, en secondes

$T_p$  = durée d'une période d'oscillation du rotor avec adjonction de la poulie ou du volant, en secondes

$a$  = distance entre les points de fixation, en mètres

$L$  = longueur de suspension, en mètres

$m$  = masse du rotor, en kilogrammes

#### 64. Essai d'oscillation avec pendule auxiliaire

Pour effectuer cet essai, un pendule auxiliaire (une masse placée à l'extrémité d'un levier) est fixé à l'arbre de la machine dans un plan perpendiculaire à son axe. La masse du levier lui-même doit être connue et être aussi petite que possible. Au lieu d'un pendule auxiliaire, une masse connue peut être fixée à la périphérie du rotor ou de la poulie.

Le pendule auxiliaire est écarté d'un angle de 5° environ de sa position d'équilibre. La durée d'une oscillation est mesurée.

Cet essai est recommandé pour les machines munies de roulements à billes ou à rouleaux.

#### 65. Détermination de $\tau_j$ et de $H$ à partir de l'essai d'oscillation avec pendule auxiliaire

Le temps d'accélération (voir article 21) et l'énergie cinétique réduite (voir article 22) sont calculés à partir de l'essai d'oscillation avec pendule auxiliaire au moyen de la formule donnée dans l'article 63.

Le moment d'inertie est calculé au moyen de la formule:

$$J = m_p L \left( \frac{T_p^2 g}{4\pi^2} - L \right) \text{ kgm}^2$$

où:

$m_p$  = masse du pendule auxiliaire, en kilogrammes

$L$  = distance de l'axe de l'arbre au centre de gravité du pendule ou au centre de gravité de la masse fixée à la périphérie du rotor ou de la poulie, en mètres

$g$  = accélération de la pesanteur, en mètres par seconde carrée

$T_p$  = durée d'une période d'oscillation, en secondes

#### 66. Essai de ralentissement à vide

L'essai de ralentissement à vide est exécuté lorsqu'il n'y a pas de volant supplémentaire sur l'arbre de la machine essayée. La machine est excitée par une source séparée et l'excitation reste constante pendant toute la durée de l'essai.

La machine essayée est amenée en survitesse en augmentant la fréquence d'alimentation ou au moyen d'un moteur muni d'un embrayage. L'alimentation est alors supprimée.

The moment of inertia, when the rotor is suspended by one filament, is calculated using the formula:

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

and when it is suspended by two filaments, using the formula:

$$J = \frac{T^2 \cdot a^2}{L} \cdot \frac{mg}{(4\pi)^2} \text{ kgm}^2$$

where:

$J_p$  = known moment of inertia of pulley, in kilogram metre squared

$g$  = acceleration of free fall, in metres per second squared

$T$  = time of one cycle or rotor swing, in seconds

$T_p$  = time of one cycle of rotor swing together with pulley or flywheel, in seconds

$a$  = distance between the points of suspension, in metres

$L$  = length of suspension, in metres

$m$  = rotor mass, in kilograms

#### 64. Auxiliary pendulum swing test

To perform this test, an auxiliary pendulum (a lever and a mass at the end) is attached in a plane at right angles to the shaft of the machine, placed horizontally. The mass of the pendulum, which is known, should be as small as possible. Instead of an auxiliary pendulum, a known mass may be attached at the circumference of the rotor or pulley.

The auxiliary pendulum is displaced at an angle about 5° from its steady position. The time of one swing is measured.

This test is recommended for machines provided with ball or roller bearings.

#### 65. Determination of $\tau_j$ and $H$ from the auxiliary pendulum swing test

The acceleration time (see Clause 21) and stored energy constant (see Clause 22) from the auxiliary pendulum swing test are calculated by the formula, as shown in Clause 63.

The moment of inertia is calculated using the formula:

$$J = m_p L \left( \frac{T_p^2 g}{4\pi^2} - L \right) \text{ kgm}^2$$

where:

$m_p$  = mass of the auxiliary pendulum, in kilograms

$L$  = the distance from the centre of the shaft to the centre of gravity of the pendulum or to the centre of gravity of the mass attached at circumference of rotor or pulley, in metres

$g$  = acceleration of free fall, in metres per second squared

$T_p$  = time of one cycle of swing, in seconds

#### 66. No-load retardation test

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

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

L'essai consiste à mesurer le temps de ralentissement  $\Delta t$  pendant que la machine ralentit entre deux vitesses prédéterminées espacées d'une petite quantité  $\Delta\omega$ , par exemple entre 1,10 et 0,9 (valeur réduite) ou entre 1,05 et 0,95 (valeur réduite).

**67. Détermination de  $\tau_J$  et de  $H$  à partir de l'essai de ralentissement à vide**

Le temps d'accélération de la machine (voir article 21) et l'énergie cinétique réduite (voir article 22) sont déterminés au cours de l'essai de ralentissement à vide en utilisant les formules:

$$\tau_J = \omega_n \frac{\Delta t}{\Delta\omega} \cdot \frac{P_{\text{mec}} + P_{\text{Fe}}}{P_n} \text{ s}$$

$$H = \frac{\omega_n}{2} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta\omega} \cdot \frac{P_{\text{mec}} + P_{\text{Fe}}}{S_n} \text{ s}$$

où:

$P_{\text{mec}}$  = pertes mécaniques à la vitesse assignée, en kilowatts

$P_{\text{Fe}}$  = pertes dans le circuit magnétique à la vitesse assignée et à la tension correspondante pendant l'essai, en kilowatts

$P_n$  = puissance active assignée, en kilowatts

$\omega_n$  = vitesse angulaire assignée, en radians par seconde

$S_n$  = puissance apparente assignée, en kilovoltampères

**68. Essai de ralentissement en charge de machines accouplées mécaniquement avec la machine synchrone fonctionnant en moteur**

L'essai est effectué sur la machine fonctionnant en moteur et entraînant une charge. La vitesse de rotation avant la séparation d'avec le réseau doit être égale à la vitesse assignée. La puissance absorbée avant la séparation d'avec le réseau ne doit pas être inférieure à 60% de la puissance assignée; le facteur de puissance doit être aussi voisin que possible de l'unité. L'excitation de la machine reste constante pendant l'essai.

Après séparation d'avec la source d'alimentation, on détermine la variation de vitesse de la machine au cours des premières secondes.

On trace la courbe de variation de la vitesse en fonction du temps ainsi qu'une tangente au point initial de la courbe. Cette tangente est utilisée pour déterminer la variation de vitesse  $\Delta\omega$  pendant l'intervalle de temps  $\Delta t$ .

**69. Détermination de  $\tau_J$  et de  $H$  de machines accouplées mécaniquement à partir de l'essai de ralentissement en charge avec la machine synchrone fonctionnant en moteur**

Le temps d'accélération (voir article 21) et l'énergie cinétique réduite (voir article 22) de la machine avec la charge qu'elle entraîne sont déterminés à partir de l'essai de ralentissement avec la machine fonctionnant en moteur au moyen des formules:

$$\tau_J = \omega_n \frac{\Delta t}{\Delta\omega} \cdot \frac{P_1 - (P_{\text{sup}} + P_{\text{cu}})}{P_n} \text{ s}$$

$$H = \frac{\omega_n}{2} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta\omega} \cdot \frac{P_1 - (P_{\text{sup}} + P_{\text{cu}})}{S_n} \text{ s}$$

où:

$P_1$  = puissance fournie au moteur immédiatement avant sa séparation du réseau, en kilowatts

$P_{\text{sup}} + P_{\text{cu}}$  = pertes dans l'enroulement d'induit (pertes supplémentaires + pertes cuivre) immédiatement avant la séparation du réseau, en kilowatts

$\omega_n$  = vitesse angulaire assignée, en radians par seconde

Cette méthode de détermination n'est pas très précise.

This test consists of measuring the retardation time  $\Delta t$  when the machine is slowing down between two pre-determined speeds with difference  $\Delta\omega$ , say from 1.10 to 0.9 per unit or from 1.05 to 0.95 per unit.

**67. Determination of  $\tau_J$  and  $H$  from the no-load retardation test**

Acceleration time of the machine (see Clause 21) and stored energy constant (see Clause 22) from the no-load retardation test are determined using the formulae:

$$\tau_J = \omega_n \frac{\Delta t}{\Delta\omega} \cdot \frac{P_{\text{mech}} + P_{\text{Fe}}}{P_n} \text{ s}$$

$$H = \frac{\omega_n}{2} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta\omega} \cdot \frac{P_{\text{mech}} + P_{\text{Fe}}}{S_n} \text{ s}$$

where:

$P_{\text{mech}}$  = mechanical losses at rated speed, in kilowatts

$P_{\text{Fe}}$  = core losses at rated speed and corresponding value of test voltage, in kilowatts

$P_n$  = rated active power, in kilowatts

$\omega_n$  = rated angular speed, in radians per second

$S_n$  = rated apparent power, in kilovoltamperes

**68. On-load retardation test of mechanically coupled machines with the synchronous machine operating as a motor**

The test is conducted with the machine operating as a motor and supplying a load. The speed of rotation of the unit before disconnecting from the network should be equal to the rated speed. The power input before disconnecting should be not less than 0.6 of the rated power; the power-factor should be close to unity. The excitation of the machine during the test is unchanged.

After disconnecting the supply source, the change of speed of the unit during the first few seconds is determined.

The speed-time curve is plotted and a tangent to the initial point of the curve is drawn. This tangent is used to determine the change in speed  $\Delta\omega$  for the time interval  $\Delta t$ .

**69. Determination of  $\tau_J$  and  $H$  of mechanically coupled machines from the on-load retardation test with the synchronous machine operating as a motor**

The acceleration time (see Clause 21) and stored energy constant (see Clause 22) of the machine together with the load from the on-load retardation test with the machine operating as a motor are determined by the formulae:

$$\tau_J = \omega_n \frac{\Delta t}{\Delta\omega} \cdot \frac{P_1 - (P_{\text{str}} + P_{\text{cu}})}{P_n} \text{ s}$$

$$H = \frac{\omega_n}{2} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta\omega} \cdot \frac{P_1 - (P_{\text{str}} + P_{\text{cu}})}{S_n} \text{ s}$$

where:

$P_1$  = power supplied to the motor immediately before disconnection from the network, in kilowatts

$P_{\text{str}} + P_{\text{cu}}$  = armature winding losses (stray and copper) immediately before disconnection, in kilowatts

$\omega_n$  = rated angular speed, in radians per second

This method of determination is not very precise.

**70. Essai d'accélération après suppression brusque de la charge avec la machine fonctionnant en génératrice**

L'essai est exécuté avec la machine fonctionnant comme une génératrice accouplée à un moteur d'entraînement.

Avant l'essai, la charge de la génératrice est fixée à une valeur de l'ordre de 10% à 20% de sa puissance assignée (le facteur de puissance est réglé au voisinage de l'unité); le système de réglage de vitesse du moteur d'entraînement est mis hors service.

L'excitation de la génératrice doit rester la même pendant l'essai. Après séparation brusque de la génératrice d'avec le réseau, on détermine la variation de vitesse en fonction du temps. Lorsque la vitesse atteint 1,07 à 1,1 fois sa valeur assignée le système de réglage de vitesse est remis en service ou l'admission de vapeur est interrompue. On trace la courbe d'accélération.

Une courbe est tracée à la courbe d'accélération au point qui correspond à la vitesse assignée, et on détermine la variation de vitesse pendant l'intervalle de temps.

**71. Détermination de  $\tau_J$  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**

Le temps d'accélération de la machine et de son moteur d'entraînement (voir article 21) et l'énergie cinétique réduite (voir article 22) sont déterminés à partir de l'essai d'accélération après suppression brusque de la charge avec la machine fonctionnant en génératrice en utilisant les formules:

$$\tau_J = \omega_n \frac{\Delta t}{\Delta \omega} \cdot \frac{P}{P_n} \text{ s}$$

$$H = \frac{\omega_n}{2} \frac{\Delta t}{\Delta \omega} \cdot \frac{P_1}{S_n} \text{ s}$$

où  $P_1$  est la puissance fournie par la génératrice immédiatement avant sa séparation d'avec le réseau, en kilowatts

Cette méthode de détermination n'est pas très précise.

**72. Détermination des grandeurs au moyen de calculs utilisant des grandeurs connues par des essais**

Les grandeurs  $x'_d$ ,  $x_d$ ,  $\tau'_{do}$  et  $\tau'_d$  sont reliées entre elles par la relation:

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

Cette relation est utilisée pour déterminer  $x'_d$  ou  $\tau'_d$  ou  $\tau'_{do}$  connaissant la valeur de  $x_d$  et de deux autres grandeurs.

**72.1 La réactance inverse  $X_2$  (voir article 10) peut être calculée connaissant les valeurs de  $X''_d$  (voir article 8) et de  $X''_q$  (voir article 9) déterminées par des essais en utilisant la formule:**

$$X_2 = \frac{x''_d + x''_q}{2}$$

**72.2 La résistance directe de l'enroulement d'induit (voir article 16) est déterminée en partant des pertes par effet Joule  $3I^2R_a$  (pertes dans le cuivre) et des pertes supplémentaires dans l'enroulement d'induit ( $P_{sup}$ ) mesurées conformément à la Publication 34-2 de la CEI: Machines électriques tournantes, 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) au moyen de la formule:**

$$R_1 = \frac{P_{cu} + P_{sup}}{3I_n^2}, \Omega \quad \left[ r_1 = P_{cu} + P_{sup} \right]$$

## 70. Acceleration after a load drop test with the machine operating as a generator

The test is conducted with the machine operating as a generator driven by a prime-mover.

Before the test, the generator load is fixed at 0.1 to 0.2 of the rated load (the power-factor is fixed close to unity), the speed regulator of the prime-mover is taken out of service.

The excitation of the generator during the test should be unchanged. After a sudden disconnection of the generator from the network the change of speed with time curve is determined. At a speed of about 1.07 to 1.1 rated value, the regulation of prime mover is put in service or steam is cut off. The acceleration curve is plotted.

A tangent is drawn to the acceleration curve at the point corresponding to the rated speed of the machine, and the speed change for the time interval is determined.

