

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC
909**

Première édition
First edition
1988

**Calcul des courants de court-circuit
dans les réseaux triphasés
à courant alternatif**

**Short-circuit current calculation
in three-phase a.c. systems**

La Publication CEI 909 a fait l'objet d'un programme
de calcul informatisé qui peut être obtenu auprès de
l'UTE à l'adresse ci-dessous:

A computer program has been devised for use
with IEC 909. It can be obtained from the UTE at
the following address:

UTE, Cedex 64, 92052 PARIS, LA DEFENSE, FRANCE



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 909: 1988

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
909

Première édition
First edition
1988

**Calcul des courants de court-circuit
dans les réseaux triphasés
à courant alternatif**

**Short-circuit current calculation
in three-phase a.c. systems**

© CEI 1988 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. | 4 |
| PRÉFACE | 4 |
| Articles | |
| 1. Domaine d'application | 6 |
| 2. Objet | 6 |
| 3. Définitions | 8 |
| 4. Symboles et indices | 14 |
| 4.1 Symboles | 14 |
| 4.2 Indices inférieurs | 16 |
| 4.3 Indices supérieurs | 16 |
| 5. Hypothèses de calcul. | 18 |
| 6. Source de tension équivalente au point de court-circuit. | 20 |
| SECTION UN – RÉSEAUX DANS LESQUELS LES COURANTS DE COURT-CIRCUIT N'ONT PAS DE COMPOSANTE ALTERNATIVE DÉCROISSANTE (COURTS-CIRCUITS ÉLOIGNÉS DES ALTERNATEURS) | |
| 7. Généralités | 28 |
| 8. Paramètres de court-circuit | 28 |
| 8.1 Court-circuit symétrique | 28 |
| 8.2 Court-circuit dissymétrique | 28 |
| 8.3 Impédance de court-circuit | 30 |
| 8.4 Conversion des impédances, courants et tensions | 44 |
| 9. Calcul des courants de court-circuit | 44 |
| 9.1 Méthode de calcul des courts-circuits symétriques | 44 |
| 9.2 Méthode de calcul des courts-circuits biphasés et monophasés | 52 |
| 9.3 Courants de court-circuit minimaux | 58 |
| SECTION DEUX – RÉSEAUX DANS LESQUELS LES COURANTS DE COURT-CIRCUIT ONT DES COMPOSANTES ALTERNATIVES DÉCROISSANTES (COURTS-CIRCUITS PROCHES DES ALTERNATEURS) | |
| 10. Généralités | 60 |
| 11. Paramètres de court-circuit | 60 |
| 11.1 Généralités | 60 |
| 11.2 Court-circuit symétrique | 64 |
| 11.3 Court-circuit dissymétrique | 64 |
| 11.4 Source de tension équivalente au point de défaut | 66 |
| 11.5 Impédances de court-circuit | 66 |
| 11.6 Conversion des impédances, courants et tensions. | 74 |
| 12. Calcul des courants de court-circuit | 74 |
| 12.1 Généralités | 74 |
| 12.2 Méthode de calcul des courts-circuits symétriques | 74 |
| 12.3 Méthode de calcul des courts-circuits biphasés et phase-terre. | 96 |
| 12.4 Courant de court-circuit minimal. | 96 |
| 13. Contributions des moteurs. | 98 |
| 13.1 Moteurs et compensateurs synchrones | 98 |
| 13.2 Moteurs asynchrones. | 98 |
| 13.3 Moteurs à convertisseur statique | 106 |
| 14. Considération des charges non tournantes et des capacités | 106 |
| 14.1 Capacités en parallèle | 106 |
| 14.2 Capacités en série | 106 |
| ANNEXE A – Calcul des courants de court-circuit, exemples | 108 |

CONTENTS

| | Page |
|---|------|
| FOREWORD | 5 |
| PREFACE | 5 |
| Clause | |
| 1. Scope | 7 |
| 2. Object | 7 |
| 3. Definitions | 9 |
| 4. Symbols, subscripts and superscripts | 15 |
| 4.1 Symbols | 15 |
| 4.2 Subscripts | 17 |
| 4.3 Superscripts | 17 |
| 5. Calculation assumptions | 19 |
| 6. Equivalent voltage source at the short-circuit location | 21 |
| SECTION ONE – SYSTEMS WITH SHORT-CIRCUIT CURRENTS HAVING NO A.C. COMPONENT DECAY (FAR-FROM-GENERATOR SHORT CIRCUITS) | |
| 7. General | 29 |
| 8. Short-circuit parameters | 29 |
| 8.1 Balanced short circuit | 29 |
| 8.2 Unbalanced short circuit | 29 |
| 8.3 Short-circuit impedances | 31 |
| 8.4 Conversion of impedances, currents and voltages | 45 |
| 9. Calculation of short-circuit currents | 45 |
| 9.1 Calculation method for balanced short circuits | 45 |
| 9.2 Calculation method for line-to-line and line-to-earth short circuits | 53 |
| 9.3 The minimum short-circuit currents | 59 |
| SECTION TWO – SYSTEMS WITH SHORT-CIRCUIT CURRENTS HAVING DECAYING A.C. COMPONENTS (NEAR-TO-GENERATOR SHORT CIRCUITS) | |
| 10. General | 61 |
| 11. Short-circuit parameters | 61 |
| 11.1 General | 61 |
| 11.2 Balanced short circuit | 65 |
| 11.3 Unbalanced short circuit | 65 |
| 11.4 Equivalent voltage source at the short-circuit location | 67 |
| 11.5 Short-circuit impedances | 67 |
| 11.6 Conversion of impedances, currents and voltages | 75 |
| 12. Calculation of short-circuit currents | 75 |
| 12.1 General | 75 |
| 12.2 Calculation method for balanced short circuits | 75 |
| 12.3 Calculation method for line-to-line and line-to-earth short circuits | 97 |
| 12.4 The minimum short-circuit currents | 97 |
| 13. Influence of motors | 99 |
| 13.1 Synchronous motors and synchronous compensators | 99 |
| 13.2 Asynchronous motors | 99 |
| 13.3 Static converter fed drives | 107 |
| 14. Consideration of non-rotating loads and capacitors | 107 |
| 14.1 Parallel capacitors | 107 |
| 14.2 Series capacitors | 107 |
| APPENDIX A – Calculation of short-circuit currents, examples | 109 |

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**CALCUL DES COURANTS DE COURT-CIRCUIT
DANS LES RÉSEAUX TRIPHASÉS À COURANT ALTERNATIF**

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 Comité d'Etudes n° 73 de la CEI: Courants de court-circuit.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

| Règle des Six Mois | Rapport de vote |
|--------------------|-----------------|
| 73(BC)5 | 73(BC)7 |

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

Les publications suivantes de la CEI sont citées dans la présente norme:

- Publications n° 38 (1983): Tensions normales de la CEI.
50: Vocabulaire Electrotechnique International (VEI).
50 (131) (1978): Chapitre 131: Circuits électriques et magnétiques.
50 (151) (1978): Chapitre 151: Dispositifs électriques et magnétiques.
50 (441) (1984): Chapitre 441: Appareillage et fusibles.
865 (1986): Calcul des effets des courants de court-circuit.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**SHORT-CIRCUIT CURRENT CALCULATION
IN THREE-PHASE A.C. SYSTEMS**

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 IEC Technical Committee No. 73: Short-circuit currents.

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

| Six Months' Rule | Report on Voting |
|------------------|------------------|
| 73(CO)5 | 73(CO)7 |

Full information on the voting for the approval of this standard can be found in the Voting Report indicated in the above table.

The following IEC publications are quoted in this standard:

- Publication Nos. 38 (1983): IEC standard voltages.
 50: International Electrotechnical Vocabulary (IEV).
 50 (131) (1978): Chapter 131: Electric and magnetic circuits.
 50 (151) (1978): Chapter 151: Electrical and magnetic devices.
 50 (441) (1984): Chapter 441: Switchgear, controlgear and fuses.
 865 (1986): Calculation of the effects of short-circuit currents.
-

CALCUL DES COURANTS DE COURT-CIRCUIT DANS LES RÉSEAUX TRIPHASÉS À COURANT ALTERNATIF

1. Domaine d'application

La présente norme est applicable au calcul des courants de court-circuit:

- dans les réseaux triphasés basse tension à courant alternatif,
- dans les réseaux triphasés haute tension à courant alternatif de tension nominale jusqu'à 230 kV, fonctionnant à fréquence nominale (50 Hz ou 60 Hz).

Dans la mesure du possible, cette procédure normalisée est présentée de façon à pouvoir être utilisée par des ingénieurs non spécialisés.

2. Objet

Cette norme a pour objet d'établir une procédure générale, concise et pratique, conduisant à des résultats suffisamment précis et par excès. Pour ce faire, on a défini, dans l'article 6, une source de tension équivalente au point de court-circuit. Cela n'exclut pas pour autant l'emploi de méthodes particulières, par exemple la méthode de superposition, appliquées à des cas précis, si elles conduisent à une précision au moins égale.

Les courants et impédances de court-circuit peuvent être déterminés également par des essais en réseau, par des mesures à l'analyseur de réseau ou par calculateur numérique. Dans les réseaux basse tension existants, il est possible de déterminer l'impédance de court-circuit à partir de mesures effectuées au point de court-circuit présumé.

Le calcul de l'impédance de court-circuit à partir des valeurs assignées des matériels électriques et de la configuration du réseau présente l'avantage de pouvoir s'appliquer aussi bien aux réseaux existants qu'à ceux à l'état de projet.

Les calculs doivent prendre en compte deux courants de court-circuit, d'amplitude différente:

- le courant de court-circuit maximal qui détermine la capacité ou le régime assigné du matériel électrique;
- le courant de court-circuit minimal qui peut servir, par exemple, au choix de fusibles, au calibrage des dispositifs de protection et au contrôle de la mise en marche des moteurs.

Il y a lieu de distinguer:

- les réseaux dans lesquels les courants de court-circuit n'ont pas de composante alternative amortie (courts-circuits éloignés des générateurs) qui sont traités dans la section un,
- des réseaux dans lesquels les courants de court-circuit ont des composantes alternatives amorties (courts-circuits proches des générateurs) qui sont traités dans la section deux. Cette section traite aussi de l'influence des moteurs.

Cette norme ne couvre pas les cas des courts-circuits provoqués dans des conditions déterminées (stations d'essais de court-circuit).

Elle ne traite pas des installations à bord des navires et des avions.

Pour le calcul des courants de court-circuit thermiques équivalents, on se reportera à la section deux de la Publication 865 de la CEI.

Un guide d'application traitant des réseaux triphasés à basse tension alternative non maillés et un rapport technique sur la détermination des paramètres et des divers coefficients utilisés dans cette norme sont à l'étude.

SHORT-CIRCUIT CURRENT CALCULATION IN THREE-PHASE A.C. SYSTEMS

1. Scope

This standard is applicable to the calculation of short-circuit currents:

- in low-voltage three-phase a.c. systems,
- in high-voltage three-phase a.c. systems with nominal voltages up to 230 kV operating at nominal frequency (50 Hz or 60 Hz).

This standardized procedure is given in such a form as to facilitate as far as possible its use by non-specialist engineers.

2. Object

The object of this standard is to establish a general, practicable and concise procedure leading to conservative results with sufficient accuracy. For this purpose, an equivalent voltage source at the short-circuit location is considered, as described under Clause 6. This does not exclude the use of special methods, for example the superposition method, adjusted to particular circumstances, if they give at least the same precision.

Short-circuit currents and short-circuit impedances may also be determined by system tests, by measurement on a network analyzer, or with a digital computer. In existing low-voltage systems it is possible to determine the short-circuit impedance on the basis of measurements at the location of the prospective short circuit considered.

The calculation of the short-circuit impedance based on the rated data of the electrical equipment and the topological arrangement of the system has the advantage of being possible both for existing systems and for systems at the planning stage.

There are two different short-circuit currents to be calculated which differ in their magnitude:

- the maximum short-circuit current which determines the capacity or rating of electrical equipment;
- the minimum short-circuit current which can be a basis, for example, for the selection of fuses and for the setting of protective devices and for checking the run-up of motors.

One has to distinguish between:

- systems with short-circuit currents having no a.c. component decay (far-from-generator short circuit), treated in Section One,
- systems with short-circuit currents having decaying a.c. components (near-to-generator short circuit), treated in Section Two. This section also includes the influence of motors.

This standard does not cover short-circuit currents deliberately created under controlled conditions (short-circuit testing stations).