## 71. Determination of $\tau_J$ and $H$ of mechanically coupled machines from the acceleration after a load drop test with the machine operating as a generator

The acceleration time of the machine and its prime mover (see Clause 21) and stored energy constant (see Clause 22) from the acceleration after the load drop test with the machine operating as a generator are determined using the formulae:

$$\tau_J = \omega_n \cdot \frac{\Delta t}{\Delta \omega} \cdot \frac{P_1}{P_n} \text{ s}$$

$$H = \frac{\omega_n}{2} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta \omega} \cdot \frac{P_1}{S_n} \text{ s}$$

where  $P_1$  is the power supplied by the generator immediately before disconnection from the network in kilowatts

This method of determination is not very precise.

## 72. Determination of quantities by calculations using known test quantities

The quantities  $x'_d$ ,  $x_d$ ,  $\tau'_{do}$  and  $\tau'_d$  are connected with each other by the following relation:

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

This relation is used for determination of  $x'_d$  or  $\tau'_d$  or  $\tau'_{do}$  from the known values of  $x_d$  and two other quantities.

### 72.1 The negative sequence reactance $X_2$ (see Clause 10) from the known test of $X''_d$ (see Clause 8) and $X''_q$ (see Clause 9) is calculated by the formula:

$$X_2 = \frac{x''_d + x''_q}{2}$$

### 72.2 The positive sequence resistance of the armature winding (see Clause 16) is determined from the known $3I^2R_a$ losses ( $P_{cu}$ ) and stray losses in the armature winding ( $P_{str}$ ) measured at rated current in accordance with IEC Publication 34-2: Rotating Electrical Machines, Part 2: Methods for Determining Losses and Efficiency of Rotating Electrical Machinery from Tests (Excluding Machines for Traction Vehicles) using the formula:

$$R_1 = \frac{P_{cu} + P_{sup}}{3I_n^2}, \Omega \quad \left[ r_1 = P_{cu} + P_{sup} \right]$$

Cette valeur de  $R_1$  correspond à la température de l'enroulement à laquelle les mesures de pertes ont été faites.

- 72.3 La constante de temps en court-circuit de l'induit (voir article 20) à la fréquence assignée  $f_n$  est calculée en partant des valeurs de  $X_2$  (voir article 10) et de  $R_a$  (voir article 15) connues par les essais au moyen de la formule:

$$\tau_a = \frac{x_2}{2\pi f_n r_a} \text{ s}$$

*Note.* — Utiliser une valeur saturée pour  $x_2$ .

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60034-4:1985

Withdr2Wm

This value of  $R_1$  corresponds to the winding temperature at which the loss measurements were conducted.

- 72.3 Armature short-circuit time constant (see Clause 20) at rated frequency  $f_n$  from the known test values of  $X_2$  (see Clause 10) and  $R_a$  (see Clause 15) is calculated using the formula:

$$\tau_a = \frac{x_2}{2\pi f_n r_a} \text{ s}$$

*Note.* — Use a saturated value of  $x_2$ .

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60034-4:1985

Withd2Wm

TABLEAU I

*Méthodes d'essai et tableau de renvoi*

| Gran-<br>deur | Définitions<br>(articles et<br>paragraphe(s)) | Titre des essais                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Méthodes<br>d'essai<br>(articles) | Valeur<br>saturée ou<br>non saturée                                            | Remarque               |
|---------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| $X_d$         | 4, 27                                         | Essai de saturation à vide et essai en court-circuit triphasé                                                                                                                                                                                                                                                        | 25, 26                            | Non saturée                                                                    |                        |
| $K_c$         | 5, 27.1                                       | Essai de saturation à vide et essai en court-circuit triphasé                                                                                                                                                                                                                                                        | 25, 26                            |                                                                                |                        |
| $X_q$         | 6, 35<br>37<br>39                             | Essai d'excitation négative<br>Essai à faible glissement<br>Essai en charge avec mesure de l'angle de charge                                                                                                                                                                                                         | 34<br>36<br>38                    | Saturée<br>Non saturée<br>Non saturée<br>Saturée                               | } Préfé-<br>rentielles |
| $X'_d$        | 7, 41<br>43                                   | Essai de court-circuit triphasé brusque<br>Essai de rétablissement de la tension                                                                                                                                                                                                                                     | 40<br>42                          | Non saturée<br>Saturée<br>Non saturée                                          | } Préfé-<br>rentielles |
| $X''_d$       | 8, 41.1<br>43.1<br>45<br>47                   | Essai de court-circuit triphasé brusque<br>Essai de rétablissement de la tension<br>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<br>Essai d'application de tension pour une position unique quelconque du rotor | 40<br>42<br>44<br>46              | Non saturée<br>Saturée<br>Non saturée<br>(Saturée)<br>Non saturée<br>(Saturée) | } Préfé-<br>rentielles |
| $X''_q$       | 9, 45.1<br>47.1                               | 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<br>Essai d'application de tension pour une position unique quelconque du rotor                                                                                     | 44<br>46                          | Non saturée<br>(Saturée)<br>Non saturée<br>(Saturée)                           |                        |
| $X_2$         | 10, 49                                        | Essai de court-circuit permanent entre deux phases                                                                                                                                                                                                                                                                   | 48                                | Non saturée                                                                    | Préfé-<br>rentielle    |
| $R_2$         | 11, 49.1<br>51                                | Essai de court-circuit permanent entre deux phases<br>Essai de rotation inverse                                                                                                                                                                                                                                      | 48<br>50                          | Non saturée<br>Non saturée                                                     | Préfé-<br>rentielle    |
| $X_0$         | 12, 53<br>55                                  | Essai d'alimentation en monophasé des trois phases<br>Essai de court-circuit permanent entre deux conducteurs de phase et le point neutre                                                                                                                                                                            | 52<br>54                          | Non saturée<br>Non saturée                                                     | Préfé-<br>rentielle    |

TABLE I

*Test methods and cross-reference table*

| Quantity | Definitions<br>(clauses and<br>sub-clauses) | Name of test                                                                                                                    | Test<br>methods<br>(clauses) | Saturated or<br>unsaturated<br>value | Remark      |
|----------|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|-------------|
| $X_d$    | 4, 27                                       | No-load saturation and three-phase short-circuit test                                                                           | 25, 26                       | Unsaturated                          |             |
| $K_c$    | 5, 27.1                                     | No-load saturation and three-phase short-circuit test                                                                           | 25, 26                       |                                      |             |
| $X_q$    | 6, 35                                       | Negative excitation test                                                                                                        | 34                           | Saturated                            | } Preferred |
|          | 37                                          | Low slip test                                                                                                                   | 36                           | Unsaturated                          |             |
|          | 39                                          | On-load test by measuring the load angle                                                                                        | 38                           | Saturated                            |             |
| $X'_d$   | 7, 41                                       | Sudden three-phase short-circuit test                                                                                           | 40                           | Unsaturated<br>Saturated             | } Preferred |
|          | 43                                          | Voltage recovery test                                                                                                           | 42                           | Unsaturated                          |             |
| $X''_d$  | 8, 41.1                                     | Sudden three-phase short-circuit test                                                                                           | 40                           | Unsaturated<br>Saturated             | } Preferred |
|          | 43.1                                        | Voltage recovery test                                                                                                           | 42                           | Unsaturated                          |             |
|          | 45                                          | Applied voltage test with the rotor in the direct and quadrature axis positions with respect to the armature winding field axis | 44                           | Unsaturated<br>(Saturated)           |             |
|          | 47                                          | Applied voltage test with the rotor in any arbitrary position                                                                   | 46                           | Unsaturated<br>(Saturated)           |             |
| $X''_q$  | 9, 45.1                                     | Applied voltage test with the rotor in the direct and quadrature axis positions with respect to the armature winding field axis | 44                           | Unsaturated<br>(Saturated)           |             |
|          | 47.1                                        | Applied voltage test with the rotor in any arbitrary position                                                                   | 46                           | Unsaturated<br>(Saturated)           |             |
| $X_2$    | 10, 49                                      | Line-to-line sustained short-circuit                                                                                            | 48                           | Unsaturated                          | Preferred   |
| $R_2$    | 11, 49.1                                    | Line-to-line sustained short-circuit                                                                                            | 48                           | Unsaturated                          | Preferred   |
|          | 51                                          | Negative-phase sequence                                                                                                         | 50                           | Unsaturated                          |             |
| $X_0$    | 12, 53                                      | Single-phase voltage application to the three phases                                                                            | 52                           | Unsaturated                          | Preferred   |
|          | 55                                          | Line-to-line and to neutral sustained short-circuit                                                                             | 54                           | Unsaturated                          |             |

| Gran-<br>deur | Définitions<br>(articles et<br>paragrapes) | Titre des essais                                                                                                                        | Méthodes<br>d'essai<br>(articles) | Valeur<br>saturée ou<br>non saturée | Remarque                           |
|---------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| $R_0$         | 13, 53                                     | Essai d'alimentation en monophasé des<br>trois phases                                                                                   | 52                                | Non saturée                         | Préfé-<br>rentielle                |
|               | 55.1                                       | Essai de court-circuit permanent entre<br>deux conducteurs de phase et le point<br>neutre                                               | 54                                | Non saturée                         |                                    |
| $X_p$         | 14, 30                                     | Essai de saturation à vide, essai de court-<br>circuit triphasé permanent et essai de<br>surexcitation à un facteur de puissance<br>nul | 25, 26, 28                        |                                     |                                    |
| $R_a$         | 15, 57, 57.1                               | Voltmètre-ampèremètre ou pont                                                                                                           | 56                                |                                     |                                    |
| $R_f$         | 15, 57, 57.1                               | Voltmètre-ampèremètre ou pont                                                                                                           | 56                                |                                     |                                    |
| $R_l$         | 16                                         | Résistance directe de l'enroulement<br>d'induit                                                                                         | 72.2                              |                                     | Voir Publication<br>34-2 de la CEI |
| $\tau'_{do}$  | 17, 59                                     | Décroissance du courant d'excitation avec<br>enroulement d'induit ouvert                                                                | 58                                |                                     | Préfé-<br>rentielle                |
|               | 43.2                                       | Tension de rétablissement                                                                                                               | 42                                |                                     |                                    |
| $\tau'_d$     | 18, 41.2                                   | Court-circuit triphasé brusque                                                                                                          | 40                                |                                     | Préfé-<br>rentielle                |
|               | 61                                         | Décroissance du courant d'excitation avec<br>enroulement d'induit en court-circuit                                                      | 60                                |                                     |                                    |
| $\tau''_d$    | 19, 41.3                                   | Court-circuit triphasé brusque                                                                                                          | 40                                |                                     |                                    |
| $\tau_a$      | 20                                         | Court-circuit triphasé brusque                                                                                                          | 40                                |                                     |                                    |
| $\tau_j$      | 21, 63                                     | Oscillation du rotor suspendu par câble                                                                                                 | 62                                |                                     |                                    |
|               | 65                                         | Oscillation avec pendule auxiliaire                                                                                                     | 64                                |                                     |                                    |
|               | 67                                         | Ralentissement à vide                                                                                                                   | 66                                |                                     |                                    |
|               | 69                                         | Ralentissement en charge - la machine<br>synchrone fonctionnant en moteur                                                               | 68                                |                                     |                                    |
|               | 71                                         | Accélération après suppression brusque<br>de la charge - la machine fonctionnant<br>en génératrice                                      | 70                                |                                     |                                    |
| $H$           | 22, 63                                     | Oscillation du rotor suspendu à un câble                                                                                                | 62                                |                                     |                                    |
|               | 65                                         | Oscillation avec pendule auxiliaire                                                                                                     | 64                                |                                     |                                    |
|               | 67                                         | Ralentissement à vide                                                                                                                   | 66                                |                                     |                                    |
|               | 69                                         | Ralentissement en charge - la machine<br>synchrone fonctionnant en moteur                                                               | 68                                |                                     |                                    |
|               | 71                                         | Accélération après suppression brusque<br>de la charge - la machine fonctionnant<br>en génératrice                                      | 70                                |                                     |                                    |
| $i_{fn}$      | 23, 23.1                                   | Mesure directe                                                                                                                          |                                   |                                     | Préfé-<br>rentielle                |
|               |                                            | Diagramme vectoriel: de Potier<br>de l'ASA<br>suédois                                                                                   | 31<br>32<br>33                    |                                     |                                    |
|               |                                            |                                                                                                                                         |                                   |                                     |                                    |
| $\Delta U_n$  | 24                                         | Mesure directe                                                                                                                          | 25, 31                            |                                     |                                    |
|               | 24.1                                       | Au moyen de diagramme à partir de la<br>caractéristique de saturation à vide et<br>de la valeur connue du courant $i_{fn}$              | 32, 33                            |                                     |                                    |

| Quantity     | Definitions<br>(clauses and<br>sub-clauses) | Name of test                                                                                                | Test<br>methods<br>(clauses) | Saturated or<br>unsaturated<br>value | Remark                      |
|--------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|
| $R_0$        | 13, 53                                      | Single-phase voltage application to the<br>three phases                                                     | 52                           | Unsaturated                          | Preferred                   |
|              | 55.1                                        | Line-to-line and to neutral sustained<br>short-circuit                                                      | 54                           | Unsaturated                          |                             |
| $X_p$        | 14, 30                                      | No-load saturation, sustained three-phase<br>short-circuit and over-excitation test at<br>zero power-factor | 25, 26, 28                   |                                      |                             |
| $R_a$        | 15, 57, 57.1                                | Ammeter-voltmeter or bridge                                                                                 | 56                           |                                      |                             |
| $R_f$        | 15, 57, 57.1                                | Ammeter-voltmeter or bridge                                                                                 | 56                           |                                      |                             |
| $R_1$        | 16                                          | Positive sequence armature winding<br>resistance                                                            | 72.2                         |                                      | See IEC<br>Publication 34-2 |
| $\tau'_{do}$ | 17, 59                                      | Field current decay with armature<br>winding open                                                           | 58                           |                                      | Preferred                   |
|              | 43.2                                        | Voltage recovery                                                                                            | 42                           |                                      |                             |
| $\tau'_d$    | 18, 41.2                                    | Sudden three-phase short-circuit                                                                            | 40                           |                                      | Preferred                   |
|              | 61                                          | Field current decay with armature<br>winding short-circuited                                                | 60                           |                                      |                             |
| $\tau''_d$   | 19, 41.3                                    | Sudden three-phase short-circuit                                                                            | 40                           |                                      |                             |
| $\tau_a$     | 20                                          | Sudden three-phase short-circuit                                                                            | 40                           |                                      |                             |
| $\tau_J$     | 21, 63                                      | Suspended rotor oscillation                                                                                 | 62                           |                                      |                             |
|              | 65                                          | Auxiliary pendulum swing                                                                                    | 64                           |                                      |                             |
|              | 67                                          | No-load retardation                                                                                         | 66                           |                                      |                             |
|              | 69                                          | On-load retardation – the synchronous<br>machine operating as a motor                                       | 68                           |                                      |                             |
|              | 71                                          | Acceleration after a load drop – the<br>machine operating as a generator                                    | 70                           |                                      |                             |
| $H$          | 22, 63                                      | Suspended rotor oscillation                                                                                 | 62                           |                                      |                             |
|              | 65                                          | Auxiliary pendulum swing                                                                                    | 64                           |                                      |                             |
|              | 67                                          | No-load retardation                                                                                         | 66                           |                                      |                             |
|              | 69                                          | On-load retardation – the synchronous<br>machine operating as a motor                                       | 68                           |                                      |                             |
|              | 71                                          | Acceleration after a load drop – the<br>machine operating as a generator                                    | 70                           |                                      |                             |
| $i_{fn}$     | 23, 23.1                                    | Direct measurement                                                                                          |                              |                                      | Preferred                   |
|              |                                             | Phasor diagram: Potier<br>ASA<br>Swedish                                                                    | 31<br>32<br>33               |                                      |                             |
| $\Delta U_n$ | 24                                          | Direct measurement                                                                                          | 25, 31                       |                                      |                             |
|              | 24.1                                        | By diagram from the no-load saturation<br>characteristic and known $i_{fn}$                                 | 32, 33                       |                                      |                             |