This standard does not deal with installations on board ships and areoplanes.

For the calculation of the thermal equivalent short-circuit currents see Section Two of IEC Publication 865.

An application guide, dealing with non-meshed low-voltage three-phase a.c. systems and a technical report on the derivation of the parameters and various calculation factors of this standard are under consideration.

3. Définitions

Dans le cadre de cette norme, on utilise les définitions suivantes qui font référence au Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) [Publication 50 de la CEI] chaque fois que celui-ci peut convenir.

3.1 Court-circuit

Liaison, accidentelle ou intentionnelle, de relativement faible résistance ou impédance, entre deux ou plus de deux points d'un circuit qui sont normalement portés à des tensions différentes (VEI 151-03-41).

3.2 Courant de court-circuit

Surintensité résultant d'un court-circuit dû à un défaut ou à un branchement incorrect dans un circuit électrique (VEI 441-11-07).

Note. – Il y a lieu de distinguer entre le courant de court-circuit au point de défaut et le courant de court-circuit circulant dans les branches du réseau.

3.3 Courant de court-circuit présumé

Courant qui circulerait si le court-circuit était remplacé par une connexion idéale d'impédance négligeable, sans modification de l'alimentation.

Note. – Lors d'un court-circuit triphasé, on suppose que le courant s'établit simultanément sur les trois phases. La prise en compte de courts-circuits non simultanés, qui peuvent conduire à des composantes apériodiques du courant de court-circuit majorées, dépasse de l'objet de cette norme.

3.4 Courant de court-circuit symétrique

Valeur efficace de la composante symétrique alternative d'un courant de court-circuit présumé (voir paragraphe 3.3), la composante apériodique, éventuelle, du courant étant négligée.

3.5 Courant de court-circuit symétrique initial I_k'

Valeur efficace de la composante symétrique alternative d'un courant de court-circuit présumé (voir paragraphe 3.3) à l'instant d'apparition du court-circuit, si l'impédance conserve sa valeur initiale (voir figures 1 et 12, pages 18 et 62).

3.6 Puissance (apparente) de court-circuit symétrique initiale S_k''

Valeur fictive définie comme le produit du courant de court-circuit symétrique initial I_k' (voir paragraphe 3.5) par la tension nominale du réseau U_n (voir paragraphe 3.14) et le facteur $\sqrt{3}$:

$$S_k'' = \sqrt{3} U_n I_k'$$

3.7 Composante continue (apériodique) i_{DC} du courant de court-circuit

Valeur moyenne des enveloppes inférieure et supérieure d'un courant de court-circuit décroissant de sa valeur initiale à zéro, conformément aux figures 1 et 12.

3.8 Valeur de crête i_p du courant de court-circuit

Valeur instantanée maximale possible du courant de court-circuit présumé (voir figures 1 et 12).

Note. – L'amplitude du courant de court-circuit de crête varie avec l'instant d'apparition du court-circuit. Le calcul de la valeur de crête i_p du courant de court-circuit triphasé s'effectue pour la phase et l'instant conduisant au courant de court-circuit maximal. Les défauts répétitifs ne sont pas pris en considération. En cas de court-circuit triphasé, on suppose que le court-circuit a lieu simultanément sur toutes les phases.

3. Definitions

For the purpose of this standard, the following definitions apply. Reference is made to the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) [IEC Publication 50] when applicable.

3.1 Short circuit

The accidental or intentional connection, by a relatively low resistance or impedance, of two or more points in a circuit which are normally at different voltages (IEV 151-03-41).

3.2 Short-circuit current

An over-current resulting from a short circuit due to a fault or an incorrect connection in an electric circuit (IEV 441-11-07).

Note. – It is necessary to distinguish between the short-circuit current at the short-circuit location and in the network branches.

3.3 Prospective (available) short-circuit current

The current that would flow if the short circuit were replaced by an ideal connection of negligible impedance without any change of the supply.

Note. – The current in a three-phase short circuit is assumed to be made simultaneously in all poles. Investigations of non-simultaneous short circuits, which can lead to higher aperiodic components of short-circuit current, are beyond the scope of this standard.

3.4 Symmetrical short-circuit current

The r.m.s. value of the a.c. symmetrical component of a prospective (available) short-circuit current (see Sub-clause 3.3), the aperiodic component of current, if any, being neglected.

3.5 Initial symmetrical short-circuit current I_k'

The r.m.s. value of the a.c. symmetrical component of a prospective (available) short-circuit current (see Sub-clause 3.3) applicable at the instant of short circuit if the impedance remains at zero-time value (see Figures 1 and 12, pages 19 and 63).

3.6 Initial symmetrical short-circuit (apparent) power S_k'

The fictive value determined as a product of the initial symmetrical short-circuit current I_k' (see Sub-clause 3.5), the nominal system voltage U_n (see Sub-clause 3.14), and the factor $\sqrt{3}$:

$$S_k' = \sqrt{3} U_n I_k'$$

3.7 D.C. (aperiodic) component i_{DC} of short-circuit current

The mean value between the top and bottom envelope of a short-circuit current decaying from an initial value to zero according to Figures 1 and 12.

3.8 Peak short-circuit current i_p

The maximum possible instantaneous value of the prospective (available) short-circuit current (see Figures 1 and 12).

Note. – The magnitude of the peak short-circuit current varies in accordance with the moment at which the short circuit occurs. The calculation of the peak three-phase short-circuit current i_p applies for the phase conductor and moment at which the greatest possible short-circuit current exists. Sequential faults are not considered. For three-phase short circuits it is assumed that the short circuit occurs simultaneously in all phase conductors.

3.9 *Courant de court-circuit symétrique coupé I_b*

Valeur efficace d'un cycle complet de la composante alternative symétrique du courant de court-circuit présumé à l'instant de la séparation des contacts du premier pôle de l'appareil de manœuvre.

3.10 *Courant de court-circuit permanent I_k*

Valeur efficace du courant de court-circuit se maintenant après extinction des phénomènes transitoires (voir figures 1 et 12, pages 18 et 62).

3.11 *Courant symétrique à rotor bloqué I_{LR}*

Valeur efficace maximale du courant symétrique d'un moteur asynchrone alimenté sous sa tension assignée U_{TM} à fréquence assignée et dont le rotor est bloqué.

3.12 *Circuit électrique équivalent*

Modèle servant à décrire le comportement d'un circuit au moyen d'un réseau constitué d'éléments idéaux (VEI 131-01-33).

3.13 *Source de tension (indépendante)*

Élément actif qui peut être représenté par une source de tension idéale, indépendante des courants et tensions dans le circuit, en série avec un élément de circuit passif (VEI 131-01-37 modifié).

3.14 *Tension nominale d'un réseau U_n*

Tension (entre phases) par laquelle on désigne un réseau et à laquelle on rapporte certaines caractéristiques fonctionnelles. Les valeurs figurent dans la Publication 38 de la CEI.

3.15 *Source de tension équivalente $cU_n/\sqrt{3}$*

Tension d'une source idéale appliquée au point de court-circuit dans le système direct, permettant de calculer le courant de court-circuit comme il est indiqué dans l'article 6. Cette tension est la seule tension active du réseau.

3.16 *Facteur de tension c*

Rapport de la source de tension équivalente à la tension nominale du réseau U_n , divisé par $\sqrt{3}$. Les valeurs en sont données au tableau I.

Note. - L'introduction du facteur de tension c est nécessaire pour différentes raisons, qui sont:

- les variations de tension dans l'espace et dans le temps,
- les changements de prise des transformateurs,
- la non-prise en compte des charges et des capacités dans les calculs selon l'article 6,
- le comportement subtransitoire des alternateurs et des moteurs.

3.17 *Tension subtransitoire E'' d'une machine synchrone*

Valeur efficace de la tension symétrique interne d'une machine synchrone opérant en amont de la réactance subtransitoire X''_d lors de l'apparition d'un court-circuit.

3.18 *Court-circuit éloigné d'un alternateur*

Court-circuit pendant lequel l'amplitude de la composante alternative symétrique du courant de court-circuit présumé reste pratiquement constante (voir article 7).

3.9 *Symmetrical short-circuit breaking current I_b*

The r.m.s. value of an integral cycle of the symmetrical a.c. component of the prospective short-circuit current at the instant of contact separation of the first pole of a switching device.

3.10 *Steady-state short-circuit current I_k*

The r.m.s. value of the short-circuit current which remains after the decay of the transient phenomena (see Figures 1 and 12, pages 19 and 63).

3.11 *Symmetrical locked-rotor current I_{LR}*

The highest symmetrical r.m.s. current of an asynchronous motor with locked rotor fed with rated voltage U_{rM} at rated frequency.

3.12 *Equivalent electric circuit*

A model to describe the behaviour of a circuit by means of a network of ideal elements (IEV 131-01-33).

3.13 *(Independent) voltage source*

An active element which can be represented by an ideal voltage source independent of all currents and voltages in the circuit, in series with a passive circuit element (IEV 131-01-37).

3.14 *Nominal system voltage U_n*

Voltage (line-to-line) by which a system is designated and to which certain operating characteristics are referred. Values are given in IEC Publication 38.

3.15 *Equivalent voltage source $cU_n/\sqrt{3}$*

The voltage of an ideal source applied at the short-circuit location in the positive-sequence system for calculating the short-circuit current according to Clause 6. This is the only active voltage of the network.

3.16 *Voltage factor c*

The ratio between the equivalent voltage source and the nominal system voltage U_n divided by $\sqrt{3}$. The values are given in Table I.

Note. – The introduction of a voltage factor c is necessary for various reasons. These are:

- voltage variations depending on time and place,
- changing of transformer taps,
- neglecting loads and capacitances by calculations according to Clause 6,
- the subtransient behaviour of generators and motors.

3.17 *Subtransient voltage E'' of a synchronous machine*

The r.m.s. value of the symmetrical internal voltage of a synchronous machine which is active behind the subtransient reactance X''_d at the moment of short circuit.

3.18 *Far-from-generator short circuit*

A short circuit during which the magnitude of the symmetrical a.c. component of prospective (available) short-circuit current remains essentially constant (see Clause 7).

3.19 *Court-circuit proche d'un alternateur*

Court-circuit pour lequel la contribution d'une machine synchrone au courant de court-circuit symétrique initial présumé est plus du double du courant assigné de l'alternateur ou pour lequel la contribution de moteurs synchrones et asynchrones dépasse 5% du courant de court-circuit symétrique initial I_k' en l'absence de moteurs (voir article 10).

3.20 *Impédances de court-circuit au point de court-circuit F*

3.20.1 *Impédance de court-circuit directe $\underline{Z}_{(1)}$ d'un réseau triphasé à courant alternatif*

Impédance dans le système direct vue du point de défaut (voir paragraphe 8.3.1 et figure 4a, page 26).

3.20.2 *Impédance de court-circuit inverse $\underline{Z}_{(2)}$ d'un réseau triphasé à courant alternatif*

Impédance dans le système inverse vue du point de défaut (voir paragraphe 8.3.1 et figure 4b, page 26).

3.20.3 *Impédance de court-circuit homopolaire $\underline{Z}_{(0)}$ d'un réseau triphasé à courant alternatif*

Impédance dans le système homopolaire vue du point de défaut (voir paragraphe 8.3.1 et figure 4c, page 26). Elle comprend le triple de l'impédance de mise à la terre des neutres $3 \underline{Z}_{NE}$.

3.20.4 *Impédance de court-circuit \underline{Z}_k d'un réseau à courant alternatif triphasé*

Expression abrégée de l'impédance de court-circuit directe $\underline{Z}_{(1)}$ selon le paragraphe 3.20.1 pour le calcul des courants de court-circuit triphasé.

3.21 *Impédances de court-circuit d'un matériel électrique*

3.21.1 *Impédance de court-circuit directe $\underline{Z}_{(1)}$ d'un matériel électrique*

Rapport de la tension phase-neutre au courant de court-circuit de la phase correspondante d'un matériel électrique alimenté par un système direct symétrique de tensions (voir paragraphe 8.3.2).

Note. — L'indice du symbole $\underline{Z}_{(1)}$ peut être omis s'il n'y a pas de risque de confusion avec les impédances de court-circuit inverse et homopolaire.

3.21.2 *Impédance de court-circuit inverse $\underline{Z}_{(2)}$ d'un matériel électrique*

Rapport de la tension phase-neutre au courant de court-circuit de la phase correspondante d'un matériel électrique alimenté par un système inverse symétrique de tensions (voir paragraphe 8.3.2).

3.21.3 *Impédance de court-circuit homopolaire $\underline{Z}_{(0)}$ d'un matériel électrique*

Rapport de la tension phase-neutre au courant de court-circuit d'une phase d'un matériel électrique alimenté par une source de tension alternative, lorsque les trois conducteurs de phase servent en parallèle pour le courant de sortie et qu'un quatrième conducteur et/ou la terre sert de conducteur commun de retour (voir paragraphe 8.3.2).

3.22 *Réactance subtransitoire X_d'' d'une machine synchrone*

Réactance effective à l'instant d'apparition du court-circuit. Pour les calculs de courant de court-circuit, on doit prendre la valeur de X_d'' correspondant au circuit magnétique saturé.

Note. — Lorsqu'on divise X_d'' par l'impédance assignée $Z_{rG} = U_{rG}^2 / S_{rG}$ de la machine synchrone, on obtient la valeur réduite représentée par la lettre minuscule $x_d'' = X_d'' / Z_{rG}$.

3.19 *Near-to-generator short circuit*

A short circuit to which at least one synchronous machine contributes a prospective initial symmetrical short-circuit current which is more than twice the generator's rated current, or a short circuit to which synchronous and asynchronous motors contribute more than 5% of the initial symmetrical short-circuit current I_k' without motors (see Clause 10).

3.20 *Short-circuit impedances at the short-circuit location F*

3.20.1 *Positive-sequence short-circuit impedance $Z_{(1)}$ of a three-phase a.c. system*

The impedance of the positive-sequence system as viewed from the short-circuit location (see Sub-clause 8.3.1 and Figure 4a, page 27).

3.20.2 *Negative-sequence short-circuit impedance $Z_{(2)}$ of a three-phase a.c. system*

The impedance of the negative-sequence system as viewed from the short-circuit location (see Sub-clause 8.3.1 and Figure 4b, page 27).

3.20.3 *Zero-sequence short-circuit impedance $Z_{(0)}$ of a three-phase a.c. system*

The impedance of the zero-sequence system as viewed from the short-circuit location (see Sub-clause 8.3.1 and Figure 4c, page 27). It includes three times the neutral-to-earth impedance $3 Z_{NE}$.

3.20.4 *Short-circuit impedance Z_k of a three-phase a.c. system*

Abbreviated expression for the positive-sequence short-circuit impedance $Z_{(1)}$ according to Sub-clause 3.20.1 for the calculation of three-phase short-circuit currents.

3.21 *Short-circuit impedances of electrical equipment*

3.21.1 *Positive-sequence short-circuit impedance $Z_{(1)}$ of electrical equipment*

The ratio of the line-to-neutral voltage to the short-circuit current of the corresponding phase of electrical equipment when fed by a symmetrical positive-sequence system of voltages (see Sub-clause 8.3.2).

Note. – Index of symbol $Z_{(1)}$ may be omitted if there is no possibility of confusion with the negative-sequence and the zero-sequence short-circuit impedances.

3.21.2 *Negative-sequence short-circuit impedance $Z_{(2)}$ of electrical equipment*

The ratio of the line-to-neutral voltage to the short-circuit current of the corresponding phase of electrical equipment when fed by a symmetrical negative-sequence system of voltages (see Sub-clause 8.3.2).

3.21.3 *Zero-sequence short-circuit impedance $Z_{(0)}$ of electrical equipment*

The ratio of the line-to-earth voltage to the short-circuit current of one phase of electrical equipment when fed by an a.c. voltage source, if the three parallel phase conductors are used for the outgoing current and a fourth line and/or earth is joint return (see Sub-clause 8.3.2).

3.22 *Subtransient reactance X_d'' of a synchronous machine*

The effective reactance at the moment of short circuit. For the calculation of short-circuit currents the saturated value of X_d'' is taken.

Note. – When the reactance X_d'' in ohms is divided by the rated impedance $Z_{rG} = U_{rG}^2 / S_{rG}$ of the synchronous machine, the result in per unit is represented by a small letter $x_d'' = X_d'' / Z_{rG}$.

3.23 Retard (temps mort) t_{\min} d'un disjoncteur

Temps le plus court s'écoulant entre l'apparition du courant de court-circuit et la première séparation des contacts d'un pôle de l'appareil de manœuvre.

Note. - Le temps t_{\min} est la somme du délai minimal de fonctionnement d'un relais instantané et du temps d'ouverture le plus court d'un disjoncteur. Il ne comprend pas les temps réglables des dispositifs de déclenchement.

4. Symboles et indices

Les symboles des grandeurs complexes sont soulignés, par exemple: $\underline{Z} = R + jX$.

Toutes les équations sont données sans mention d'unités. Les symboles représentent des grandeurs ayant des valeurs numériques et des dimensions indépendantes des unités, pourvu que l'on choisisse un système d'unités cohérent, tel que le Système international d'unités (SI).

4.1 Symboles

| | |
|---|---|
| A | Valeur initiale de la composante aperiodique |
| c | Facteur de tension |
| $cU_n/\sqrt{3}$ | Source de tension équivalente (valeur efficace) |
| E'' | Tension subtransitoire d'une machine synchrone |
| f | Fréquence (50 Hz ou 60 Hz) |
| I_b | Courant de court-circuit symétrique coupé (valeur efficace) |
| I_k | Courant de court-circuit permanent (valeur efficace) |
| I_{kP} | Courant de court-circuit permanent aux bornes d'un générateur à excitation «compound» |
| \underline{I}_k ou \underline{I}_{k3} | Courant de court-circuit symétrique initial (valeur efficace) |
| I_{LR} | Courant à rotor bloqué d'un moteur asynchrone |
| i_{DC} | Composante aperiodique décroissante du courant de court-circuit |
| i_p | Valeur de crête du courant de court-circuit |
| K | Facteur de correction des impédances |
| P_{kT} | Pertes totales des enroulements d'un transformateur au courant assigné |
| q | Facteur pour le calcul des courants coupés des moteurs asynchrones |
| q_n | Section nominale |
| R ou r | Résistance, en valeur absolue ou réduite |
| R_G | Résistance fictive d'une machine synchrone pour le calcul de I_k et i_p |
| S_k'' | Puissance de court-circuit symétrique initiale (puissance apparente) |
| S_r | Puissance apparente assignée d'un matériel électrique |
| t_t | Rapport de transformation fictif |
| t_{\min} | Temps mort minimal |
| t_r | Rapport de transformation assigné (changeur de prise en position principale); $t_r \geq 1$ |
| U_n | Tension nominale entre phases d'un réseau (valeur efficace) |
| U_r | Tension assignée entre phases d'un réseau (valeur efficace) |
| u_{kr} | Tension de court-circuit assignée, en pour-cent |
| u_{Rr} | Tension résistive assignée, en pour-cent |
| $\underline{U}_{(1)}, \underline{U}_{(2)}, \underline{U}_{(0)}$ | Tensions dans les systèmes direct, inverse et homopolaire |
| X ou x | Réactance, en valeur absolue ou réduite |
| X_d ou X_q | Réactance synchrone, en phase ou en quadrature |
| X_{dP} | Réactance fictive d'un alternateur à excitation compound lors d'un court-circuit permanent aux bornes, avec prise en compte de l'excitation |
| X_d'' ou X_q'' | Réactance subtransitoire d'une machine synchrone (valeur à la saturation), en phase ou en quadrature |
| $X_{d \text{ sat}}$ | Réciproque de rapport de court-circuit |
| Z ou z | Impédance, en valeur absolue ou réduite |
| \underline{Z}_k | Impédance de court-circuit d'un système à courant alternatif triphasé |
| $\underline{Z}_{(1)}$ | Impédance de court-circuit direct |
| $\underline{Z}_{(2)}$ | Impédance de court-circuit inverse |
| $\underline{Z}_{(0)}$ | Impédance de court-circuit homopolaire |
| η | Rendement des moteurs asynchrones |

3.2.3 Minimum time delay t_{\min} of a circuit breaker

The shortest time between the beginning of the short-circuit current and the first contact separation of one pole of the switching device.

Note. – The time t_{\min} is the sum of the shortest possible operating time of an instantaneous relay and the shortest opening time of a circuit breaker. It does not take into account adjustable time delays of tripping devices.

4. Symbols, subscripts and superscripts

Symbols of complex quantities are underlined, for example: $\underline{Z} = R + jX$.

All equations are written without specifying units. The symbols represent quantities possessing both numerical values and dimensions that are independent of units, provided a coherent unit system is chosen, for example, the International System of Units (SI).

4.1 Symbols

| | |
|---|---|
| A | Initial value of aperiodic component |
| c | Voltage factor |
| $cU_n/\sqrt{3}$ | Equivalent voltage source (r.m.s.) |
| E'' | Subtransient voltage of a synchronous machine |
| f | Frequency (50 Hz or 60 Hz) |
| I_b | Symmetrical short-circuit breaking current (r.m.s.) |
| I_k | Steady-state short-circuit current (r.m.s.) |
| I_{kp} | Steady-state short-circuit current at the terminals (poles) of a generator with compound excitation |
| I_k'' or I_k'' | Initial symmetrical short-circuit current (r.m.s.) |
| I_{LR} | Locked-rotor current of an asynchronous motor |
| i_{DC} | Decaying aperiodic component of short-circuit current |
| i_p | Peak short-circuit current |
| K | Correction factor for impedances |
| P_{krT} | Total loss in transformer windings at rated current |
| q | Factor for the calculation of breaking currents of asynchronous motors |
| q_n | Nominal cross section |
| R resp. r | Resistance, absolute respectively relative value |
| R_G | Fictitious resistance of a synchronous machine when calculating I_k'' and i_p |
| S_k'' | Initial symmetrical short-circuit power (apparent power) |
| S_r | Rated apparent power of electrical equipment |
| t_t | Fictitious transformation ratio |
| t_{\min} | Minimum time delay |
| t_r | Rated transformation ratio (tap changer in main position); $t_r \geq 1$ |
| U_n | Nominal system voltage, line-to-line (r.m.s.) |
| U_r | Rated voltage, line-to-line (r.m.s.) |
| u_{kr} | Rated short-circuit voltage in percent |
| u_{Rr} | Rated ohmic voltage in percent |
| $\underline{U}_{(1)}, \underline{U}_{(2)}, \underline{U}_{(0)}$ | Positive-, negative-, zero-sequence voltage |
| X resp. x | Reactance, absolute respectively relative value |
| X_d resp. X_q | Synchronous reactance, direct axis respectively quadrature axis |
| X_{dp} | Fictitious reactance of a generator with compound excitation in the case of steady-state short circuit at the terminals (poles) if the excitation is taken into account |
| X_d'' resp. X_q'' | Subtransient reactance of a synchronous machine (saturated value), direct axis respectively quadrature axis |
| $X_{d \text{ sat}}$ | Reciprocal of the short-circuit ratio |
| Z resp. z | Impedance, absolute respectively relative value |
| \underline{Z}_k | Short-circuit impedance of a three-phase a.c. system |
| $\underline{Z}_{(1)}$ | Positive-sequence short-circuit impedance |
| $\underline{Z}_{(2)}$ | Negative-sequence short-circuit impedance |
| $\underline{Z}_{(0)}$ | Zero-sequence short-circuit impedance |
| η | Efficiency of asynchronous motors |

| | |
|-----------|---|
| κ | Facteur relatif au calcul de la valeur de crête du courant de court-circuit |
| λ | Facteur relatif au calcul du courant de court-circuit permanent |
| μ | Facteur relatif au calcul des courants de court-circuit symétriques coupés |
| μ_0 | Perméabilité absolue du vide, $\mu_0 = 4\pi/10^{-7}$ H/m |
| ρ | Résistivité |
| φ | Angle de phase |