## ANNEXE A

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

#### A1. Domaine d'application

La présente annexe est applicable aux machines synchrones triphasées de puissance assignée égale à 1 kVA et plus et dont la fréquence assignée n'est ni supérieure à 500 Hz, ni inférieure à 10 Hz.

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

#### A2. Objet

L'objet de cette annexe est d'établir, en vue d'une étude plus approfondie, des méthodes permettant de déterminer, en partant d'essais, certaines caractéristiques et grandeurs des machines synchrones triphasées.

Il n'entre pas dans les intentions de cette annexe 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. Ils complètent les essais recommandés par la section quatre.

Cette annexe propose en outre plusieurs méthodes d'essai complétant celles qui ont été données auparavant et permettant la détermination des caractéristiques et des grandeurs.

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

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

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

#### A3. Généralités

Les prescriptions et spécifications générales pour l'étude expérimentale, le choix des appareils de mesure et la désignation des circuits des machines synchrones sont les mêmes que celles données dans la section deux.

##### A3.1 Les définitions de la plupart des grandeurs et les méthodes expérimentales de leur détermination, telles qu'elles sont données dans la présente annexe, sont fondées sur la théorie des deux axes des

## APPENDIX A

### UNCONFIRMED TEST METHODS FOR DETERMINING SYNCHRONOUS MACHINE QUANTITIES FROM TESTS

#### A1. Scope

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

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

#### A2. Object

The object of this appendix is to establish for further study methods of determining those characteristics and quantities of three-phase synchronous machines from tests.

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

This appendix proposes also several methods of test procedure for obtaining characteristics and quantities additional to those that have already been given herein.

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

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

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

#### A3. General

The general requirements and specifications for experimental study, instrumentation and designation of synchronous machine circuits are the same as those given in Section Two.

##### A3.1 The definition of the majority of quantities and their experimental methods of determination, as given in this appendix, correspond to the widely accepted two-axis theory of synchronous

machines synchrones, largement acceptée et prise pour base au paragraphe 3.6, avec représentation approximative de tous les circuits s'ajoutant à l'enroulement d'excitation et fixes par rapport à lui par deux circuits équivalents, l'un d'axe longitudinal et l'autre d'axe transversal, la résistance d'induit étant prise approximativement en considération. Toutefois, l'expérience a montré que, pour les machines à rotor massif en particulier, un nombre aussi limité de circuits, surtout d'axe transversal, rend difficile la détermination expérimentale des grandeurs et fait que les résultats des études analytiques des machines synchrones en régime transitoire ou asynchrone diffèrent dans ce cas de leur comportement réel. En outre, des machines à enroulement d'excitation d'axe longitudinal et d'axe transversal ont été introduites dans la pratique.

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

## TERMINOLOGIE ET MÉTHODES D'ÉTUDES EXPÉRIMENTALES

### A4. Courant d'excitation correspondant au courant d'induit assigné en court-circuit ( $i_{fk}$ )

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

#### A4.1 Le courant d'excitation correspondant au courant d'induit assigné en court-circuit, en complément aux méthodes spécifiées dans l'article 27, peut être déterminé à partir de l'essai de surexcitation à facteur de puissance nul et à tension d'induit variable (voir articles A25 et A26).

### A5. Réactance synchrone longitudinale $X_d$

Pour la définition de la réactance synchrone longitudinale, voir l'article 4.

#### A5.1 La réactance synchrone longitudinale $X_d$ correspondant à l'état non saturé peut être déterminée, en complément à la méthode décrite au paragraphe 4.1, au moyen de l'essai avec angle interne variable (voir articles A27 et A28).

### A6. Réactance synchrone transversale $X_q$

Pour la définition de la réactance synchrone transversale, voir l'article 6.

#### A6.1 En plus des méthodes données au paragraphe 6.1, la réactance synchrone transversale $X_q$ correspondant à l'état non saturé de la machine peut être déterminée par l'une des méthodes suivantes:

- a) essai avec angle interne variable (voir articles A27 et A28);
- b) essai de suppression d'une basse tension appliquée à l'induit lors d'un essai à un très faible glissement (voir articles A29 et A30);
- c) essai de suppression d'une basse tension appliquée à l'induit, la machine tournant en asynchrone en charge (voir articles A31 et A32);
- d) décroissance d'un courant continu à l'arrêt (voir articles A59 et A60).

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

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

## TERMINOLOGY AND METHODS OF EXPERIMENTAL STUDY

### A4. Excitation current corresponding to the rated armature short-circuit current ( $i_{rk}$ )

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

- A4.1 The excitation current for the rated armature sustained short-circuit current, in addition to the method listed in Clause 27, may be determined from the over-excitation test at zero power-factor and variable armature (primary) winding voltage (see Clauses A25 and A26).

### A5. Direct-axis synchronous reactance $X_d$

For the definition of the direct-axis synchronous reactance, see Clause 4.

- A5.1 The direct-axis synchronous reactance  $X_d$  corresponding to the unsaturated state may be determined, in addition to the method listed in Sub-clause 4.1, from the test with phase shifting (see Clauses A27 and A28).

### A6. Quadrature-axis synchronous reactance $X_q$

For the definition of the quadrature-axis synchronous reactance, see Clause 6.

- A6.1 The quadrature-axis synchronous reactance  $X_q$  corresponding to the unsaturated state may be determined, in addition to the methods listed in Sub-clause 6.1, by one of the following methods:

- a) test with phase shifting (see Clauses A27 and A28);
- b) disconnecting applied low armature voltage at a very low slip (see Clauses A29 and A30);
- c) disconnecting applied low armature voltage, the machine running asynchronously on load (see Clauses A31 and A32);
- d) direct-current decay at standstill (see Clauses A59 and A60).

**A7. Réactance transitoire longitudinale  $X'_d$**

Pour la définition de la réactance transitoire longitudinale, voir l'article 7.

A7.1 La réactance transitoire longitudinale peut être déterminée au moyen de l'essai de décroissance d'un courant continu à l'arrêt (voir articles A59 et A60), en plus des méthodes données au paragraphe 7.1.

**A8. Réactance transitoire transversale  $X'_q$**

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

A8.1 La réactance transitoire transversale est déterminée par les méthodes suivantes:

- a) suppression d'une tension appliquée à l'induit, la machine tournant en charge avec un très faible glissement (voir articles A29 et A30);
- b) suppression d'une basse tension appliquée à l'induit, la machine tournant en régime asynchrone en charge (voir articles A31 et A32);
- c) mise en court-circuit brusque d'une machine tournant en charge à basse tension (voir articles A33 et A34);
- d) décroissance d'un courant continu dans l'induit à l'arrêt (voir articles A59 et A60).

**A9. Réactance subtransitoire transversale  $X''_q$**

Pour la définition de la réactance subtransitoire transversale, voir l'article 9.

A9.1 La réactance subtransitoire transversale peut être déterminée, en plus des méthodes données au paragraphe 45.1, par les méthodes suivantes:

- a) suppression d'une basse tension appliquée à l'induit à un très faible glissement (voir articles A29 et A30);
- b) suppression d'une basse tension appliquée à l'induit, la machine tournant en asynchrone en charge (voir articles A31 et A32);
- c) mise en court-circuit brusque de la machine tournant en charge à basse tension (voir articles A33 et A34).

**A10. Réactance inverse  $X_2$**

Pour la définition de la réactance inverse, voir l'article 10.

A10.1 La réactance inverse peut être déterminée, en plus des méthodes données au paragraphe 11.1, par les méthodes suivantes:

- a) court-circuit brusque entre deux phases (voir articles A35 et A36);
- b) décroissance d'un courant continu à l'arrêt (voir articles A59 et A60).

**A11. Réactance de fuites d'induit  $X_\sigma$**

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

A11.1 La réactance de fuites d'induit peut être déterminée par la méthode d'application d'une tension triphasée symétrique avec le rotor enlevé (voir articles A39 et A40).

**A7. Direct-axis transient reactance  $X'_d$** 

For the definition of the direct-axis transient reactance see Clause 7.

- A7.1 The direct-axis transient reactance in addition to the methods listed in Sub-clause 7.1, may be determined by the method of direct current decay at standstill (see Clauses A59 and A60).

**A8. Quadrature-axis transient reactance  $X'_q$** 

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

- A8.1 Quadrature-axis transient reactance is determined by the following methods:

- a) disconnecting applied low armature voltage, at a very low slip (see Clauses A29 and A30);
- b) disconnecting applied low armature voltage, the machine running asynchronously on load (see Clauses A31 and A32);
- c) sudden short-circuiting of machine running on load at low voltage (see Clauses A33 and A34);
- d) direct-current decay at standstill (see Clauses A59 and A60).

**A9. Quadrature-axis subtransient reactance  $X''_q$** 

For the definition of the quadrature-axis subtransient reactance, see Clause 9.

- A9.1 The quadrature-axis subtransient reactance, in addition to the methods listed in Sub-clause 45.1, may be determined by the following methods:

- a) disconnecting applied low armature voltage at a very low slip (see Clauses A29 and A30);
- b) disconnecting applied low armature voltage, the machine running asynchronously on load (see Clauses A31 and A32);
- c) sudden short-circuiting of machine running on load at low voltage (see Clauses A33 and A34).

**A10. Negative-sequence reactance  $X_2$** 

For the definition of the negative-sequence reactance, see Clause 10.

- A10.1 The negative-sequence reactance in addition to the methods listed in Sub-clause 11.1 may be determined by the following methods:

- a) sudden line-to-line short circuit (see Clauses A35 and A36);
- b) direct-current decay at standstill (see Clauses A59 and A60).

**A11. Armature-leakage reactance  $X_\sigma$** 

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

- A11.1 Armature-leakage reactance may be determined by the method of applying symmetrical three-phase voltage to the armature winding with rotor removed (see Clauses A39 and A40).

**A12. Impédance de démarrage initiale des moteurs synchrones  $Z_{st}$**

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

**A12.1 L'impédance de démarrage initiale peut être déterminée directement à partir de l'essai avec le rotor bloqué (voir articles A41 et A42).**

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

**A13. Constante de temps transitoire longitudinale à circuit ouvert  $\tau'_{do}$**

Pour la définition de la constante de temps transitoire longitudinale à circuit ouvert, voir l'article 17.

**A13.1 La constante de temps transitoire longitudinale à circuit ouvert peut être déterminée, en plus des méthodes de détermination données au paragraphe 17.1, par les méthodes suivantes:**

- a) application brusque de l'excitation avec l'enroulement d'induit à circuit ouvert (voir articles A43 et A44);
- b) décroissance d'un courant continu à l'arrêt (voir articles A59 et A60).

**A14. Constante de temps transitoire longitudinale en court-circuit  $\tau'_d$**

Pour la définition de la constante de temps transitoire longitudinale en court-circuit, voir l'article 18.

**A14.1 La constante de temps transitoire longitudinale en court-circuit peut être déterminée, en plus des méthodes de détermination expérimentale données au paragraphe 18.1, par les méthodes suivantes:**

- a) application brusque du courant d'excitation avec l'enroulement d'induit en court-circuit (voir articles A45 et A46);
- b) décroissance d'un courant continu à l'arrêt (voir articles A59 et A60).

**A15. Constante de temps transitoire transversale à circuit ouvert  $\tau'_{qo}$**

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

**A15.1 La constante de temps transitoire transversale à circuit ouvert peut être déterminée par l'une des méthodes suivantes:**

- a) suppression d'une basse tension appliquée à l'induit à un très faible glissement (voir articles A29 et A30);
- b) suppression d'une basse tension appliquée à l'induit, la machine tournant en asynchrone en charge (voir articles A31 et A32);
- c) décroissance d'un courant continu à l'arrêt (voir articles A59 et A60).

**A16. Constante de temps transitoire transversale en court-circuit  $\tau'_q$**

Temps nécessaire pour que la composante à amortissement lent du courant transversal 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.

**A12. Initial starting impedance of synchronous motors  $Z_{st}$** 

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

A12.1 The initial starting impedance of the machine may be determined directly from the locked rotor test (see Clauses A41 and A42).

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

**A13. Direct-axis transient open-circuit time constant  $\tau'_{do}$** 

For the definition of the direct-axis transient open-circuit time constant, see Clause 17.

A13.1 The direct-axis transient open-circuit time constant in addition to the methods of determination listed in Sub-clause 17.1, may be determined by the following methods:

- a) suddenly applying excitation with armature winding open-circuited (see Clauses A43 and A44);
- b) direct-current decay at standstill (see Clauses A59 and A60).