4.2 Indices inférieurs

| | |
|-------------|---|
| (1) | Composante directe |
| (2) | Composante inverse |
| (0) | Composante homopolaire |
| f | Fictif (ve) |
| k ou k3 | Court-circuit triphasé |
| k1 | Court-circuit monophasé, phase-neutre ou phase-terre |
| k2 | Court-circuit biphasé isolé |
| k2E ou kE2E | Court-circuit biphasé à la terre, respectivement courant de phase ou courant à la terre |
| max | Maximum (al) |
| min | Minimum (al) |
| n | Valeur nominale (VEI 151-04-01) |
| r | Valeur assignée (VEI 151-04-03) |
| rsl | Résultant |
| t | Valeur transformée |
| AT | Transformateur auxiliaire |
| B | Jeu de barres |
| E | Terre |
| F | Défaut, position du défaut |
| G | Générateur (alternateur) |
| HV | Haute tension, enroulement haute tension d'un transformateur |
| LV | Basse tension, enroulement basse tension d'un transformateur |
| L | Ligne (ou phase) |
| LR | Rotor bloqué |
| L1, L2, L3 | Phase 1, 2, 3 d'un système triphasé |
| M | Moteur ou groupe de moteurs asynchrones |
| \bar{M} | Sans moteur |
| MV | Tension moyenne, enroulement moyenne tension d'un transformateur |
| N | Neutre d'un système à courant alternatif triphasé |
| P | Extrémité, borne |
| PSU | Groupe de production (alternateur et son transformateur) |
| Q | Point de liaison à une alimentation |
| T | Transformateur |

4.3 Indices supérieurs

| | |
|---|--|
| " | Valeur initiale (subtransitoire) |
| ' | Résistance ou réactance linéique (par unité de longueur) |

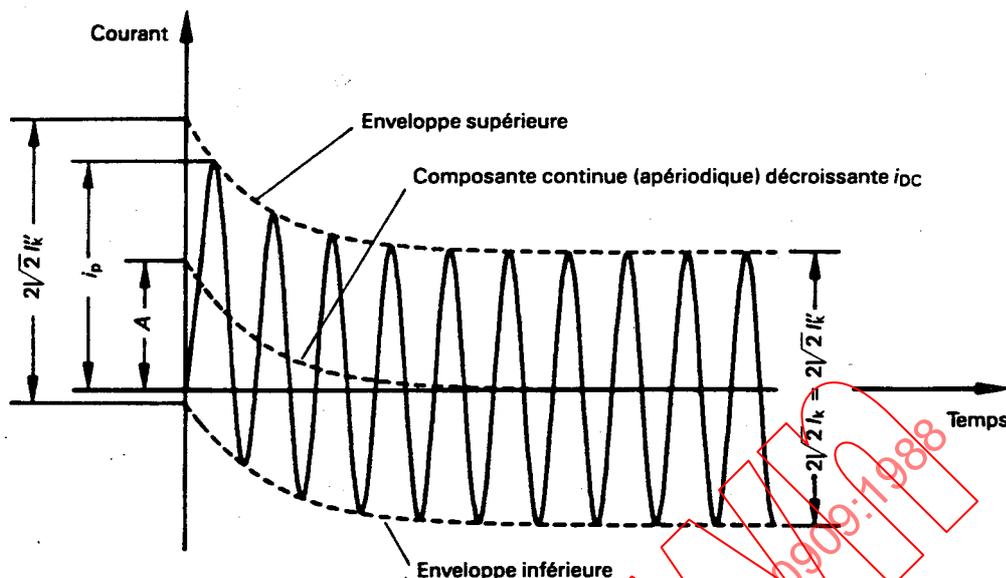
| | |
|-----------|--|
| κ | Factor for the calculation of the peak short-circuit current |
| λ | Factor for the calculation of the steady-state short-circuit current |
| μ | Factor for the calculation of the symmetrical short-circuit breaking current |
| μ_0 | Absolute permeability of vacuum, $\mu_0 = 4\pi/10^{-7}$ H/m |
| ρ | Resistivity |
| φ | Phase angle |

4.2 Subscripts

| | |
|----------------|---|
| (1) | Positive-sequence component |
| (2) | Negative-sequence component |
| (0) | Zero-sequence component |
| f | Fictitious |
| k or k3 | Three-phase short circuit |
| k1 | Line-to-earth short circuit, line-to-neutral short circuit |
| k2 | Line-to-line short circuit without earth connection |
| k2E resp. kE2E | Line-to-line short circuit with earth connection, line current respectively earth current |
| max | Maximum |
| min | Minimum |
| n | Nominal value (IEV 151-04-01) |
| r | Rated value (IEV 151-04-03) |
| rsl | Resulting |
| t | Transformed value |
| AT | Auxiliary transformer |
| B | Busbar |
| E | Earth |
| F | Fault, short-circuit location |
| G | Generator |
| HV | High-voltage, high-voltage winding of a transformer |
| LV | Low-voltage, low-voltage winding of a transformer |
| L | Line |
| LR | Locked rotor |
| L1, L2, L3 | Line 1, 2, 3 of a three-phase system |
| M | Asynchronous motor or group of asynchronous motors |
| \overline{M} | Without motor |
| MV | Medium-voltage, medium-voltage winding of a transformer |
| N | Neutral of a three-phase a.c. system |
| P | Terminal, pole |
| PSU | Power-station unit (generator and transformer) |
| Q | Feeder connection point |
| T | Transformer |

4.3 Superscripts

| | |
|---|---|
| " | Initial (subtransient) value |
| ' | Resistance or reactance per unit length |



- I_k = courant de court-circuit symétrique initial
- i_p = crête du courant de court-circuit
- I_k = courant de court-circuit permanent
- i_{DC} = composante continue (apériodique) décroissante du courant de court-circuit
- A = valeur initiale de la composante apériodique i_{DC}

FIG. 1. - Courant relatif à un court-circuit éloigné de tout alternateur (tracé schématique).

5. Hypothèses de calcul

Le calcul complet des courants de court-circuit devrait fournir les courbes des courants en fonction du temps au point de défaut depuis l'apparition du court-circuit jusqu'à son extinction, en tenant compte de la valeur instantanée de la tension à l'apparition de court-circuit (voir figures 1 et 12, pages 18 et 62).

Dans la plupart des cas pratiques, une telle détermination n'est pas nécessaire. Selon l'application visée, il est intéressant de connaître la valeur efficace de la composante alternative symétrique et la valeur de crête du courant de court-circuit i_p lors de l'apparition d'un court-circuit. La valeur de i_p dépend de la constante de temps de décroissance de la composante apériodique et de la fréquence f , c'est-à-dire du rapport R/X ou X/R de l'impédance de court-circuit Z_k ; elle est à peu près maximale si le court-circuit commence au zéro de tension.

Dans les réseaux maillés, il y a plusieurs constantes de temps. C'est pourquoi on ne peut donner une méthode simple et exacte pour calculer i_p et i_{DC} . Des méthodes particulières pour calculer i_p avec une précision suffisante sont indiquées au paragraphe 9.1.3.2.

Pour déterminer le courant de court-circuit asymétrique coupé, on peut calculer, avec une précision suffisante, la composante apériodique décroissante i_{DC} , indiquée dans les figures 1 ou 12 par la formule:

$$i_{DC} = \sqrt{2} I_k' e^{-2\pi f t R/X} \tag{1}$$

où:

- I_k' = courant de court-circuit symétrique initial
- f = fréquence nominale 50 Hz ou 60 Hz
- t = temps
- R/X = rapport calculé selon les paragraphes 9.1.1.2, 9.1.2.2 ou 9.1.3.2

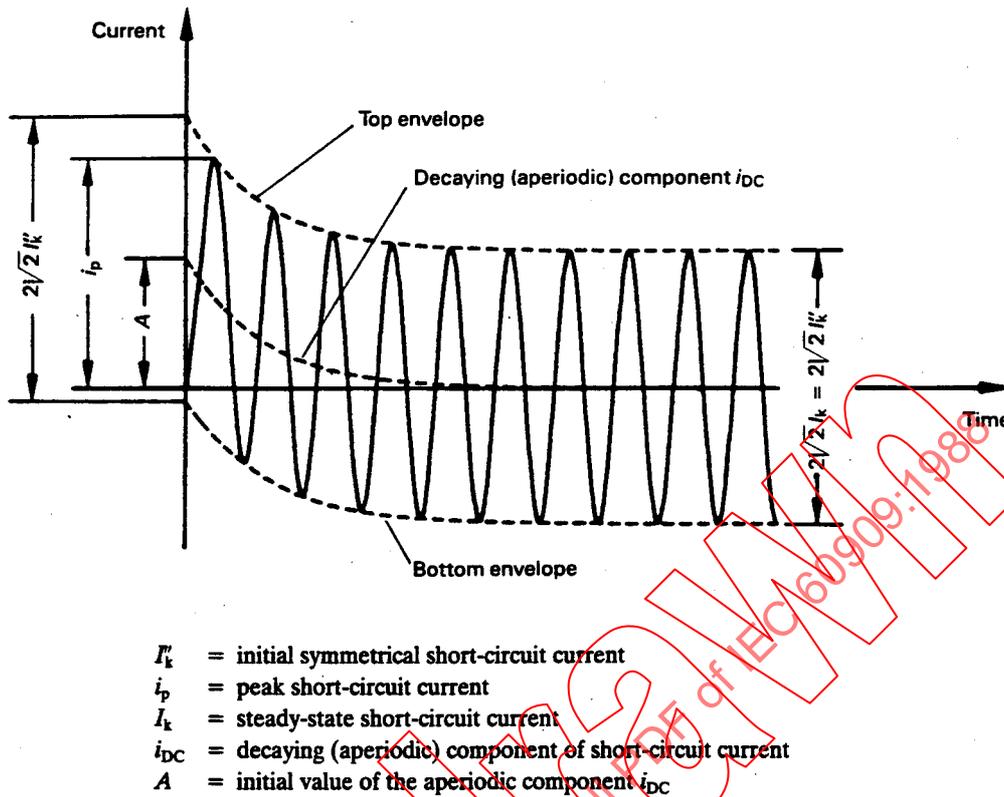


FIG. 1. — Short-circuit current of a far-from-generator short circuit (schematic diagram).

5. Calculation assumptions

A complete calculation of short-circuit currents should give the currents as a function of time at the short-circuit location from the initiation of the short circuit up to its end, corresponding to the instantaneous value of the voltage at the beginning of short circuit (see Figures 1 and 12, pages 19 and 63).

In most practical cases a determination like this is not necessary. Depending on the application of the results, it is of interest to know the r.m.s. value of the symmetrical a.c. component and the peak value i_p of the short-circuit current following the occurrence of a short circuit. The value i_p depends on the time constant of the decaying aperiodic component and the frequency f , that is on the ratio R/X or X/R of the short-circuit impedance Z_k , and is nearly reached if the short circuit starts at zero voltage.

In meshed networks there are several time constants. That is why it is not possible to give an easy exact method of calculating i_p and i_{DC} . Special methods to calculate i_p with sufficient accuracy are given in Sub-clause 9.1.3.2.

For the determination of the asymmetrical short-circuit breaking current the decaying aperiodic component i_{DC} of the short-circuit current as shown in Figures 1 or 12 may be calculated with sufficient accuracy by:

$$i_{DC} = \sqrt{2} I_k' e^{-2\pi f t R/X} \quad (1)$$

where:

- I_k' = initial symmetrical short-circuit current
- f = nominal frequency 50 Hz or 60 Hz
- t = time
- R/X = ratio according to Sub-clause 9.1.1.2, 9.1.2.2 or 9.1.3.2

Dans les réseaux maillés, conformément au paragraphe 9.1.3.2 – méthode A –, il convient que la partie droite de l'équation (1) soit multipliée par 1,15. D'après le paragraphe 9.1.3.2 – méthode B –, il est recommandé de déterminer la fréquence équivalente comme suit:

| | | | | |
|-------------------------|---------|---------|----------|----------|
| $\frac{2\pi ft}{f_c/f}$ | $<2\pi$ | $<5\pi$ | $<10\pi$ | $<25\pi$ |
| | 0,27 | 0,15 | 0,092 | 0,055 |

où $f = 50$ Hz ou 60 Hz.

De plus, le calcul des valeurs maximales et minimales des courants de court-circuit repose sur les simplifications suivantes:

- 1) Il n'y a pas, pendant toute la durée du court-circuit, de modification du nombre de circuits concernés, c'est-à-dire qu'un court-circuit triphasé le reste, de même qu'un court-circuit phase-terre.
- 2) Les changeurs de prise des transformateurs sont supposés être en position principale.
- 3) Les résistances d'arc ne sont pas prises en compte.

Bien que ces hypothèses ne se vérifient pas de façon absolue dans les réseaux d'énergie considérés, les modes de calcul recommandés donnent une précision acceptable.

Qu'il s'agisse de courts-circuits symétriques ou non (voir figure 2, page 22), la méthode de calcul des courants par les composantes symétriques se révèle utile (voir paragraphe 8.2).

6. Source de tension équivalente au point de court-circuit

Dans tous les cas décrits dans les sections un et deux, il est possible de déterminer le courant au point de court-circuit F en considérant une source de tension équivalente. Obtenir des données d'exploitation sur les charges statiques des consommateurs, sur les positions des changeurs de prise des transformateurs, sur l'excitation des générateurs, etc. n'est pas indispensable; tout calcul complémentaire pour les différentes charges envisageables au moment d'un court-circuit est (en fait) superflu.

La source de tension équivalente est la seule tension active du réseau. Toutes les alimentations du réseau et les machines synchrones et asynchrones sont remplacées par leurs impédances internes (voir paragraphe 8.3.1).

De plus, selon cette méthode, toutes les capacités de ligne et admittances en parallèle des charges non tournantes, sauf celles du système homopolaire (voir paragraphes 8.3.1 et 11.4), doivent être négligées.

In meshed networks according to Sub-clause 9.1.3.2 – Method A – the right hand side of equation (1) should be multiplied by 1.15. According to Sub-clause 9.1.3.2 – Method B – the equivalent frequency should be selected as follows:

| $\frac{2\pi ft}{f_c/f}$ | $<2\pi$ | $<5\pi$ | $<10\pi$ | $<25\pi$ |
|-------------------------|---------|---------|----------|----------|
| | 0.27 | 0.15 | 0.092 | 0.055 |

where $f = 50$ Hz or 60 Hz.

Furthermore, the calculation of maximum and minimum short-circuit currents is based on the following simplifications:

- 1) For the duration of the short circuit there is no change in the number of circuits involved, that is, a three-phase short circuit remains three phase and a line-to-earth short circuit remains line-to-earth during the time of short circuit.
- 2) Tap changers of the transformers are assumed to be in main position.
- 3) Arc resistances are not taken into account.

While these assumptions are not strictly true for the power systems considered, the recommended short-circuit calculations have acceptable accuracy.

For balanced and unbalanced short circuits as shown in Figure 2, page 23, it is useful to calculate the short-circuit currents by the method of symmetrical components (see Sub-clause 8.2).

6. Equivalent voltage source at the short-circuit location

In all cases in Sections One and Two it is possible to determine the short-circuit current at the short-circuit location F with the help of an equivalent voltage source. Operational data on the static load of consumers, tap changer position of transformers, excitation of generators and so on are dispensable; additional calculations about all the different possible load flows at the moment of short circuit are superfluous.

The equivalent voltage source is the only active voltage of the system. All network feeders, synchronous and asynchronous machines are replaced by their internal impedances (see Sub-clause 8.3.1).

Furthermore, with this method all line capacitances and parallel admittances of non-rotating loads, except those of the zero-sequence system (see Sub-clauses 8.3.1 and 11.4), shall be neglected.

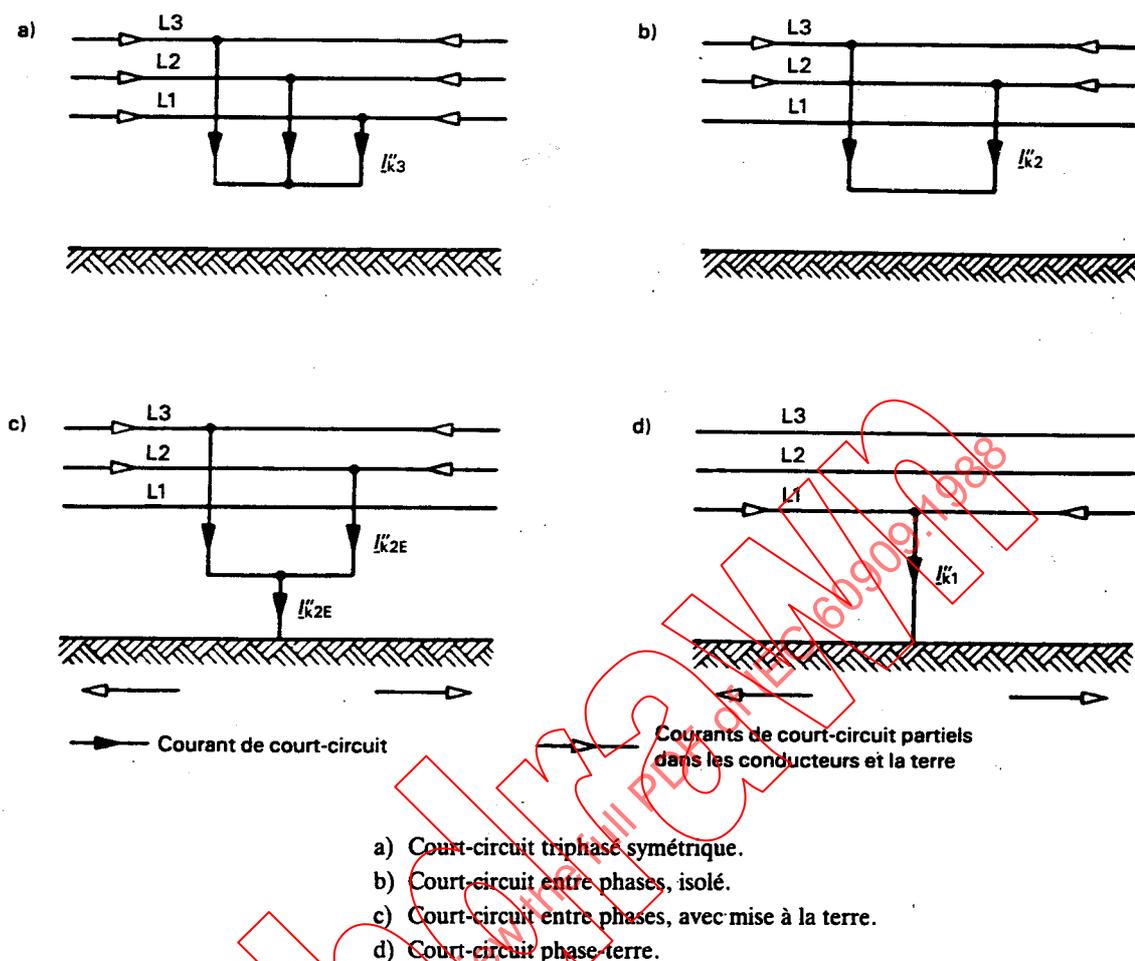


FIG. 2. - Caractérisation des courts-circuits et de leurs courants. Le sens des flèches figurant les courants est arbitraire.

On notera enfin que, dans beaucoup de cas, les transformateurs haute tension sont équipés de régleurs et de changeurs de prise en charge, tandis que les transformateurs basse tension ne comportent normalement que peu de prises, par exemple +2,5% ou +4%. Les positions réelles des régleurs ou changeurs de prise des transformateurs peuvent, dans le cas de courts-circuits éloignés des alternateurs, être ignorées sans perte excessive de précision lorsqu'on utilise la présente méthode.

La représentation des matériels de réseau par leurs impédances, conformément aux paragraphes 8.3.2 et 11.5.3, s'applique conjointement avec la source de tension équivalente au point de court-circuit, qu'il s'agisse d'un court-circuit éloigné des générateurs, traité dans la section un, ou d'un court-circuit proche des alternateurs, traité dans la section deux.

La figure 3, page 24, donne un exemple de source de tension équivalente au point de défaut F dans un réseau basse tension alimenté par un seul transformateur. Elle est la seule source de tension active du réseau. Toutes les autres tensions actives du réseau sont considérées comme annulées. Ainsi l'alimentation de ce réseau est représentée dans la figure 3a, page 24, par sa seule impédance interne Z_0 (voir paragraphe 8.3.2.1). Les admittances parallèles (capacités de ligne, charges non tournantes par exemple) ne sont pas à prendre en considération dans le calcul des courants de court-circuit suivant la figure 3b, page 24.

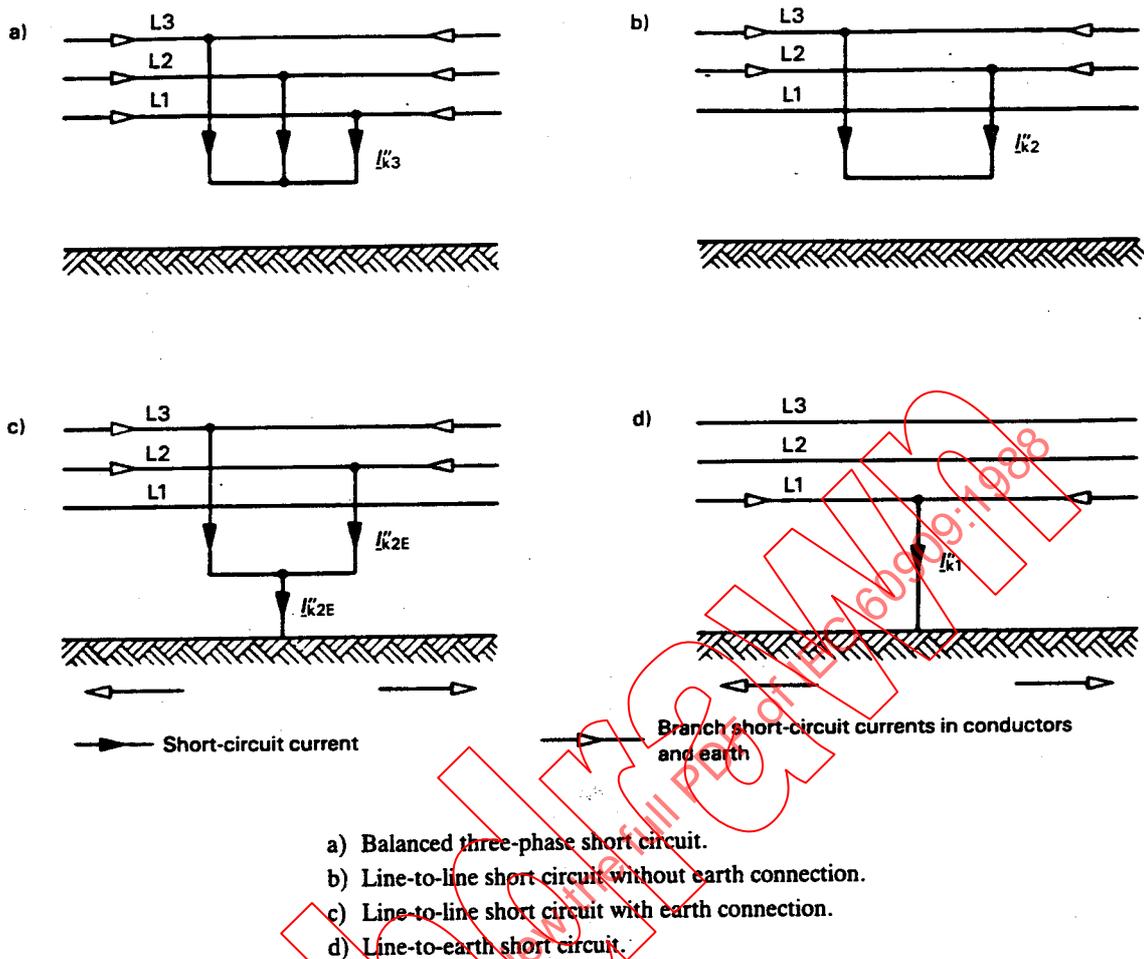


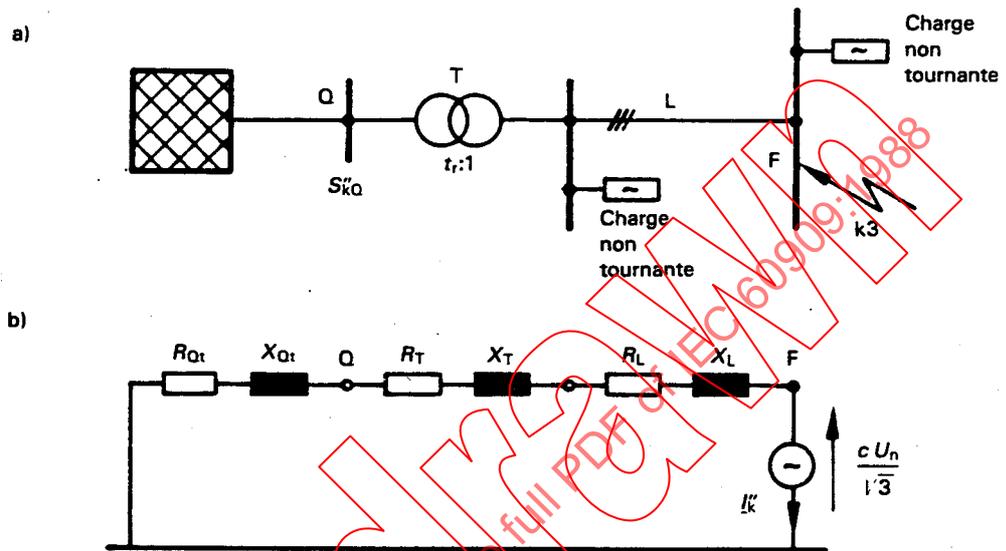
FIG. 2. – Characterization of short circuits and their currents. The direction of current arrows is chosen arbitrarily.