**A14. Direct-axis transient short-circuit time constant  $\tau'_d$** 

For the definition of the direct-axis transient short-circuit time constant, see Clause 18.

A14.1 The direct-axis transient short-circuit time constant in addition to the methods of determination listed in Sub-clause 18.1, may be determined by the following methods:

- a) suddenly applying excitation with armature winding short-circuited (see Clauses A45 and A46);
- b) direct-current decay at standstill (see Clauses A59 and A60).

**A15. Quadrature-axis transient open-circuit time constant  $\tau'_{qo}$** 

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

A15.1 The quadrature-axis transient open-circuit time constant may be determined by the following methods:

- a) disconnecting applied low armature voltage at a very low slip (see Clauses A29 and A30);
- b) disconnecting applied low armature voltage, the machine running asynchronously on load (see Clauses A31 and A32);
- c) direct-current decay at standstill (see Clauses A59 and A60).

**A16. Quadrature-axis transient short-circuit time constant  $\tau'_q$** 

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

**A16.1** La constante de temps transitoire transversale en court-circuit est déterminée par les méthodes suivantes:

- a) mise en court-circuit brusque d'une machine tournant en charge à basse tension (voir articles A33 et A34);
- b) par le calcul en partant des valeurs expérimentales de  $X_q$  (voir article 6),  $X'_q$  (voir article A8) et  $\tau''_{q0}$  (voir article A15); le calcul s'effectue au moyen de la formule donnée dans l'article A63;
- c) par la décroissance d'un courant continu à l'arrêt (voir articles A59 et A60).

**A17. Constante de temps subtransitoire longitudinale à circuit ouvert  $\tau''_{d0}$**

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

**A17.1** La constante de temps subtransitoire longitudinale à circuit ouvert peut être déterminée par les méthodes suivantes:

- a) rétablissement de la tension (voir articles A47 et A48);
- b) décroissance d'un courant continu à l'arrêt (voir articles A59 et A60).

**A18. Constante de temps subtransitoire transversale à circuit ouvert  $\tau''_{q0}$**

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

**A18.1** La constante de temps subtransitoire transversale à circuit ouvert peut être déterminée par les méthodes suivantes:

- a) suppression d'une basse tension appliquée à l'induit à un très faible glissement (voir articles A29 et A30);
- b) suppression d'une basse tension appliquée à l'induit, la machine tournant en asynchrone en charge (voir articles A31 et A32);
- c) décroissance d'un courant continu à l'arrêt (voir articles A59 et A60).

**A19. Constante de temps subtransitoire transversale en court-circuit  $\tau''_q$**

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

**A19.1** La constante de temps subtransitoire transversale en court-circuit peut être déterminée par les méthodes suivantes:

- a) par la mise en court-circuit brusque de la machine, tournant en charge à basse tension (voir articles A33 et A34);
- b) par le calcul en partant des valeurs expérimentales de  $X'_q$  (voir article A8),  $X''_q$  (voir article A9) et  $\tau''_{q0}$  (voir article A18). Le calcul s'effectue au moyen de la formule donnée à l'article A63;
- c) par la décroissance d'un courant continu dans l'induit à l'arrêt (voir articles A59 et A60).

A16.1 The quadrature-axis transient short-circuit time constant may be determined by the following methods:

- a) sudden short-circuiting of machine running on load at low voltage (see Clauses A33 and A34);
- b) calculation from the test values of  $X_q$  (see Clause 6),  $X'_q$  (see Clause A8) and  $\tau'_{q0}$  (see Clause A15). The calculation is made using the formula given in Clause A63;
- c) direct-current decay at standstill (see Clauses A59 and A60).

**A17. Direct-axis subtransient open-circuit time constant  $\tau''_{d0}$**

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

A17.1 The direct-axis subtransient open-circuit time constant may be determined by the following methods:

- a) voltage recovery (see Clauses A47 and A48);
- b) direct-current decay at standstill (see Clauses A59 and A60).

**A18. Quadrature-axis subtransient open-circuit time constant  $\tau''_{q0}$**

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

A18.1 The quadrature-axis subtransient open-circuit time constant may be determined by the following methods:

- a) disconnecting applied low armature voltage, at a very low slip (see Clauses A29 and A30);
- b) disconnecting applied low armature voltage, the machine running asynchronously on load (see Clauses A31 and A32);
- c) direct-current decay at standstill (see Clauses A59 and A60).

**A19. Quadrature-axis subtransient short-circuit time constant  $\tau''_q$**

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

A19.1 The quadrature-axis subtransient short-circuit time constant may be determined by the following methods:

- a) sudden short-circuiting of machine, running on load at a low voltage (see Clauses A33 and A34);
- b) Calculation from the test values of  $X'_q$  (see Clause A8),  $X''_q$  (see Clause A9), and  $\tau''_{q0}$  (see Clause A18). Calculation is made by means of the formula given in Clause A63;
- c) Direct-current decay at standstill (see Clauses A59 and A60).

**A20. Constante de temps longitudinale à circuit ouvert de l'enroulement d'excitation  $\tau_{fd0}$**

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

A20.1 La constante de temps longitudinale à circuit ouvert de l'enroulement d'excitation est déterminée à partir de l'essai d'extinction de champ avec l'induit à circuit ouvert (voir articles A49 et A50).

**A21. Constante de temps longitudinale à circuit ouvert du circuit amortisseur équivalent  $\tau_{kdo}$**

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

A21.1 La constante de temps longitudinale à circuit ouvert du circuit amortisseur équivalent peut être déterminée au moyen d'essai d'extinction du champ avec l'induit à circuit ouvert (voir articles A49 et A50).

**A22. Constante de temps longitudinale en court-circuit de l'enroulement d'excitation  $\tau_{fd}$**

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

A22.1 La constante de temps longitudinale en court-circuit de l'enroulement d'excitation peut être déterminée au moyen de l'essai d'extinction du champ avec l'induit en court-circuit (voir articles A51 et A52).

**A23. Constante de temps longitudinale en court-circuit du circuit amortisseur équivalent  $\tau_{kd}$**

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

A23.1 La constante de temps longitudinale en court-circuit du circuit amortisseur équivalent peut être déterminée au moyen d'essais d'extinction du champ avec l'induit en court-circuit (voir articles A51 et A52).

**A24. Caractéristiques de réponse en fréquence**

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

Dans cette annexe, les caractéristiques de réponse en fréquence suivantes sont considérées:

*Caractéristiques de réponse en fréquence de la réactance longitudinale  $X_d(j\omega)$ <sup>1)</sup>*

Quotient, exprimé en fonction du glissement, du vecteur complexe établi du terme fondamental de la composante de la tension d'induit produite par le flux longitudinal dû au courant d'induit

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

**A20. Direct-axis open-circuit excitation winding time constant  $\tau_{fdo}$** 

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

A20.1 The direct-axis open-circuit excitation winding time constant is determined from the field extinguishing test with armature winding open (see Clauses A49 and A50).

**A21. Direct-axis open-circuit equivalent damper circuit time constant  $\tau_{kdo}$** 

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

A21.1 The direct-axis open-circuit equivalent damper winding time constant may be determined from the field extinguishing test with armature winding open (see Clauses A49 and A50).

**A22. Direct-axis short-circuit excitation winding time constant  $\tau_{fd}$** 

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

A22.1 The direct-axis short-circuit excitation winding time constant may be determined from the field extinguishing test with armature winding short-circuited (see Clauses A51 and A52).

**A23. Direct-axis short-circuit equivalent damper winding time constant  $\tau_{kd}$** 

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

A23.1 The direct-axis short-circuit equivalent damper winding time constant may be determined from the field extinguishing test with armature winding short-circuited (see Clauses A51 and A52).

**A24. Frequency response characteristics**

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

In this appendix the following frequency response characteristics are considered:

*Frequency response characteristic of direct-axis reactance  $X_d(j\omega)$ <sup>1)</sup>*

The quotient expressed as a slip function of the sustained complex value (phasor) of that fundamental a.c. component of armature voltage which is produced by the d-axis armature current,

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

longitudinal, par le vecteur complexe du terme fondamental de ce courant, la machine tournant à un glissement donné, l'enroulement d'excitation étant court-circuité<sup>1</sup>.

*Caractéristique de réponse en fréquence de la réactance transversale  $X_q(js)$* <sup>2</sup>

Quotient, exprimé en fonction du glissement, du vecteur complexe établi du terme fondamental de la composante de la tension d'induit produite par le flux transversal dû au courant d'induit transversal, par le vecteur complexe du terme fondamental de ce courant, la machine tournant à un glissement donné, l'enroulement d'excitation étant court-circuité<sup>1</sup>.

*Caractéristique de réponse en fréquence du coefficient de l'excitation  $G(js)$*

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

A24.1 Les caractéristiques de réponse en fréquence peuvent être déterminées par les méthodes suivantes:

- a) fonctionnement en asynchrone en charge (voir articles A53 et A54);
- b) fonctionnement en asynchrone à tension réduite (voir articles A55 et A56);
- c) application d'une tension à fréquence variable à l'enroulement d'induit, la machine étant à l'arrêt (voir articles A57 et A58);
- d) décroissance d'un courant continu, la machine étant à l'arrêt (voir articles A59 et A60);
- e) application brusque d'un courant continu à l'induit, la machine étant à l'arrêt (voir articles A61 et A62).

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

## 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

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

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

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

<sup>1)</sup> La caractéristique peut être obtenue avec l'enroulement d'excitation fermé par l'intermédiaire d'une impédance spécifiée.

<sup>2)</sup> Au lieu des caractéristiques longitudinale et transversale, une caractéristique de compromis  $X(js)$  est parfois considérée. Il y a plusieurs méthodes de dérivation de la valeur approximative, par exemple valeur moyenne, valeur réciproque moyenne.

and the complex value (phasor) of the fundamental a.c. component of this current, the machine running at a given slip, with the excitation winding short-circuited.<sup>1</sup>

*Frequency response characteristic of quadrature axis reactance  $X_q(j\omega)$ <sup>2</sup>*

The quotient expressed as a slip function of the sustained complex value (phasor) of that fundamental a.c. component of armature voltage which is produced by the q-axis armature flux due to q-axis armature current and the complex value (phasor) of the fundamental a.c. component of this current, the machine running at a given slip, with the excitation winding short-circuited.<sup>1</sup>

*Frequency response characteristic of excitation factor  $G(j\omega)$*

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

A24.1 Frequency response characteristics may be determined by the following methods:

- a) asynchronous operation on load (see Clauses A53 and A54);
- b) asynchronous operation at reduced voltage (see Clauses A55 and A56);
- c) application of variable frequency voltage to armature winding, the machine being at standstill (see Clauses A57 and A58);
- d) direct current decay in the armature winding, the machine being at standstill (see Clauses A59 and A60);
- e) suddenly applied direct current to the armature winding, the machine being at standstill (see Clauses A61 and A62).

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

## 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

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

During the test, armature winding current is kept constant and equal to the rated value, armature voltage is varied from at least rated value down to the lowest value at which the machine remains stable. For reasonable accuracy, it is recommended that armature voltage should be decreased below 0.5 times the rated value.

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

<sup>1)</sup> Characteristics may be obtained with the excitation winding closed through a specified impedance.

<sup>2)</sup> Instead of d-axis and q-axis characteristics, a compromise characteristic  $X(j\omega)$  is sometimes considered, and there are several methods of deriving this approximate value, e.g. mean value, or mean reciprocal value.

**A26. Détermination du courant d'excitation correspondant au courant d'induit assigné en court-circuit permanent ( $i_{fk}$ )**

Les points obtenus expérimentalement sont portés sur un diagramme et réunis par une courbe, formant la portion supérieure de la courbe de facteur de puissance nul. On trace sur le même diagramme la courbe de saturation à vide. Ensuite la courbe à facteur de puissance nul est extrapolée parallèlement à la courbe de saturation à vide jusqu'à son intersection avec l'axe des abscisses. L'abscisse du point d'intersection représente le courant d'excitation correspondant au courant d'induit assigné en court-circuit permanent ( $i_{fk}$ ).

**A27. Essai avec angle interne variable**

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

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

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

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

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

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

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

**A28. Détermination des grandeurs à partir d'un essai avec angle interne variable<sup>1</sup>**

La réactance synchrone longitudinale (voir article A5), telle qu'elle est déterminée au moyen de cet essai, est calculée en utilisant la formule suivante:

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

**A28.1** La réactance synchrone transversale (voir article A6), telle qu'elle est déterminée au moyen de cet essai, est calculée en utilisant la formule suivante:

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

<sup>1)</sup> Si la tension résiduelle de la machine essayée est de l'ordre de 0,1 à 0,3 fois la tension d'alimentation, des corrections similaires à celle de l'article 37 devront être introduites.

**A26. Determination of the excitation current corresponding to the rated armature sustained short-circuit current ( $i_{rk}$ )**

The experimental points are plotted on a diagram and joined by a curve, forming the upper portion of the zero power-factor curve. On the same diagram the no-load saturation curve is also drawn. Then the zero power factor curve is extrapolated parallel to the no-load curve until it intersects with the abscissa axis. The abscissa of this point represents the excitation current corresponding to the rated armature sustained short-circuit current ( $i_{rk}$ ).

**A27. Phase shifting test**

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

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

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

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

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

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

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

**A28. Determination of quantities from the phase shifting test<sup>1</sup>**

The direct-axis synchronous reactance (see Clause A5), as determined from this test, is calculated using the following formula:

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

**A28.1 The quadrature-axis synchronous reactance (see Clause A6), as determined from this test, is calculated using the following formula:**

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

<sup>1)</sup> If residual voltage of machine under test is of the order 0.1 to 0.3 of the supplied test voltage, correction should be made similar to that in Clause 37.