Finally high-voltage transformers in many cases are equipped with regulators and tap changers operating under load flow conditions, whereas transformers feeding low-voltage systems have normally only a few taps, for example +2.5% or +4%. The actual regulator or tap changer position of transformers in the case of far-from-generator short circuits may be disregarded without unacceptable loss of accuracy by use of this method.

The modelling of the system equipment by means of impedances according to Sub-clauses 8.3.2 and 11.5.3 applies in conjunction with the equivalent voltage source at the short-circuit location irrespective of whether a far-from-generator short-circuit according to Section One or a near-to-generator short-circuit according to Section Two is involved.

Figure 3, page 25, shows an example of the equivalent voltage source at the short-circuit location F as the sole active voltage of the system in the case of a low-voltage system fed by a single transformer. All other active voltages in the system are assumed to be zero. Thus the network feeder in Figure 3a, page 25, is represented only by its internal impedance Z_0 (see Sub-clause 8.3.2.1). Parallel admittances (e. g. line capacitances and passive loads) are not to be considered when calculating short-circuit currents in accordance with Figure 3b, page 25.

La source de tension équivalente $cU_n / \sqrt{3}$ (voir paragraphe 3.15) au point de défaut F se compose du facteur de tension c , de la tension nominale du réseau U_n et de $\sqrt{3}$. La valeur de c varie selon que l'on calcule les valeurs maximale ou minimale du courant de court-circuit. En l'absence de normes nationales, il est indiqué de choisir la valeur de c d'après le tableau I, considérant que la plus haute tension dans un réseau normal ne diffère pas, en moyenne, de plus de +5% environ en basse tension et d'environ +10% en haute tension de la tension nominale.



a) Schéma de réseau.
 b) Schéma du circuit équivalent (système direct).

FIG. 3. - Illustration du calcul du courant de court-circuit symétrique initial I_k'' suivant la procédure de la source de tension équivalente.

The equivalent voltage source $cU_n/\sqrt{3}$ (see Sub-clause 3.15) at the short-circuit location F is composed of the voltage factor c , the nominal system voltage U_n and $\sqrt{3}$. The voltage factor c is different for the calculation of maximum or minimum short-circuit currents. If there are no national standards, it seems adequate to choose a voltage factor c according to Table I, considering that the highest voltage in a normal system does not differ, on average, by more than +5% (LV) or +10% (HV) approximately from the nominal voltage.

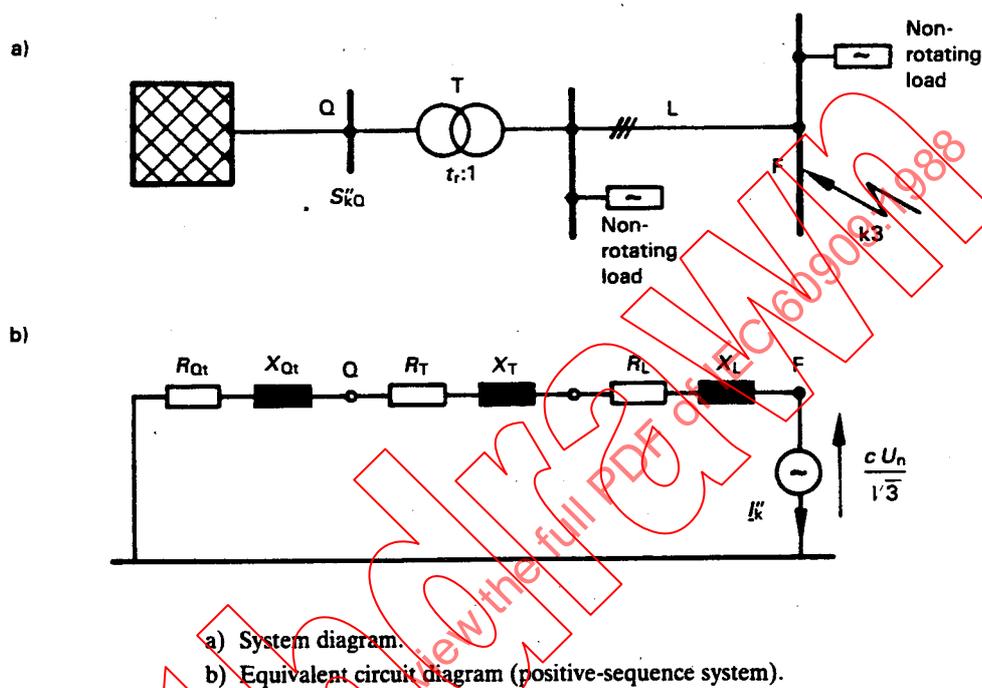


FIG. 3. – Illustration for calculating the initial symmetrical short-circuit current I_k'' in compliance with the procedure for the equivalent voltage source.

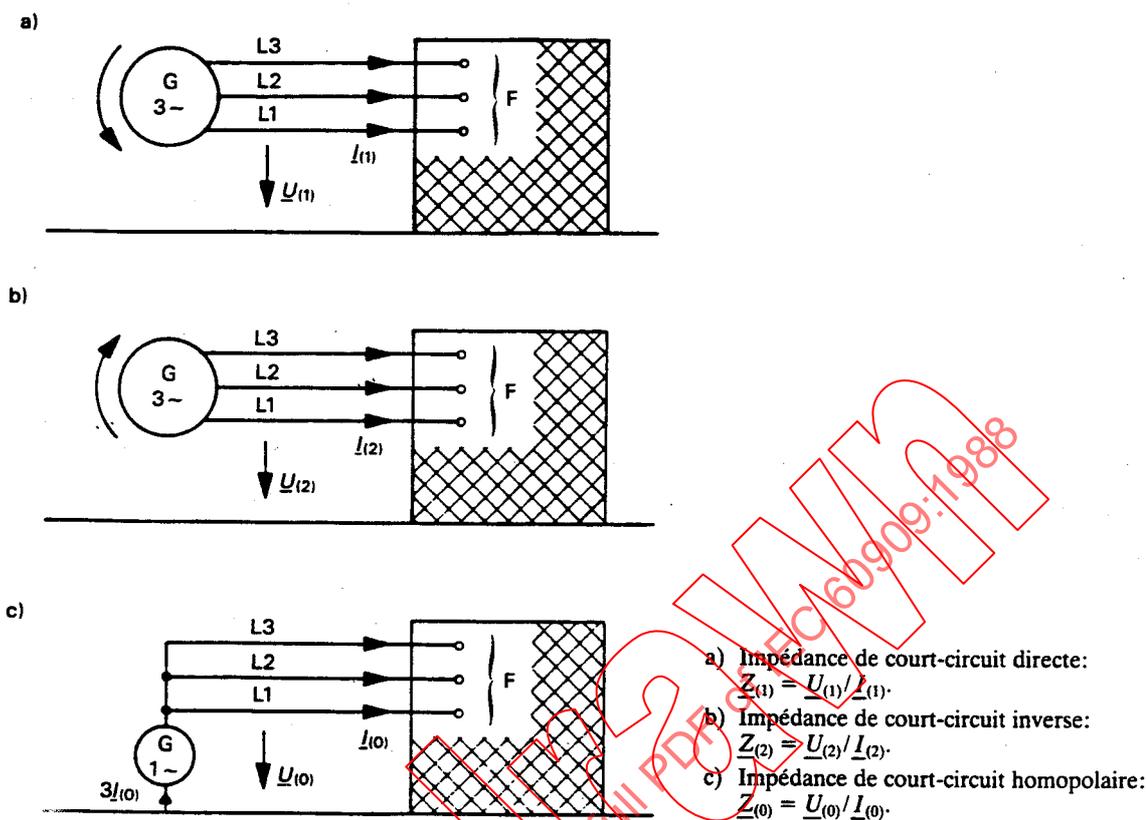


FIG. 4. - Impédance de court-circuit d'un réseau alternatif triphasé au point de défaut F.

TABLEAU I

Facteur de tension *c*

| Tensions nominales U_n | Facteur de tension <i>c</i> pour le calcul | |
|--|--|--|
| | du courant de court-circuit maximal c_{max} | du courant de court-circuit minimal c_{min} |
| Basse tension 100 V à 1000 V (Publication 38 de la CEI, tableau I) a) 230 V / 400 V - b) Autres valeurs | 1,00 1,05 | 0,95 1,00 |
| Moyenne tension > 1 kV à 35 kV (Publication 38 de la CEI, tableau III) | 1,10 | 1,00 |
| Haute tension > 35 kV à 230 kV (Publication 38 de la CEI, tableau IV) | 1,10 | 1,00 |

Note. - cU_n ne devra pas dépasser la tension maximale U_m des matériels pour réseaux d'énergie.

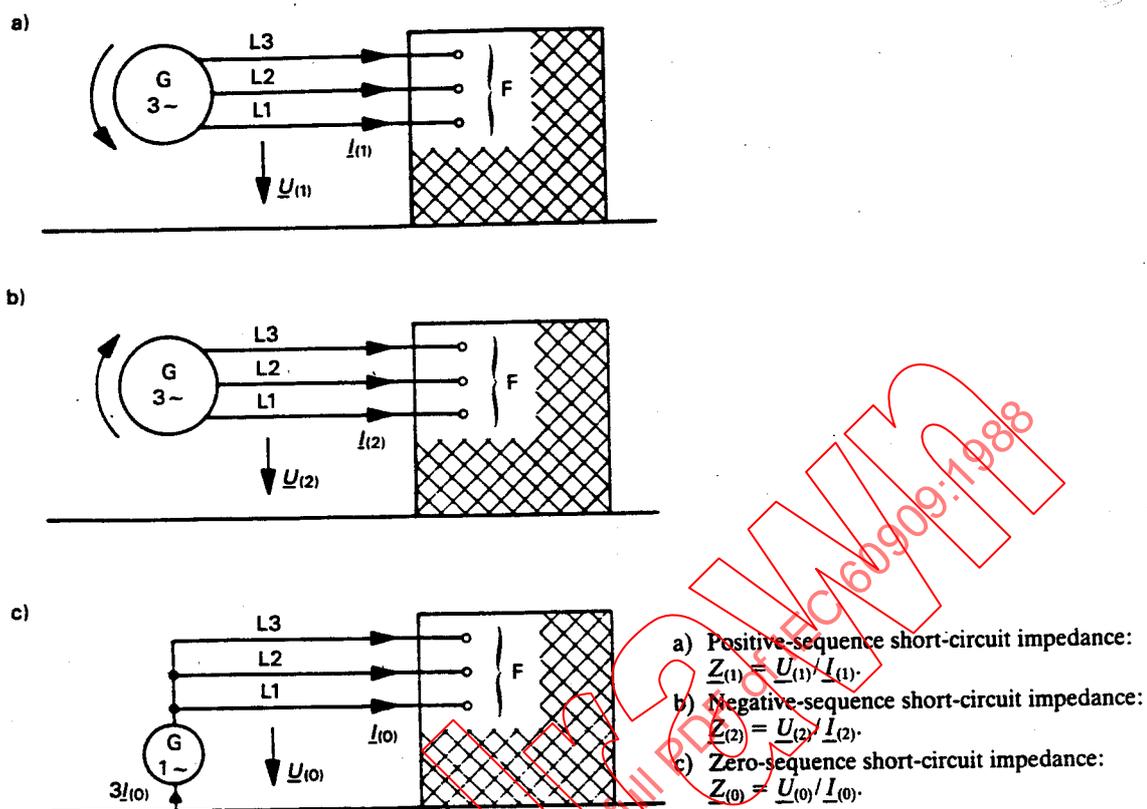


FIG. 4. — Short-circuit impedance of a three-phase a. c. system at the short-circuit location F.

TABLE I
 Voltage factor *c*

| Nominal voltage U_n | Voltage factor <i>c</i> for the calculation of | |
|---|--|--|
| | maximum short-circuit current c_{max} | minimum short-circuit current c_{min} |
| Low voltage 100 V to 1000 V (IEC Publication 38, Table I) a) 230 V / 400 V b) Other voltages | 1.00 1.05 | 0.95 1.00 |
| Medium voltage > 1 kV to 35 kV (IEC Publication 38, Table III) | 1.10 | 1.00 |
| High voltage > 35 kV to 230 kV (IEC Publication 38, Table IV) | 1.10 | 1.00 |

Note. — cU_n should not exceed the highest voltage U_m for equipment of power systems.

Ainsi, la source de tension équivalente pour le calcul du courant de court-circuit maximal s'établit, d'après le tableau I, comme suit:

$$cU_n/\sqrt{3} = 1,00 U_n/\sqrt{3} \text{ pour le réseau basse tension 230 V / 400 V, 50 Hz} \quad (2a)$$

$$cU_n/\sqrt{3} = 1,05 U_n/\sqrt{3} \text{ pour les autres réseaux basse tension} \quad (2b)$$

$$cU_n/\sqrt{3} = 1,10 U_n/\sqrt{3} \text{ pour les réseaux moyenne et haute tensions.} \quad (2c)$$

SECTION UN – RÉSEAUX DANS LESQUELS LES COURANTS DE COURT-CIRCUIT N'ONT PAS DE COMPOSANTE ALTERNATIVE DÉCROISSANTE (COURTS-CIRCUITS ÉLOIGNÉS DES ALTERNATEURS)

7. Généralités

Cette section se rapporte aux courts-circuits pendant la durée desquels il n'y a pas de changement dans la ou les tensions qui ont provoqué la circulation d'un courant de court-circuit (condition de tension quasi stationnaire), ni de changement significatif de l'impédance du circuit (impédances constantes et linéaires).

Le courant de court-circuit présumé peut alors être considéré comme la somme de deux composantes:

- la composante alternative d'amplitude constante pendant toute la durée du court-circuit,
- la composante apériodique, de valeur initiale A et décroissant jusqu'à zéro.

La figure 1, page 18, indique schématiquement l'allure générale du courant dans le cas d'un court-circuit éloigné de tout alternateur. Les courants alternatifs symétriques I_k'' et I_k , sont exprimés en valeur efficace et ont une amplitude très voisine.

En général, cette approximation se vérifie pour les réseaux alimentés à travers des transformateurs par des réseaux haute tension étendus, c'est-à-dire lors de courts-circuits éloignés des alternateurs.

Les courts-circuits à alimentation unique à travers un transformateur, conformément à la figure 3, page 24, peuvent être considérés a priori comme éloignés des alternateurs si $X_{TLV} \geq 2 X_{O1}$, X_{O1} étant calculé d'après le paragraphe 8.3.2.1 et X_{TLV} suivant le paragraphe 8.3.2.2.

8. Paramètres de court-circuit

8.1 Court-circuit symétrique

Le court-circuit triphasé symétrique dans un réseau triphasé, tel qu'il est indiqué dans la figure 2a, page 22, présente un intérêt particulier, car il conduit souvent aux plus fortes valeurs de courant de court-circuit présumé et se calcule très facilement du fait de la nature équilibrée du court-circuit.

Pour calculer ce courant de court-circuit, il suffit de considérer l'impédance de court-circuit direct $Z_{(1)} = Z_k$ vue du point de défaut (voir paragraphe 8.3.1).

Les détails du calcul sont donnés dans l'article 9.

8.2 Court-circuit dissymétrique

Les types de courts-circuits dissymétriques suivants sont traités dans cette norme:

- court-circuit entre phases, isolé (voir figure 2b, page 22),
- court-circuit entre phases, avec mise à la terre (voir figure 2c, page 22),
- court-circuit phase-terre (voir figure 2d, page 22).

In this way the equivalent voltage source for the calculation of the maximum short-circuit current can be established, according to Table I, by:

$$cU_n/\sqrt{3} = 1.00 U_n/\sqrt{3} \text{ in low-voltage systems } 230 \text{ V} / 400 \text{ V}, 50 \text{ Hz} \quad (2a)$$

$$cU_n/\sqrt{3} = 1.05 U_n/\sqrt{3} \text{ in other low-voltage systems} \quad (2b)$$

$$cU_n/\sqrt{3} = 1.10 U_n/\sqrt{3} \text{ in medium and high-voltage systems.} \quad (2c)$$

SECTION ONE – SYSTEMS WITH SHORT-CIRCUIT CURRENTS HAVING NO A.C. COMPONENT DECAY (FAR-FROM-GENERATOR SHORT CIRCUITS)

7. General

This section refers to short circuits where there is no change for the duration of the short circuit in the voltage or voltages that caused the short-circuit current to develop (i. e. a quasi-stationary voltage condition), nor any significant change in the impedance of the circuit (i. e. constant and linear impedances).

Therefore, the prospective (available) short-circuit current can be considered as the sum of the following two components:

- the a.c. component with constant amplitude during the whole short circuit,
- the aperiodic component beginning with an initial value A and decaying to zero.

Figure 1, page 19, gives schematically the general course of the short-circuit current in the case of a far-from-generator short circuit. The symmetrical a.c. components I'_k and I_k are r.m.s. values and are nearly equal in magnitude.

This assumption is generally satisfied in power systems fed from extended high-voltage systems through transformers, that is in the case of a far-from-generator short circuit.

Single-fed short-circuits supplied by a transformer according to Figure 3, page 25, may a priori be regarded as far-from-generator short circuits if $X_{TLV} \geq 2 X_{Qt}$ with X_{Qt} to be calculated in accordance with Sub-clause 8.3.2.1 and X_{TLV} in accordance with Sub-clause 8.3.2.2.

8. Short-circuit parameters

8.1 *Balanced short circuit*

The balanced three-phase short circuit of a three-phase a.c. system in accordance with Figure 2a, page 23, is of special interest, because this kind of fault often leads to the highest values of prospective (available) short-circuit current and the calculation becomes particularly simple on account of the balanced nature of the short circuit.

In calculating the short-circuit current, it is sufficient to take into account only the positive-sequence short-circuit impedance $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_k$ as seen from the fault location (see Sub-clause 8.3.1).

Details of calculation are given in Clause 9.

8.2 *Unbalanced short circuit*

The following types of unbalanced (asymmetrical) short circuits are treated in this standard:

- line-to-line short circuit without earth connection (see Figure 2b, page 23),
- line-to-line short circuit with earth connection (see Figure 2c, page 23),
- line-to-earth short circuit (see Figure 2d, page 23).

En règle générale, le courant de court-circuit triphasé est le plus grand. Cependant, dans le cas d'un court-circuit près d'un transformateur de puissance avec mise à la terre du neutre ou d'un transformateur de mise à la terre du neutre, le courant de court-circuit phase-terre peut dépasser le courant de court-circuit triphasé. Cela s'applique en particulier aux cas des transformateurs à couplage Yz, Dy et Dz lorsque l'enroulement y ou z, du côté basse tension, est mis à la terre.

Dans les réseaux triphasés, le calcul des valeurs des courants résultant de courts-circuits dissymétriques se trouve simplifié par l'emploi de la méthode des composantes symétriques qui nécessite le calcul de trois composantes indépendantes, sans couplage d'impédances mutuelles.

Avec cette méthode, on obtient les courants dans chaque phase en ajoutant les courants relatifs aux trois composantes symétriques du système:

- le courant direct $\underline{I}_{(1)}$,
- le courant inverse $\underline{I}_{(2)}$,
- le courant homopolaire $\underline{I}_{(0)}$.

Si la phase L1 est prise comme référence, les courants \underline{I}_{L1} , \underline{I}_{L2} et \underline{I}_{L3} sont donnés par:

$$\underline{I}_{L1} = \underline{I}_{(1)} + \underline{I}_{(2)} + \underline{I}_{(0)} \quad (3a)$$

$$\underline{I}_{L2} = \underline{a}^2 \underline{I}_{(1)} + \underline{a} \underline{I}_{(2)} + \underline{I}_{(0)} \quad (3b)$$

$$\underline{I}_{L3} = \underline{a} \underline{I}_{(1)} + \underline{a}^2 \underline{I}_{(2)} + \underline{I}_{(0)} \quad (3c)$$

$$\underline{a} = -\frac{1}{2} + j\frac{1}{2}\sqrt{3}; \quad \underline{a}^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{1}{2}\sqrt{3} \quad (4)$$

Chaque système des trois composantes symétriques possède son impédance propre (voir paragraphe 8.3).

La méthode des composantes symétriques postule que les impédances du système sont symétriques, par exemple que les phases sont transposées. Mais les résultats de calcul conservent une précision acceptable même lorsque les phases ne sont pas transposées.

8.3 Impédance de court-circuit

Pour les besoins de cette norme, il y a lieu de distinguer entre les impédances de court-circuit au point de défaut F et les impédances de court-circuit propres à chaque matériel électrique. Pour le calcul par la méthode des composantes symétriques, on doit considérer les impédances de court-circuit directes, inverses et homopolaires.

8.3.1 Impédances de court-circuit au point de défaut F

L'impédance de court-circuit directe $\underline{Z}_{(1)}$ au point de défaut F s'obtient, comme il est indiqué dans la figure 4a, page 26, un système symétrique de tensions directes étant appliqué au point de défaut F et toutes les machines synchrones et asynchrones étant remplacées par leurs impédances internes. Dans le calcul des courants de court-circuit, selon l'article 9, toutes les capacités de phase et admittances parallèles des charges non tournantes sont négligées.

Pour le calcul du court-circuit symétrique triphasé, seule l'impédance directe est à considérer. Dans ce cas, $\underline{Z}_k = \underline{Z}_{(1)}$ (voir paragraphes 3.20.1 et 3.20.4).

L'impédance de court-circuit inverse $\underline{Z}_{(2)}$ au point de défaut F s'obtient comme il est indiqué à la figure 4b, page 26, un système de tensions inverses étant appliqué au point de défaut F.

As a rule, the three-phase short-circuit current is the largest. In the event of a short circuit near to a transformer with neutral earthing or a neutral-earthing transformer, the line-to-earth short-circuit current may be greater than the three-phase short-circuit current. This applies in particular to transformers of vector group Yz, Dy and Dz when earthing the y- or z-winding on the low voltage side of the transformer.

In three-phase systems the calculation of the current values resulting from unbalanced short circuits is simplified by the use of the method of symmetrical components which requires the calculation of three independent system components, avoiding any coupling of mutual impedances.

Using this method, the currents in each line are found by superposing the currents of three symmetrical component systems:

- positive-sequence current $\underline{I}_{(1)}$,
- negative-sequence current $\underline{I}_{(2)}$,
- zero-sequence current $\underline{I}_{(0)}$.

Taking the line L1 as reference, the currents \underline{I}_{L1} , \underline{I}_{L2} and \underline{I}_{L3} are given by:

$$\underline{I}_{L1} = \underline{I}_{(1)} + \underline{I}_{(2)} + \underline{I}_{(0)} \quad (3a)$$

$$\underline{I}_{L2} = \underline{a}^2 \underline{I}_{(1)} + \underline{a} \underline{I}_{(2)} + \underline{I}_{(0)} \quad (3b)$$

$$\underline{I}_{L3} = \underline{a} \underline{I}_{(1)} + \underline{a}^2 \underline{I}_{(2)} + \underline{I}_{(0)} \quad (3c)$$

$$\underline{a} = -\frac{1}{2} + j\frac{1}{2}\sqrt{3}; \quad \underline{a}^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{1}{2}\sqrt{3} \quad (4)$$

Each of the three symmetrical component systems has its own impedance (see Sub-clause 8.3).

The method of the symmetrical components postulates that the system impedances are balanced, for example in the case of transposed lines. The results of the short-circuit calculation have an acceptable accuracy also in the case of untransposed lines.

8.3 Short-circuit impedances

For the purpose of this standard, one has to make a distinction between short-circuit impedances at the short-circuit location F and short-circuit impedances of individual electrical equipment. According to the calculation with symmetrical components positive-sequence, negative-sequence and zero-sequence short-circuit impedances shall be considered.

8.3.1 Short-circuit impedances at the short-circuit location F

The positive-sequence short-circuit impedance $\underline{Z}_{(1)}$ at the short-circuit location F is obtained according to Figure 4a, page 27, when a symmetrical system of voltages of positive-sequence phase order is applied to the short-circuit location F and all synchronous and asynchronous machines are replaced by their internal impedances. When calculating short-circuit currents in accordance with Clause 9, all line capacitances and parallel admittances of non-rotating loads are neglected.