### A29. Essai de suppression d'une basse tension appliquée à l'induit lors d'un essai à un très faible glissement

L'essai de suppression brusque d'une basse tension appliquée à l'induit au cours d'un essai à faible glissement est effectué sur la machine tournant avec un glissement notablement inférieur à 0,01, l'induit étant relié à une source de courant triphasé symétrique de fréquence assignée et à basse tension ( $0,05 U_n$  à  $0,10 U_n$ ). L'enroulement d'excitation est mis en court-circuit. Pendant la détermination des grandeurs correspondant à l'axe transversal, l'enroulement d'excitation peut être à circuit ouvert. La tension appliquée est supprimée brusquement au moment où le rotor est magnétisé suivant l'axe longitudinal ou suivant l'axe transversal. La position du rotor est vérifiée en mesurant l'angle compris entre la tension d'induit et l'axe transversal (ou longitudinal) du rotor (voir article A31 ou employer une autre méthode équivalente). Le courant et la tension dans l'induit et la position du rotor sont mesurés et enregistrés.

Au moment de la mise hors circuit de la machine, la tension d'induit tombe brusquement à une certaine valeur, puis décroît graduellement (figure A1, page 164).

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

La tension d'induit déterminée d'après les oscillogrammes est reportée en fonction du temps sur un diagramme à échelle semi-logarithmique (figure A2, page 164). Pour déterminer les constantes de temps longitudinales, la valeur de la tension résiduelle  $U(\infty)$  est soustraite de la tension d'induit, et cette différence est reportée en fonction du temps.

*Note 1.* — Etant donné la faible valeur de la tension appliquée à l'induit lors de ces essais, le magnétisme rémanent est entièrement déterminé, en amplitude et en phase. La méthode qui consiste à soustraire arithmétiquement la tension  $U(\infty)$  n'est donc pas rigoureuse, car le déphasage de  $U(\infty)$  par rapport à  $U_d$  ou  $U_q$  peut avoir une valeur quelconque. La méthode précise consiste à retrancher vectoriellement  $U(\infty)$  en tous points de la courbe de la figure A1. L'angle de phase peut être aisément déterminé à l'aide d'un alternateur de phase en bout d'arbre. Une méthode alternative consisterait à démagnétiser entièrement la machine avant l'essai.

La partie rectiligne de la courbe de décroissance de la tension d'induit extrapolée jusqu'à l'axe des ordonnées détermine la composante transitoire de tension, avec la valeur initiale  $U'(0) + U(\infty)$  (figure A1). En retranchant cette composante transitoire de la tension  $U$  décroissante, on obtient une composante subtransitoire de tension dont la valeur initiale est  $U''(0)$ .

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

### 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

La réactance synchrone transversale (voir article A6) est déterminée à partir de l'essai de suppression brusque d'une tension appliquée à l'induit au cours de l'essai à faible glissement, avec la machine essayée dans la position de l'axe transversal comme étant le quotient de la différence entre la tension initiale  $U(0)$  et la tension résiduelle  $U(\infty)$  (voir article A29, note 1) par le courant  $I(0)$  juste avant l'instant de la mise hors circuit:

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

Une vérification de la valeur mesurée devra être faite en calculant  $X_d$  au moyen de cet essai et avec le même glissement, alors que la machine essayée est magnétisée suivant l'axe longitudinal. La même formule est utilisée pour calculer  $X_d$ . La valeur de  $X_q$  obtenue à partir de cet essai peut être

**A29. Disconnecting applied low armature voltage at a very low-slip test**

The sudden disconnection of the applied low armature voltage during a low-slip test is performed on a machine running at a slip considerably less than 0.01, with the armature (primary) winding connected to a rated frequency symmetrical three-phase low-voltage supply ( $0.05 U_n$  to  $0.10 U_n$ ). The excitation winding is short-circuited. When determining quantities in the quadrature axis the excitation winding may be open-circuited. The applied voltage is suddenly disconnected when the rotor is magnetized in the quadrature or in the direct axis. The rotor position is checked by measuring the internal angles between the armature voltage and the quadrature (or direct) rotor axis (see Clause A31 or use other equivalent method). Armature current and voltage, and rotor position indication are measured and recorded.

At the instant of switching off the machine, the armature winding voltage suddenly drops to a particular value and then gradually decays (Figure A1, page 164).

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

The armature voltage determined from the oscillogram is plotted on a semi-logarithmic scale against time (Figure A2, page 164). If time constants along the d-axis are being determined, the value of residual voltage  $U(\infty)$  is subtracted from the armature voltage and this difference is plotted against time.

*Note 1.* — The applied armature winding voltage being of low value during this test, the residual magnetism should be carefully determined in amplitude and in phase. The method of subtracting arithmetically the voltage  $U(\infty)$  is not rigorous, because the phase shifting of  $U(\infty)$  referred to  $U_d$  or  $U_q$  may be significant. The accurate method consists of subtracting  $U(\infty)$  vectorially at all points of the curve on Figure A1. The phase angle may be easily determined with help of a phase generator on the shaft end.

An alternative method would be to demagnetize completely the machine under test.

The straight portion of the armature voltage decay curve extrapolated to the ordinate axis determines the transient voltage component with the initial value  $U'(0) + U(\infty)$  (Figure A1). Subtracting this transient voltage component from the decaying voltage  $U$ , enables a subtransient voltage component with its initial value  $U''(0)$  to be determined.

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

**A30. Determination of quantities from the disconnecting applied low armature voltage at a very low-slip test**

Quadrature-axis synchronous reactance (see Clause A6) is determined from the suddenly disconnected applied voltage during the low-slip test when the machine under test is in the quadrature-axis position as the quotient of the difference between the initial voltage  $U(0)$  and the residual voltage  $U(\infty)$  (see Clause A29, note 1) and the current  $I(0)$  just before the instance of switching off:

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

A check of the measured value shall be made by determining  $X_d$  from this test at the same slip when the machine under test is magnetized in the direct axis position. The corresponding formula is used to calculate  $X_d$ . The value of  $X_q$  from this test may be considered accurate if the value of  $X_d$

considérée comme précise si la valeur de  $X_d$  déterminée par le même essai coïncide pratiquement avec celle obtenue conformément à l'article 27. S'il n'en est pas ainsi, l'essai est répété pour plusieurs valeurs de plus en plus faibles du glissement, après quoi la valeur de  $X_q$  est extrapolée jusqu'au glissement nul. La valeur de  $X_q$  obtenue au moyen de cet essai correspond à la valeur non saturée.

- A30.1 La réactance transitoire transversale (voir article A8) est déterminée à partir de l'essai de suppression brusque d'une tension appliquée à l'induit, avec la machine essayée magnétisée suivant l'axe transversal, comme étant le quotient de (a) la différence entre la tension initiale  $U(0)$  mesurée entre deux phases et la valeur initiale de la tension transitoire  $\Delta U'(0) + U(\infty)$  (voir article A29, note 1) et (b) par le courant  $I(0)$  dans l'induit juste avant l'instant de la mise hors circuit:

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

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

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

- A30.2 La réactance subtransitoire transversale (article A9) peut être obtenue en partant de cet essai (voir article A29, note 1), en utilisant la formule:

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

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

- A30.3 La constante de temps transitoire transversale à circuit ouvert (voir article A15) est déterminée à partir de l'essai de suppression brusque d'une tension appliquée à l'induit comme étant le temps nécessaire pour que la composante transitoire de la tension d'induit décroisse jusqu'à  $1/e \approx 0,368$  fois sa valeur initiale. Une vérification de la valeur mesurée pour  $\tau'_{q0}$  peut être faite en calculant  $\tau'_{d0}$  à partir du même essai lorsqu'on détermine  $X'_d$ . La valeur de  $\tau'_{q0}$  obtenue à partir de l'essai de suppression brusque d'une tension appliquée peut être considérée comme correcte si la valeur de  $\tau'_{d0}$  obtenue à partir de cet essai coïncide avec celle qui est obtenue conformément à cette norme.

- A30.4 La constante de temps subtransitoire transversale à circuit ouvert (voir article A18) est déterminée à partir de l'essai de suppression brusque d'une tension appliquée à l'induit comme étant le temps nécessaire pour que la composante subtransitoire de la tension d'induit décroisse jusqu'à  $1/e \approx 0,368$  fois sa valeur initiale  $\Delta U''(0)$ .

La vérification de la valeur de  $\tau''_{q0}$  peut être faite de manière analogue à celle du paragraphe A30.3 en déterminant  $\tau''_{d0}$  à partir du même essai exécuté en position longitudinale et en comparant sa valeur à celle qui est obtenue conformément à cette norme.

- A31. Essai de suppression d'une basse tension appliquée à l'induit, la machine tournant en asynchrone en charge

L'essai de suppression d'une basse tension appliquée à l'induit est effectué sur la machine tournant en asynchrone en charge, l'induit étant relié à une source triphasée symétrique de fréquence

obtained at the same test agrees with its value obtained in accordance with Clause 27. Otherwise, the test is repeated at several decreasing values of slip, followed by extrapolation of the  $X_q$  value to zero slip. The value of  $X_q$  obtained from this test corresponds to the unsaturated value.

- A30.1 Quadrature-axis transient reactance (see Clause A8) is determined from the suddenly disconnected applied voltage test when the tested machine is magnetized along the quadrature-axis, by the quotient of (a) the difference between the initial measured line-to-line voltage  $U(0)$  and of the initial transient voltage  $\Delta U'(0) + U(\infty)$  (see Clause A29, Note 1) and (b) of the armature current  $I(0)$  just before the instant of switching off:

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

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

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

- A30.2 From this test, quadrature-axis subtransient reactance (see Clause A9) may also be obtained (see Clause A29, Note 1), as:

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

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

- A30.3 The quadrature-axis transient open-circuit time constant (see Clause A15) is determined from the suddenly disconnected applied voltage test as the time required for the transient component of the armature voltage to decrease to  $1/e \approx 0.368$  of its initial value. A check of the measured value  $\tau'_{q0}$  may be made by calculating  $\tau'_{d0}$  from the same test, when determining  $X'_d$ . The results of  $\tau'_{q0}$  obtained from the suddenly disconnected applied voltage test may be considered accurate if the  $\tau'_{d0}$  value obtained from this test agrees with its value obtained in accordance with the standard.

- A30.4 Quadrature-axis subtransient open-circuit time constant (see Clause A18) is determined from the suddenly disconnected applied voltage test as the time required for the subtransient component of the armature voltage to decrease to  $1/e \approx 0.368$  of its initial value  $\Delta U''(0)$ .

A check of the value of  $\tau''_{q0}$  may be made in a similar way to that mentioned in Sub-clause A30.3, by determining  $\tau''_{d0}$  from the same test performed in d-axis position and comparing its value with that obtained in accordance with this standard.

- A31. Disconnecting applied low armature voltage test, the machine running asynchronously on load

The disconnecting applied low armature voltage test, the machine running asynchronously on load, is performed with the armature winding connected to a rated frequency symmetrical three-

assignée, de tension assez basse pour éviter l'influence de la saturation et l'enroulement d'excitation étant court-circuité.

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

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

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

L'émetteur produisant le signal de positionnement doit être déplacé autour de l'arbre de la machine jusqu'à ce que son signal coïncide avec l'instant où la tension  $U_{12}$  entre deux phases passe par zéro. En cette position le signal coïncidera avec le maximum de la tension de phase  $U_3$  qui est à vide une tension d'axe transversal (figure A3, page 165).

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

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

Les tensions et les courants sont constitués, en règle générale, par des composantes longitudinales et transversales. Ces composantes sont déterminées au moyen d'un oscillogramme comme il est représenté sur la figure A4, page 165, dans les conditions correspondant à celle de la figure A5, page 165. Les flèches représentant les valeurs instantanées des composantes en présence du signal transversal sont tracées en trait plein, et celles correspondant à l'axe longitudinal en trait pointillé (celles-ci ne sont pas nécessaires pour le calcul).

Après le tarage des appareils enregistreurs on procède aux mesures. Quand la machine atteint un angle interne s'approchant de  $90 \pm 20$  degrés électriques, on prend un oscillogramme de la tension entre phases  $U_{12}$ , du courant de phase  $I_3$  et du signal transversal, en montrant un intervalle de temps qui inclut la mise hors circuit. Un exemple en est donné à la figure A6, page 166. Le courant  $I_q(0)$  et la tension  $U_d(0)$  sont mesurés avant la suppression de la tension appliquée. Les tensions successives ( $U_{d1}$ ,  $U_{d2}$ ,  $U_{d3}$ , etc.) sont déterminées au moyen d'un oscillogramme après la mise hors circuit. Ces tensions, la tension résiduelle  $U_d(\infty)$  (voir figure A7, page 166) étant soustraite suivant le cas, sont reportées en fonction du temps en coordonnées logarithmiques (voir figure A8, page 167) et les composantes initiales transitoires et subtransitoires s'obtiennent de façon habituelle.

#### 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

La réactance synchrone transversale (voir article A6) peut être déterminée à partir de l'essai de suppression brusque d'une basse tension appliquée à l'induit, la machine essayée s'approchant de  $\delta = 90 \pm 20^\circ$ , en utilisant  $U_d(0) - U_d(\infty)$  et  $I_q(0)$  (avant la mise hors circuit) au moment du signal (voir figure A6).

La réactance synchrone transversale est alors:

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

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

phase low-voltage supply to avoid influence of saturation, and the excitation winding is short-circuited.

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

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

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

The emitter producing the positioning signal should be displaced round the shaft until its signal coincides with the instant when the line-to-line voltage  $U_{12}$  passes through zero. At this position the signal will coincide with the maximum of phase voltage  $U_3$  which, at no load, corresponds to a q-axis voltage (Figure A3, page 165).

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

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

In general, voltages and currents consist of d-axis and q-axis components. These components are determined from an oscillogram as shown on Figure A4, page 165, for conditions corresponding to Figure A5, page 165. The arrows corresponding to the momentary values of the components at the q-axis signal are drawn as full lines, and those corresponding to the d-axis as broken lines (these are not needed for calculations).

After adjusting the recorders, the test measurements are performed. When the machine has reached an internal angle approaching  $90 \pm 20$  electrical degrees, an oscillogram is taken of the line-to-line voltage  $U_{12}$ , the phase current  $I_3$  and the q-axis signal, showing a time interval that includes switching off. An example is given in Figure A6, page 166. Before disconnecting the applied voltage, the current  $I_q(0)$  and the voltage  $U_d(0)$  are measured. The sequence voltages after switching off are determined from an oscillogram ( $U_{d1}$ ,  $U_{d2}$ ,  $U_{d3}$ , etc.). These voltages, after having subtracted, if necessary, the residual voltage  $U_d(\infty)$ , (see Figure A7, page 166), are plotted on a logarithmic scale (see Figure A8, page 167) against time and the initial transient and subtransient components are found in the usual way.

**A32. Determination of quantities from the sudden disconnection of applied low armature voltage, the machine running asynchronously on load, test**

Quadrature-axis synchronous reactance (see Clause A6) may be determined from the suddenly disconnected applied low-voltage test when the machine under test is approaching  $\delta = 90 \pm 20^\circ$ , by using  $U_d(0) - U_d(\infty)$  and  $I_q(0)$  (before switching off) at the instant of the signal (see Figure A6).

The quadrature-axis synchronous reactance is then:

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

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

- A32.1 La réactance transitoire transversale (voir article A8) peut être déterminée au moyen de cet essai (voir article A31) comme (voir figure A6, page 166):

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

- A32.2 La réactance subtransitoire transversale (voir article A9) peut être déterminée au moyen de cet essai (voir article A31) comme:

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

- A32.3 La constante de temps transitoire transversale à circuit ouvert (voir article A15) est déterminée à partir de l'essai de suppression brusque d'une tension appliquée à l'induit comme étant le temps nécessaire pour que la composante transitoire longitudinale de la tension de l'induit décroisse jusqu'à  $1/e \approx 0,368$  fois sa valeur initiale  $\Delta U'$  (0).

- A32.4 La constante de temps subtransitoire transversale à circuit ouvert (voir article A18) est déterminée à partir de l'essai de suppression brusque d'une tension appliquée à l'induit comme étant le temps nécessaire pour que la composante subtransitoire longitudinale de la tension d'induit décroisse jusqu'à  $1/e \approx 0,368$  fois sa valeur initiale  $\Delta U''$  (0).

- A33. Essai de mise en court-circuit brusque de la machine, tournant en charge, alimentée à basse tension

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

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

Les signaux de positionnement sur l'arbre de la machine sont ajustés de la même façon qu'à l'article A31. La composante transversale du courant est mesurée en utilisant le courant dans la phase 3 au moment du signal transversal. La tension longitudinale est mesurée au même instant que la tension  $U_{12}$  entre phases. L'essai proprement dit est fait en court-circuitant la machine après qu'elle a atteint un angle s'approchant de 90 degrés électriques ( $t = 0$ ). Elle peut aussi glisser très faiblement. Les valeurs de  $I_q(0)$ ,  $U_d(0)$ , et après la mise en court-circuit,  $I_{q1}$ ,  $I_{q2}$ , etc., sont enregistrées à l'oscillographe comme on l'a représenté à la figure A9, page 167. La variation du courant en fonction du temps est tracée en coordonnées naturelles (figure A10, page 168) à partir de l'oscillogramme; les valeurs initiales  $\Delta I'_2(0)$  et  $\Delta I''_q(0)$ , ainsi que les variations du courant transitoire  $\Delta I'_q$  et subtransitoire  $\Delta I''_q$  en fonction du temps sont déterminées et tracées en coordonnées semi-logarithmiques (figure A11, page 168), de façon analogue à celle de la figure A8, page 167.

- 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

La réactance transitoire transversale (voir article A8) est déterminée à partir de l'essai de mise en court-circuit brusque à basse tension, lorsque la machine en charge s'approche d'un angle de 90 degrés électriques.

La réactance transitoire transversale (voir article A8) peut être déterminée au moyen de cet essai (voir article A33) comme:

A32.1 The quadrature-axis transient reactance (see Clause A8) may be determined from this test (see Clause A31) as (see Figure A6, page 166):

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

A32.2 The quadrature-axis subtransient reactance (see Clause A9) may be determined from this test (see Clause A31) as:

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

A32.3 The quadrature-axis open-circuit transient time constant (see Clause A15) is determined from the suddenly disconnected applied voltage test as the time required for the transient direct-axis component of the armature voltage to decrease to  $1/e \approx 0.368$  of its initial value  $\Delta U''(0)$ .

A32.4 The quadrature-axis subtransient open-circuit time constant (see Clause A18) is determined from the suddenly disconnected applied voltage test as the time required for the subtransient direct-axis component of the armature voltage to decrease to  $1/e \approx 0.368$  of its initial value  $\Delta U''(0)$ .

### A33. Sudden short-circuiting of machine, running on load at low-voltage, test

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

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

The positioning signals on the shaft are adjusted in a similar way to that described in Clause A31. The q-axis current is measured using the current in phase 3 at the time of the q-axis signal. The d-axis voltage is measured at the same time as the line-to-line  $U_{12}$  voltage. The test is performed by short-circuiting the machine after it has reached an angle approaching 90 electrical degrees ( $t = 0$ ). It may also slip very slowly. Values of  $I_q(0)$ , and  $U_d(0)$ , and after the short circuit  $I_{q1}$ ,  $I_{q2}$ , etc., are oscillographed as shown in Figure A9, page 167. The plot of current value against time in natural scale (Figure A10, page 168) is to be obtained from the oscillogram; the initial values  $\Delta I'_q(0)$  and  $\Delta I''_q(0)$  and variations of transient  $\Delta I'_q$  and subtransient  $\Delta I''_q$  current components with respect to time are determined and drawn in semi-log scale (Figure A11, page 168) similarly to Figure A8, page 167).

### A34. Determination of quantities from sudden short-circuiting, running on load at low voltage, test

The quadrature-axis transient reactance (see Clause A8) is determined from the sudden short-circuit test at low voltage when the machine under load approaches an angle of 90 electrical degrees.

The quadrature-axis transient reactance (see Clause A8) may be determined from this test (see Clause A33) as:

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

A34.1 La réactance subtransitoire transversale (voir article A9) peut être déterminée au moyen de cet essai (voir article A33) comme:

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

A34.2 La constante de temps transversale en court-circuit (voir article A16), telle qu'on l'a déterminée à partir de l'essai de mise en court-circuit brusque à basse tension, la machine tournant en charge, est le temps nécessaire pour que la composante transversale du courant dans l'induit en court-circuit décroisse jusqu'à  $1/\varepsilon \approx 0,368$  fois sa valeur initiale  $\Delta I'_q(0)$ .

A34.3 La constante de temps subtransitoire transversale en court-circuit (voir article A19), déterminée à partir de l'essai de mise en court-circuit brusque à basse tension, la machine tournant en charge, est le temps nécessaire pour que la composante transversale du courant dans l'induit en court-circuit décroisse jusqu'à  $1/\varepsilon \approx 0,368$  fois sa valeur initiale  $\Delta I''_q(0)$ .

#### A35. Essai de court-circuit brusque entre deux phases

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

Les prescriptions relatives au système d'excitation et au choix des appareils de mesure doivent être conformes à celles qui sont indiquées dans l'article 40.

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

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

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

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

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

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

#### A36. Détermination de la réactance inverse à partir de l'essai de court-circuit brusque entre deux phases

La réactance inverse (voir article A10) est déterminée à partir de l'essai de court-circuit brusque entre deux phases en utilisant la formule:

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

A34.1 The quadrature-axis subtransient reactance (see Clause A9) may be determined from this test (see Clause A33) as:

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

A34.2 The quadrature-axis transient short-circuit time constant (see Clause A16), as determined from the sudden short-circuit test at low-voltage, the machine running on load, is the time required for the component of the quadrature-axis short-circuit armature current to decrease to  $1/e \approx 0.368$  of its initial value  $\Delta I'_q(0)$ .

A34.3 The quadrature-axis subtransient short-circuit time constant (see Clause A19) as determined from the sudden short-circuit test at low-voltage, the machine running on load, is the time required for the component of the quadrature-axis short-circuit armature current to decrease to  $1/e \approx 0.368$  of its initial value  $\Delta I''_q(0)$ .

#### A35. Sudden line-to-line short-circuit test

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

The requirements for the excitation system and choice of measuring instruments shall be in accordance with those stated in Clause 40.

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

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

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

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

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

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

#### A36. Determination of negative-sequence reactance from the sudden line-to-line short-circuit test

Negative-sequence reactance (see Clause A10) is determined from the sudden line-to-line short-circuit test using the formula:

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

où:

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

#### A37. Essai de court-circuit triphasé brusque appliqué à la machine après déconnexion de la ligne

L'essai de court-circuit triphasé brusque pour la détermination des grandeurs des machines synchrones peut être effectué en faisant ralentir la machine essayée à condition que sa décélération soit d'au plus 0,05 fois sa vitesse assignée par seconde. Avant la séparation d'avec la ligne, la machine fonctionnant en moteur à vide est excitée jusqu'à une valeur du courant pour laquelle le facteur de puissance est égal à l'unité ou jusqu'à une valeur inférieure. Le courant et la tension d'excitation sont mesurés et enregistrés.

Après la déconnexion, le plus vite possible et pas plus tard qu'au bout de 1 s, la machine est mise en court-circuit pratiquement simultané. Les exigences générales imposées à l'équipement, aux appareils de mesure, à l'excitation et à la détermination des grandeurs sont les mêmes que celles qui sont indiquées dans l'article 40.

#### A38. Détermination des grandeurs à partir de l'essai de court-circuit triphasé brusque appliqué à la machine après déconnexion de la ligne

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

#### A39. Essai d'application d'une tension avec le rotor enlevé

L'essai est effectué en appliquant à l'induit une tension triphasée symétrique à fréquence assignée. Le rotor est enlevé. Une bobine exploratrice est placée à la surface des dents, ou suivant un diamètre légèrement inférieur à l'alésage du stator de manière à exclure les flux de fuites à travers les encoches. La longueur de cette bobine est égale à la longueur totale du circuit magnétique de l'induit; sa largeur est égale à un pas polaire. Les parties terminales sont tendues au moyen de fils vers l'axe de la machine et suivant des rayons, dans les plans des dents extrêmes du circuit magnétique, de manière à les soustraire à l'influence des flux de fuites autour des têtes de bobines de l'induit (figure A12), page 169).

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

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

#### A40. Détermination des grandeurs à partir de l'essai d'application d'une tension

La réactance de fuites (voir article A11) est déterminée à partir de l'essai d'application d'une tension en utilisant la formule suivante:

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

where:

$U$  = open-circuit line-to-line armature voltage, measured immediately before short-circuiting

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

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

#### A37. Suddenly applied short-circuit test following disconnection from line

The sudden three-phase short-circuit test for the determination of synchronous machine quantities may be conducted during retardation of the machine under test, provided its rate of deceleration is not more than 0.05 rated speed per second. Before disconnecting from the line, the machine running on no-load is excited up to the current value for which the power factor is unity, or to a lower value of current. The excitation current and voltage are measured and recorded.

As soon as possible after disconnection, but not later than one second, the machine is short-circuited practically simultaneously. General requirements for the equipment, measuring devices, excitation and determination of quantities are similar to those stated in Clause 40.

#### A38. Determination of quantities from the suddenly applied short-circuit test following disconnection from line

The determination of quantities from the suddenly applied short-circuit test is made similarly to Clause 41.

#### A39. Applied voltage test with rotor removed

The test is performed when three-phase rated frequency symmetrical voltage is applied to the armature winding, the rotor being removed. A search coil is placed over the teeth or at a diameter slightly less than the bore diameter in order to exclude cross-slot flux leakages. The length of the coil is equal to the full armature core length; the width of the coil is equal to the pole pitch. The end parts are stretched by bracing wires towards the machine axis along the radii in the planes of the end armature core teeth to remove them from the influence of the leakage fluxes around the armature end winding (Figure A12, page 169).

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

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

#### A40. Determination of quantities from the applied voltage test

Leakage reactance (see Clause A11) from the applied voltage test with rotor removed is calculated by the following formula:

$$X = X_a - X_b \Omega$$

où:

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

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

l'espace, qui est occupée normalement par le rotor.

Dans ces formules:

$U_c$  = tension de la bobine exploratrice, en volts

$I$  = courant dans l'induit, en ampères

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

$N_c$  = nombre de spires de la bobine exploratrice

$k_w$  = facteur de bobinage de l'induit

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

$$X_b = \frac{U_c}{I} \frac{N k_w}{N_c \sin \left( \frac{q'}{3q} \frac{\pi}{2} \right)} \Omega$$

où:

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

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

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

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

où:

$N$  et  $k_w$  sont comme ci-dessus

$f$  = fréquence appliquée

$p$  = nombre de paires de pôles

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

où:

$L$  = longueur totale du circuit magnétique du stator (y compris les canaux de ventilation), en centimètres

$n$  = nombre de canaux de ventilation

$d$  = longueur axiale d'un canal de ventilation, en centimètres

$\tau_p$  = pas polaire, en centimètres

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

#### A41. Essai à rotor bloqué

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

$$X = X_a - X_b \Omega$$

where:

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

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

In these formulae:

$U_c$  = search coil voltage, in volts

$I$  = armature current, in amperes

$N$  = number of series-connected turns per circuit of a phase of the armature winding

$N_c$  = number of search coil turns

$k_w$  = armature winding factor

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

$$X_b = \frac{U_c}{I} \frac{Nk_w}{N_c \sin \left( \frac{q'}{3q} \frac{\pi}{2} \right)} \Omega$$

where:

$q'$  = the greatest whole number of slots per pole pitch

$q$  = the fractional number of slots per pole pitch and phase

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

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

where:

$N$  and  $k_w$  are as above

$f$  = applied frequency

$p$  = number of pole pairs

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

where:

$L$  = overall length of stator core (including ventilating ducts), in centimetres

$n$  = number of ventilating ducts

$d$  = axial length of ventilating ducts, in centimetres

$\tau_p$  = pole pitch, in centimetres.

The test method of determining  $X_b$  is preferred.

#### A41. Locked rotor test

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

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

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

La durée d'application de la tension est limitée par le temps nécessaire pour procéder aux lectures et par l'échauffement des parties du rotor; généralement, elle est inférieure à 10 s.

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

#### A42. Détermination de l'impédance de démarrage initiale au moyen de l'essai à rotor bloqué

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

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

où:

$U$  = tension entre deux phases, en volts

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

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

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

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

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

#### A43. Essai d'application brusque de l'excitation avec l'enroulement d'induit à circuit ouvert

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

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

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

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

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

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

#### A42. Determination of initial starting impedance from the locked rotor test

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

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

where:

$U$  = applied line to line voltage, in volts

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

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

If the power input is measured, then the initial starting resistance and reactance can be determined as:

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

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

#### A43. Suddenly applied excitation test with armature winding open-circuited

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

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

L'essai est considéré comme satisfaisant si la tension de l'excitatrice reste pratiquement constante pendant l'essai. La différence entre la tension d'induit en régime établi et la tension déterminée par l'enveloppe de la tension d'induit croissante est reportée en fonction du temps sur un diagramme à échelle semi-logarithmique, puis extrapolée jusqu'à l'instant de fermeture de l'interrupteur du circuit d'excitation (figure A13, page 169). L'extrapolation de la partie rectiligne de cette courbe jusqu'à l'axe des ordonnées donne la valeur initiale de la composante transitoire  $\Delta U'(0)$ .

*Note.* — Pour les grosses machines, la tension résiduelle peut être généralement négligée.

**A44. Détermination de  $\tau'_{do}$  à partir de l'essai d'application brusque de l'excitation avec l'enroulement d'induit à circuit ouvert**

La constante de temps transitoire longitudinale à circuit ouvert (voir article A13) est déterminée à partir de l'essai d'application brusque de l'excitation avec l'induit à circuit ouvert comme étant égale au temps nécessaire pour que la composante transitoire de tension  $\Delta U'(0)$  décroisse jusqu'à  $1/e \approx 0,368$  fois sa valeur initiale.

**A45. Essai d'application brusque de l'excitation avec l'enroulement d'induit en court-circuit**

L'essai d'application brusque de l'excitation avec l'enroulement d'induit en court-circuit est effectué sur la machine tournant à sa vitesse assignée avec son enroulement d'excitation initialement à circuit ouvert. Les conditions à remplir par la source d'excitation sont données dans l'article A43. La machine est excitée à partir de sa propre excitatrice qui doit être excitée séparément. L'excitation peut être encore fournie par une autre source.

La tension de l'excitation est réglée à une valeur correspondant à un courant de court-circuit égal au courant assigné de la machine essayée. L'enroulement d'excitation de la machine essayée est relié brusquement à l'excitatrice. On enregistre à l'oscillographe le courant dans l'induit, le courant d'excitation et la tension de l'excitatrice. L'essai est considéré comme satisfaisant si la tension de l'excitatrice reste pratiquement constante pendant l'essai. La différence entre le courant d'induit en régime établi et l'enveloppe du courant d'induit croissant est reportée en fonction du temps sur un diagramme à échelle semi-logarithmique, puis extrapolée jusqu'à l'instant de fermeture de l'interrupteur du circuit d'excitation (figure A14, page 170). L'extrapolation de la partie rectiligne de la courbe jusqu'à l'axe des ordonnées donne la valeur initiale de la composante transitoire  $\Delta I'_d(0)$ . Le courant initial dû au flux résiduel est négligé.

**A46. Détermination de  $\tau'_d$  à partir de l'essai d'application brusque de l'excitation avec l'enroulement d'induit en court-circuit**

La constante de temps transitoire longitudinale en court-circuit (voir article A14) est déterminée à partir de l'essai d'application brusque de l'excitation avec l'induit en court-circuit comme étant égale au temps nécessaire pour que la composante transitoire du courant d'induit  $\Delta I'_d(0)$  décroisse jusqu'à  $1/e \approx 0,368$  fois sa valeur initiale.

**A47. Essai de rétablissement de la tension**

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

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

The test is considered satisfactory, if the exciter voltage remains substantially constant during the test. The difference between the sustained armature voltage and the voltage determined by the envelope of the rising armature voltage is plotted on a semi-logarithmic scale against time, and then extrapolated to the instant of the exciter connection switch closure (Figure A13, page 169). The extrapolation of the straight portion of this curve to the ordinate axis gives the initial value of the transient component  $\Delta U'(0)$ .

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

**A44. Determination of  $\tau'_{do}$  from the suddenly applied excitation test with armature winding open-circuited**

The direct-axis transient open-circuit time constant (see Clause A13) from the suddenly applied excitation test with open-circuit armature winding is determined as the time required for the transient voltage component  $\Delta U'(0)$  decrease to  $1/e \approx 0.368$  of its initial value.

**A45. Suddenly applied excitation test with armature winding short-circuited**

The suddenly applied excitation test with armature winding short-circuited is performed on a machine running at rated speed with the excitation winding initially open-circuited. The requirements for the excitation source are as stated in Clause A43. Excitation of the machine is provided from its own exciter which must be separately excited. Excitation may be provided from another source.

The exciter voltage is set at a value corresponding to the rated short-circuit current of the machine under test. The excitation winding of the machine under test is suddenly connected to the exciter. An oscillographic recording of armature winding current, excitation current and exciter voltage is made. The test is considered satisfactory if the exciter voltage remains substantially constant during the test. The difference between the sustained armature current and the current determined by the envelope of the rising armature current is plotted on a semi-logarithmic scale against time and then extrapolated to the instant of switching off the exciter (Figure 14, page 170). The extrapolation of the straight portion of the curve to the ordinate axis gives the initial value of the transient component  $\Delta I'_d(0)$ . The initial current due to residual flux can usually be neglected.

**A46. Determination of  $\tau'_d$  from suddenly applied excitation test with armature winding short-circuited**

The direct-axis transient short-circuit time constant (see Clause A14) from the suddenly applied excitation test with a short-circuited armature winding is determined as the time required for the transient armature current component  $\Delta I'_d(0)$  to decrease to  $1/e \approx 0.368$  of its initial value.

**A47. Voltage recovery test**

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

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

#### A48. Détermination des grandeurs à partir de l'essai de rétablissement de la tension

La réactance transitoire longitudinale (voir article A7), la réactance subtransitoire longitudinale (voir article 8) et la constante de temps transitoire longitudinale à circuit ouvert (voir article A13) sont déterminées conformément à l'article 43 et aux paragraphes 43.1 et 43.2.

- A48.1 La constante de temps subtransitoire longitudinale à circuit ouvert (voir article A17) est déterminée à partir de l'essai de rétablissement de la tension comme étant le temps nécessaire pour que la composante subtransitoire de la tension  $\Delta U''$ , déterminée conformément à l'article 42, décroisse jusqu'à  $1/\varepsilon \approx 0,368$  fois sa valeur initiale.

#### A49. Essai d'extinction du champ avec l'enroulement d'induit à circuit ouvert

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

Une tension d'induit entre deux phases et le courant d'excitation sont mesurés et enregistrés à l'oscillographe. La tension d'induit est reportée en fonction du temps en coordonnées semi-logarithmiques avec la tension d'induit sur l'échelle logarithmique. Si la tension résiduelle de la machine est supérieure à 0,03 fois la tension appliquée, c'est la différence entre la tension d'induit mesurée et la tension résiduelle qui est reportée. Le courant d'excitation, fourni par l'oscillogramme, est également reporté en coordonnées semi-logarithmiques de manière à déterminer la valeur transitoire initiale du courant  $\Delta i_f''(0)$  dans l'enroulement d'excitation, en extrapolant la partie rectiligne de la courbe de décroissance du courant d'excitation jusqu'à l'axe des ordonnées (figure A15, page 170). La différence entre le courant fourni par l'oscillogramme et la composante transitoire du courant donne la composante subtransitoire ( $\Delta i_f''$ ). Cette composante de courant est reportée séparément en coordonnées semi-logarithmiques de manière à obtenir sa valeur initiale  $\Delta i_f''(0)$ .

Si le graphique représentant la variation de  $\Delta i_f''$  en fonction du temps est incurvé, l'amplitude initiale  $\Delta i_f''(0)$  est déterminée conformément à la figure 10, page 54.

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

#### A50. Détermination des grandeurs à partir de l'essai d'extinction du champ avec l'enroulement d'induit à circuit ouvert

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

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

- A50.1 La constante de temps subtransitoire  $\tau_{do}''$  s'obtient à partir du diagramme de la composante subtransitoire du courant d'excitation  $\Delta i_f''$  (voir article A49), comme étant le temps nécessaire pour que cette composante de courant décroisse jusqu'à  $1/\varepsilon \approx 0,368$  fois sa valeur initiale.

Une constante de temps similaire  $\tau_{dor}''$  est obtenue à partir d'un essai d'extinction du champ avec une résistance de décharge en série avec l'enroulement d'extinction.

**A48. Determination of quantities from the voltage recovery test**

Direct-axis transient reactance (see Clause A7), direct-axis subtransient reactance (see Clause 8) and direct-axis transient open-circuit time constant (see Clause A13) are determined in accordance with Clause 43 and Sub-clauses 43.1 and 43.2.

A48.1 The direct-axis open-circuit subtransient time constant (see Clause A17) is determined from the voltage recovery test as the time required for the sub-transient component  $\Delta U''$  determined in accordance with Clause 42, to decrease to  $1/e \approx 0.368$  of its initial value.

**A49. Field extinguishing test with armature winding open-circuited**

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

Line-to-line armature winding voltage and excitation current are to be measured and recorded on an oscillograph. The armature voltage is plotted against time on a semi-logarithmic scale with the armature voltage on the logarithmic scale. If the residual voltage of the machine is above 0.03 of applied value, then the difference of the measured armature voltage and of the residual voltage is plotted. The excitation current, obtained from the oscillogram, is also plotted on paper in a semi-logarithmic scale in order to determine the initial transient value of the current  $\Delta i_f'(0)$  in the excitation winding as the straight portion of the excitation current decay curve extrapolated to the ordinate axis (Figure A15, page 170). The difference between the current obtained from the oscillograph and the component of transient current gives the subtransient current ( $\Delta i_f''$ ). This current component is plotted separately on a semi-logarithmic scale so as to obtain its initial value  $\Delta i_f''(0)$ .

If the diagram representing deviation  $\Delta i_f''$  against time is incurved, the initial amplitude of  $\Delta i_f''(0)$  is determined in accordance with Figure 10, page 55.

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

**A50. Determination of quantities from the field extinguishing test with armature winding open-circuited**

From the test with short-circuited excitation winding, the transient open-circuited time constant  $\tau_{do}'$  is determined in a similar way to that given in Clause 59, as the time required for the armature winding voltage to decrease to  $1/e \approx 0.368$  of its initial value.

Similarly the time constant  $\tau_{dor}'$  is obtained from the field extinguishing test with a discharge resistor connected in series with the excitation winding.

A50.1 The subtransient time constant  $\tau_{do}''$  is obtained from the curve of the subtransient component of the excitation current  $\Delta i_f''$  (see Clause A49), as the time required for this component current to decrease to  $1/e \approx 0.368$  of its initial value.

Similarly, the time constant  $\tau_{dor}''$  is obtained from the field extinguishing test with a discharge resistor connected in series with the excitation winding.

A50.2 En utilisant ces valeurs de constantes de temps, on peut calculer la constante de temps longitudinale à circuit ouvert de l'enroulement d'excitation ( $\tau_{fdo}$ ) et la constante de temps longitudinale à circuit ouvert du circuit amortisseur équivalent ( $\tau_{kdo}$ ) en utilisant les formules suivantes:

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

où:

$$a = \frac{R_{dr}}{R_f} = \frac{\text{résistance de décharge en courant continu}}{\text{résistance en courant continu de l'enroulement d'excitation}}$$

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

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

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

A50.3 La constante de temps de l'enroulement d'excitation avec l'induit à circuit ouvert ( $\tau_{fdo}$ ) et la constante de temps du circuit amortisseur équivalent ( $\tau_{kdo}$ ) peuvent aussi être obtenues au moyen de l'essai d'extinction du champ avec l'enroulement d'excitation court-circuité.

Dans ce cas,  $\tau'_{do}$  et  $\tau''_{do}$  sont obtenus comme dans l'article A50. En examinant le rapport des composantes initiales du courant d'excitation  $\Delta i'_f(0)$  et  $\Delta i''_f(0)$  définies dans l'article A49, on a alors:

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

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

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

A50.4 La constante de temps longitudinale à circuit ouvert de l'enroulement amortisseur équivalent ( $\tau_{kdo}$ ) peut être déterminée directement à partir de l'essai décrit dans l'article A49, mais en ouvrant brusquement l'enroulement d'excitation sans résistance de décharge au lieu de le court-circuiter. Dans ce cas,  $\tau_{kdo}$  pourra être déterminé comme étant le temps nécessaire pour que la tension d'induit décroisse jusqu'à  $1/e \approx 0,368$  fois sa valeur initiale.

A50.2 Using these test values of time constants, the direct-axis open-circuited excitation winding time constant ( $\tau_{fdo}$ ) and direct-axis open-circuit equivalent damper winding time constant ( $\tau_{kdo}$ ) are calculated:

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

where:

$$a = \frac{R_{dr}}{R_f} = \frac{\text{discharge d.c. resistance}}{\text{excitation winding d.c. resistance}}$$

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

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

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

A50.3 Excitation winding time constant at open-circuited armature winding ( $\tau_{fdo}$ ) and equivalent damper winding time constant ( $\tau_{kdo}$ ) may also be obtained from the field extinguishing test with the excitation winding short-circuited.

In this case,  $\tau'_{do}$  and  $\tau''_{do}$  are obtained as in Clause A50. Using the ratio of the initial excitation current components  $\Delta i'_f(0)$  and  $\Delta i''_f(0)$  as determined in Clause A49, then:

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

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

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

A50.4 The direct-axis open-circuit equivalent damper winding time constant ( $\tau_{kdo}$ ) may be determined directly from the test described in Clause A49, performing the test by opening the excitation winding circuit without discharge resistance. In this case,  $\tau_{kdo}$  will be determined as the time required for the armature winding voltage to decrease to  $1/e \approx 0.368$  of its initial value.

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

#### A51. Essai d'extinction du champ avec l'enroulement d'induit en court-circuit

La manière de procéder à cet essai est analogue à celle décrite dans l'article 60. Cet essai particulier avec l'enroulement en court-circuit est exécuté deux fois: d'abord en court-circuitant l'enroulement d'excitation, puis en utilisant une résistance de décharge dont la valeur doit être de  $3R_f$  à  $10R_f$  en série avec l'enroulement d'excitation. Le courant dans une phase de l'induit et le courant d'excitation sont enregistrés à l'oscillographe.

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

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

#### A52. Détermination des grandeurs à partir de l'essai d'extinction du champ avec l'enroulement d'induit en court-circuit

La constante de temps longitudinale de l'enroulement d'excitation avec l'enroulement d'induit en court-circuit  $\tau_{fd}$  et la constante de temps de l'amortisseur  $\tau_{kd}$  sont calculées de manière analogue à celle de l'article A50. Dans ce cas, les indices zéro doivent être supprimés.

A52.1 Les constantes de temps de l'enroulement d'excitation et de l'amortisseur avec l'enroulement d'induit en court-circuit peuvent être obtenues à partir d'un essai d'extinction du champ avec l'enroulement d'excitation mis en court-circuit. Dans ce cas,  $\tau_d'$  et  $\tau_d''$  sont obtenus comme dans l'article A50. Ensuite, connaissant le rapport des valeurs initiales de  $\Delta i_f'(0)$  et de  $\Delta i_f''(0)$  (voir article A51), les constantes de temps cherchées sont calculées de la même manière que dans l'article A50. Dans ce cas, les indices zéro doivent être supprimés.

A52.2 La constante de temps longitudinale en court-circuit de l'enroulement amortisseur équivalent ( $\tau_{kd}$ ) peut être déterminée directement à partir de l'essai décrit dans l'article A51, mais en ouvrant brusquement l'enroulement d'excitation sans résistance de décharge au lieu de le court-circuiter. La valeur de  $\tau_{kd}$  sera alors obtenue comme étant le temps nécessaire pour que le courant d'induit décroisse jusqu'à  $1/e \approx 0,368$  fois sa valeur initiale.

Les conditions à respecter pour éviter l'endommagement de l'isolement d'excitation sont similaires à celles qui sont spécifiées au paragraphe A50.4.

#### A53. Essai de fonctionnement en asynchrone en charge

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

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

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

#### A51. Field extinguishing test with armature winding short-circuited

The procedure for making this test is similar to that described in Clause 60. This particular test with the armature winding short-circuited is conducted twice: first, short-circuiting the excitation winding and second, using a field discharge resistor with a value of between  $3R_f$  and  $10R_f$  in series with the excitation winding. Armature current in one phase and excitation current are recorded on an oscillograph.

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

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

#### A52. Determination of quantities from the field extinguishing test with armature winding short-circuited

The direct-axis time constant of the excitation winding with short-circuited armature  $\tau_{fd}$  and the damper winding time constant  $\tau_{kd}$  are calculated in a similar way to that shown in Clause A50. In this case, zero indices should be deleted.

A52.1 The excitation winding and the damper winding time constants with armature winding short-circuited may also be obtained from the field extinguishing test with excitation winding short-circuited. In this case  $\tau_d'$  and  $\tau_d''$  are obtained as in Clause A50. Then, knowing the ratio of the initial  $\Delta i_f'(0)$  and  $\Delta i_f''(0)$  values (see Clause A51), the required time constants are calculated in accordance with Clause A50. In this case, zero indices should be deleted.

A52.2 The direct-axis short-circuit equivalent damper winding time constant ( $\tau_{kd}$ ) may be determined directly from the test described in Clause A51, performing it by opening the excitation winding circuit without discharge resistance. In this case,  $\tau_{kd}$  will be determined as the time required for the armature winding current to decrease to  $1/e \approx 0.368$  of its initial value.

Conditions of test to prevent possible damage to the excitation winding insulation are similar to those stated in Sub-clause A50.4.

#### A53. Asynchronous operation on-load test

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

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

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

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

En passant d'une charge à l'autre, il convient de rétablir l'excitation, si la durée de l'essai est supérieure à 3 à 5 min. La tension entre les deux phases, le courant en ligne, la puissance active et réactive, la tension ou le courant dans l'enroulement d'excitation, suivant le cas, sont mesurés et enregistrés. Il est recommandé, en complément, d'enregistrer le signal de positionnement de l'arbre dans la position de l'axe transversal.

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

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

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

où:

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

$f$  = fréquence assignée

#### A54. Détermination des caractéristiques de réponse en fréquence et des grandeurs à partir de l'essai de fonctionnement en asynchrone en charge

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

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

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

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

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

Les valeurs obtenues sont ensuite reportées en fonction du glissement en vue d'obtenir la caractéristique de réponse en fréquence aux basses fréquences (voir article A24).

- A54.1 La caractéristique du couple en fonction du glissement peut être obtenue à partir du même essai. La puissance et le courant sont alors ramenés approximativement à la tension assignée en multipliant la puissance mesurée par  $\left(\frac{U_n}{U}\right)^2$  et le courant mesuré par  $\frac{U_n}{U}$  où  $U_n$  et  $U$  désignent

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

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

In changing from one load value to another, excitation should be readjusted if the duration of the test is greater than 3 min to 5 min. Line-to-line voltage, line current, active and reactive power and excitation winding voltage or current (as the case may be) are measured and recorded. In addition, it is recommended to record the shaft positioning signal referred to the d- or q-axis.

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

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

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

where:

$T$  = periodic time of induced excitation voltage or current swings or two periodic times of armature current swings

$f$  = nominal frequency

#### A54. Determination of frequency response characteristics and quantities from the asynchronous operation on-load test

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

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

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

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

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

Then the values obtained are plotted against slip to obtain the frequency response characteristics at low frequencies (see Clause A24).

A54.1 From the same test, the torque slip characteristic may be obtained. In this case, power and current are referred approximately to rated voltage by multiplying measured power by  $\left(\frac{U_n}{U}\right)^2$  and measured current by  $\frac{U_n}{U}$  where  $U_n$  is the rated voltage and  $U$  the measured voltage. Then,

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

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

#### A55. Essai de fonctionnement en asynchrone à basse tension

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

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

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

Les valeurs moyennes de la puissance et du courant correspondant à la période d'oscillation sont tracées en fonction du glissement (voir Figure A16, page 171).

#### A56. Détermination des caractéristiques de réponse en fréquence et des grandeurs à partir de l'essai de fonctionnement en asynchrone à basse tension

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

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

Les valeurs obtenues sont ensuite reportées en fonction du glissement en vue d'obtenir la caractéristique de réponse en fréquence aux basses fréquences (voir article A24).

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

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

Les valeurs de l'impédance moyenne pour chaque glissement sont reportées à la figure A17, page 171. Il est utile d'avoir sur le même diagramme les valeurs du facteur de puissance en fonction du glissement.

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

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

#### A55. Asynchronous operation during the low-voltage test

The test is performed with a reduced symmetrical voltage ( $0.01 U_n$  to  $0.2 U_n$ ) at rated frequency applied to the machine under test, from an external source.

The excitation winding is short-circuited. If the residual voltage of the machine exceeds 0.3 of the applied voltage, the rotor should be demagnetized before testing the machine. Line-to-line voltage, line current and the input power are measured and recorded during the test. In making calculations, average values of these quantities during the full swing period are considered.

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

Average values for the swing period of power and current are plotted against slip (see Figure A16, page 171).

#### A56. Determination of the frequency response characteristics and quantities from the asynchronous low-voltage operation test

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

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

Then the values obtained are plotted against slip to obtain the frequency response characteristics at low frequencies (see Clause A24).

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

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

Values of average impedance for each slip are plotted in Figure A17, page 171. It is helpful to have plotted on the same diagram values of power factor against slip.

#### A57. Essai d'application à l'arrêt d'une tension de fréquence variable

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

L'enroulement d'excitation est mis en court-circuit. La troisième borne de l'induit peut être laissée ouverte ou reliée comme sur la figure A18, page 172, où les connexions essentielles sont représentées.

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

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

La tension d'alimentation, le courant d'induit et leur déphasage mutuel sont mesurés et enregistrés à l'oscillographe (figure A19, page 172). Un shunt ordinaire à courant continu peut être utilisé pour la mesure du courant dans l'induit. Le courant dans l'enroulement d'excitation est enregistré seulement dans le but d'évaluer la position du rotor. Le déphasage peut être aussi mesuré par toute autre méthode assurant une bonne précision. Certaines précautions doivent être prises pour l'exécution de l'essai. Celui-ci peut être effectué soit avec des courants relativement élevés (0,3 à 0,5 fois le courant d'induit assigné), soit avec de faibles courants dans l'induit (0,05 à 0,1 fois la valeur assignée) et un flux magnétique supplémentaire produit par un courant continu dans le même induit superposé au courant de faible fréquence de telle sorte que la crête du courant alternatif soit, à toutes les fréquences, presque égale à la valeur du courant continu, tout en lui restant légèrement inférieure.

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

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

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

#### 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

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

**A57. Applied variable frequency voltage test at standstill**

To perform this test, voltage at various frequencies is applied to a pair of line terminals of the armature winding. The machine is at standstill. The test may be performed with the excitation winding open-circuited.

The excitation winding is short-circuited. The third terminal or the armature winding may remain open or connected as shown on Figure A18, page 172, where principal connections are shown.

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

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

Supply voltage, armature winding current and phase angle between them are measured and recorded by an oscillograph (Figure A19, page 172). An ordinary d.c. shunt may be used for recording armature current. Excitation winding current is recorded only for the purpose of the rotor position evaluation. The phase angle may also be measured by some other method with adequate precision. Certain precautions must be taken during the test. It may be performed either at comparatively high currents (0.3 to 0.5 of the rated armature value) or at small armature currents (0.05 to 0.1 of the rated value) and additional magnetic flux produced by d.c. current in the same armature winding superimposed on low-frequency current in such a way that the peak value of a.c. current is below the value of direct current. At all frequencies, the values of alternating and direct current should be about the same.

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

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

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

**A58. Determination of the frequency response characteristics and quantities from the applied variable frequency voltage test at standstill**

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

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

où:

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

$U$  = tension appliquée au glissement  $s$ , en volts

$I$  = courant mesuré, en ampères

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

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

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

où:

$Z_{\text{stat}}(js)$  = comme ci-dessus

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

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

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

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

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

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

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

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

Cet essai fournit des valeurs non saturées des grandeurs.

- A58.1 Les caractéristiques de réponse en fréquence de la machine sont représentées par les courbes des grandeurs obtenues en fonction du glissement pour chacun des axes.
- A58.2 Les grandeurs des machines synchrones (réactances, résistances et constantes de temps) peuvent être obtenues en se servant des caractéristiques de réponse en fréquence. Les réactances et les résistances au glissement égal à l'unité sont approximativement égales aux valeurs subtransitoires. Les réactances et les résistances extrapolées au glissement nul représentent les valeurs synchrones.

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

where:

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

$U$  = applied voltage in volts at slip  $s$

$I$  = measured current, in amperes

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

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

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

where:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Unsaturated quantities are obtained from this test.

A58.1 The frequency response characteristic of the machine is represented by curves of the obtained quantities as functions of slip for each of the axes.

A58.2 Quantities of synchronous machines (reactances, resistances and time constants) may be obtained, using frequency response characteristics. Reactances and resistances at unity slip are approximately equal to subtransient values. Reactances and resistances extrapolated to zero slip represent synchronous values.

#### A59. Essai de décroissance d'un courant continu dans l'enroulement d'induit à l'arrêt

L'essai de décroissance d'un courant continu dans l'induit est exécuté à l'arrêt. Une tension continue est appliquée à l'enroulement d'induit (entre deux bornes avec la troisième libre, ou deux phases en parallèle entre elles en série avec la troisième), par l'intermédiaire d'une résistance (figure A20, page 173). Lorsqu'on ferme le contacteur  $K$ , l'enroulement est mis en court-circuit et le courant qui y circulait décroît. Le processus entier de décroissance du courant est enregistré.

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

L'essai est effectué avec le rotor orienté d'abord selon l'axe longitudinal, puis selon l'axe transversal (voir article A57) après une magnétisation préalable du circuit magnétique de la machine, obtenue en faisant passer à travers l'induit un courant continu suffisant pour produire la saturation. Une démagnétisation graduelle est ensuite entreprise en descendant jusqu'à la valeur du courant d'essai, et la source est mise en court-circuit ou hors circuit après la fermeture du contacteur  $K$ .

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Les valeurs initiales transitoires et subtransitoires et leurs constantes de temps sont obtenues à partir d'un diagramme en coordonnées semi-logarithmiques des courants décroissants. Pour ce faire, on trace et on prolonge vers l'origine une droite joignant deux points de la courbe dans sa

**A59. D.C. decay in the armature winding at standstill test**

The d.c. decay in the armature winding test is performed at standstill. D.C. voltage is applied to the armature winding (two terminals with the third one open, or two phases in parallel with the third in series with them) through a resistance (Figure A20, page 173). When contactor *K* is closed, the winding is short-circuited and the current in the armature winding decays. The whole process of current decay is recorded.

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

The test is performed with the rotor placed along the direct and then the quadrature axis (see Clause A57), after preliminary magnetization of the machine magnetic system by passing through the armature (primary) winding, a d.c. current that will produce saturation. Following this, gradual demagnetization is carried out down to the test current value, and short-circuited or disconnected after closing contactor *K*.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

From a semi-logarithmic plot of the decay currents, transient and sub-transient initial values and their time constants are found. To do so, a straight line is drawn through the points of extremity (Figure A21a, page 173). Intersection of this straight line with the ordinate axis gives the initial

partie la plus éloignée (figure A21a, page 173). L'intersection de cette droite avec l'axe des ordonnées donne l'amplitude initiale de la première exponentielle ( $i_{10}$ ). Sa constante de temps ( $\tau_1$ ) est la plus élevée et sa valeur est égale au temps nécessaire pour que  $i_{10}$  décroisse jusqu'à  $1/e \approx 0,368$  fois sa valeur initiale.

La différence entre la courbe initiale et la première exponentielle est reportée de nouveau en échelle semi-logarithmique, ce qui permet de déterminer l'amplitude initiale ( $i_{20}$ ) et la constante de temps ( $\tau_2$ ) de la deuxième exponentielle (figure A21b, page 173).

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

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

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

où  $\tau(0)$  est la constante équivalente de temps de la courbe expérimentale du courant décroissant dans l'induit à l'instant initial (voir figure A21a).

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

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

#### 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

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

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

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

où:

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

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

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

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

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