For the calculation of balanced three-phase short circuits, the positive-sequence impedance is the only relevant impedance. In this case $\underline{Z}_k = \underline{Z}_{(1)}$ (see Sub-clauses 3.20.1 and 3.20.4).

The negative-sequence short-circuit impedance $\underline{Z}_{(2)}$ at the short-circuit location F is obtained according to Figure 4b, page 27, when a symmetrical system of voltages of negative-sequence

Dans le calcul des courants de court-circuit, selon l'article 9, toutes les capacités des lignes et câbles et admittances parallèles des charges non tournantes sont négligées.

Les valeurs des impédances directe et inverse ne diffèrent que dans le cas des machines tournantes. Dans cette section, qui ne concerne que les court-circuits éloignés des générateurs, il est admis de prendre $\underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)}$.

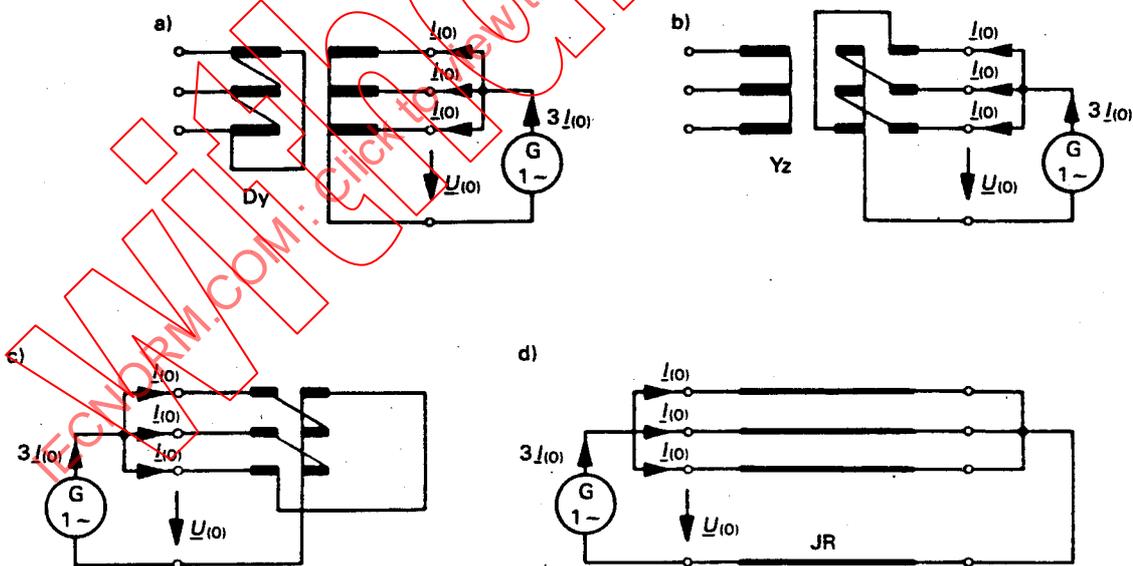
L'impédance de court-circuit homopolaire $\underline{Z}_{(0)}$ au point de défaut F s'obtient comme il est indiqué dans la figure 4c, page 26, une tension alternative étant appliquée entre les phases court-circuitées et les retours communs (par exemple réseau de terre, conducteur neutre, conducteurs de terre, gaines de câble, armures de câble).

Dans le calcul des courants de court-circuit dissymétriques relatifs aux réseaux moyenne ou haute tension, avec application au point de défaut d'une source de tension équivalente, les capacités homopolaires de ligne et les admittances homopolaires en parallèle des charges non tournantes sont à prendre en compte dans les réseaux à neutre isolé et à impédance de neutre accordée.

Négliger les capacités homopolaires de ligne dans les réseaux à neutre à la terre conduit à surestimer les valeurs des courants de court-circuit par rapport aux valeurs réelles. L'écart est fonction de plusieurs paramètres des réseaux, par exemple la longueur de ligne entre transformateurs dont le neutre est à la terre.

Dans les réseaux basse tension, les capacités de ligne et admittances parallèles des charges non tournantes peuvent être négligées.

Sauf dans des cas spéciaux, les impédances de court-circuit homopolaires diffèrent des impédances directes.



- a) Transformateur de couplage Dy.
- b) Transformateur de couplage Yz.
- c) Transformateur zigzag de mise à la terre du neutre.
- d) Ligne (ligne aérienne ou câble); JR: retour commun.

FIG. 5. — Mesurage de l'impédance de court-circuit homopolaire de matériels électriques (exemples).

phase order is applied to the short-circuit location F. When calculating short-circuit currents in accordance with Clause 9, all line capacitances and parallel admittances of non-rotating loads are neglected.

The values of positive-sequence and negative-sequence impedances can differ from each other only in the case of rotating machines. In this section, where far-from-generator short circuits are calculated, it is generally allowed to take $Z_{(2)} = Z_{(1)}$.

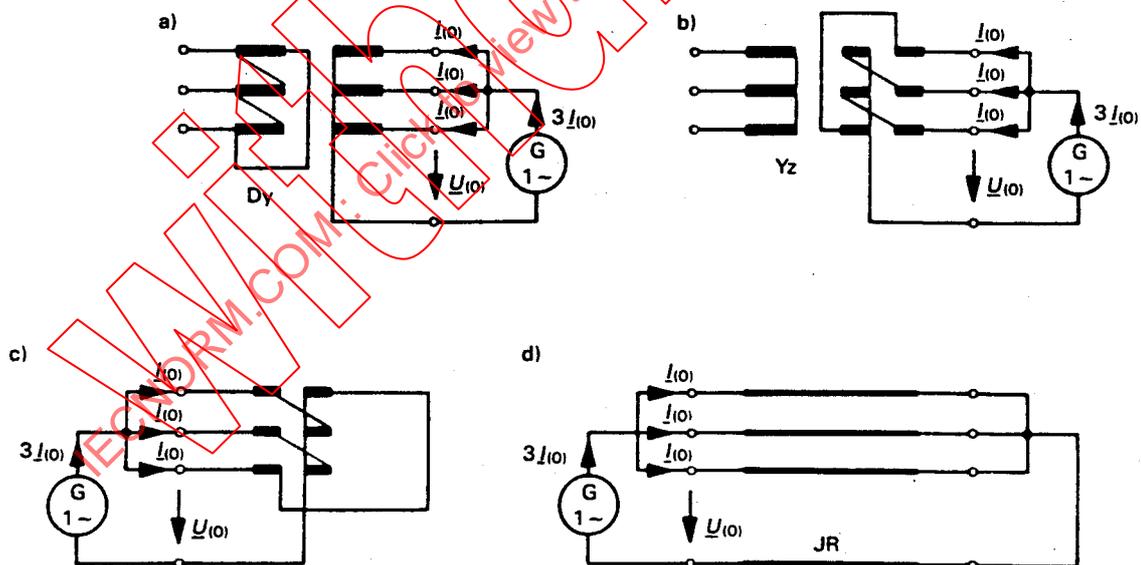
The zero-sequence short-circuit impedance $Z_{(0)}$ at the short-circuit location F is obtained according to Figure 4c, page 27, if an a.c. voltage is applied between the short-circuited lines and the common returns (e. g. earth system, neutral conductor, earth wires, cable sheaths, cable armouring).

When calculating unbalanced short-circuit currents in medium or high-voltage systems and applying an equivalent voltage source at the short-circuit location, the line zero-sequence capacitances and zero-sequence parallel admittances of non-rotating loads are to be considered for isolated neutral systems and resonant earthed systems.

Neglecting the line zero-sequence capacitances in earthed neutral systems leads to results which are higher than the real values of the short-circuit currents. The deviation depends on several parameters of the system, for example the length of the line between transformers with neutral earthing.

In low-voltage systems, line capacitances and parallel admittances of non-rotating loads can be neglected.

Except for special cases, the zero-sequence short-circuit impedances differ from the positive-sequence short-circuit impedances.



- Transformer of vector group Dy.
- Transformer of vector group Yz.
- Neutral-earthing transformer in zig-zag connection.
- Line (overhead line or cable); JR: joint return.

FIG. 5. – Measuring of zero-sequence short-circuit impedances of electrical equipment (examples).

8.3.2 Impédances de court-circuit des matériels électriques

Pour les lignes d'alimentation du réseau, les transformateurs, les lignes aériennes, les câbles, les réactances et autres matériels similaires, les impédances de court-circuit directes et inverses sont égales:

$$\underline{Z}_{(1)} = \underline{U}_{(1)} / \underline{I}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)} = \underline{U}_{(2)} / \underline{I}_{(2)}$$

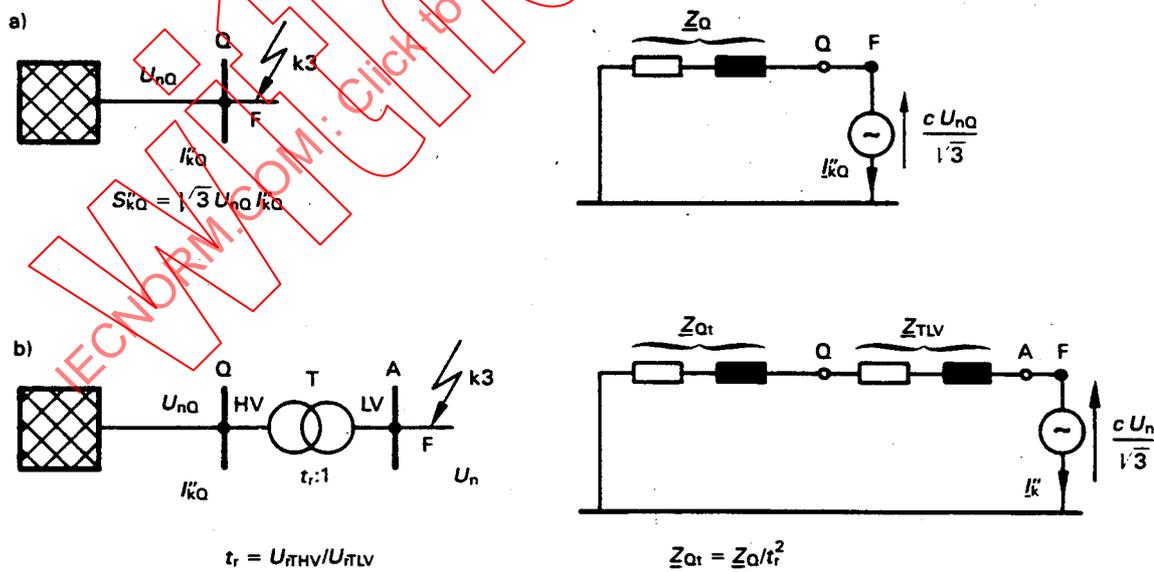
L'impédance de court-circuit homopolaire d'une ligne par exemple (voir figure 5d, page 32), $\underline{Z}_{(0)} = \underline{U}_{(0)} / \underline{I}_{(0)}$, se détermine en supposant qu'une tension alternative est appliquée entre les trois conducteurs en parallèle et le retour commun (par exemple terre, dispositif de mise à la terre, conducteur neutre, câble de terre, gaine et armure de câble). Dans ce cas, le courant circulant dans le retour commun est égal au triple du courant homopolaire.

Les impédances de court-circuit homopolaire diffèrent normalement des impédances directes: $\underline{Z}_{(0)}$ peut être supérieur, égal ou inférieur à $\underline{Z}_{(1)}$.

8.3.2.1 Réseau d'alimentation

Si un court-circuit, tel celui qui est indiqué dans la figure 6a, page 34, est alimenté par un réseau dont seuls la puissance de court-circuit symétrique initiale ou le courant de court-circuit symétrique initial sont connus et égaux respectivement à S_{kQ} et I_{kQ} au point de liaison Q à cette alimentation, il convient de déterminer l'impédance (directe) équivalente au réseau Z_Q par:

$$Z_Q = \frac{c U_{nQ}^2}{S_{kQ}} = \frac{c U_{nQ}}{\sqrt{3} I_{kQ}} \tag{5a}$$



- a) Sans transformateur.
- b) Avec transformateur.

FIG. 6. - Schémas du réseau et d'alimentation des circuits équivalents.

8.3.2 Short-circuit impedances of electrical equipment

In network feeders, transformers, overhead lines, cables, reactors and similar equipment, positive-sequence and negative-sequence short-circuit impedances are equal:

$$\underline{Z}_{(1)} = \underline{U}_{(1)} / \underline{I}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)} = \underline{U}_{(2)} / \underline{I}_{(2)}$$

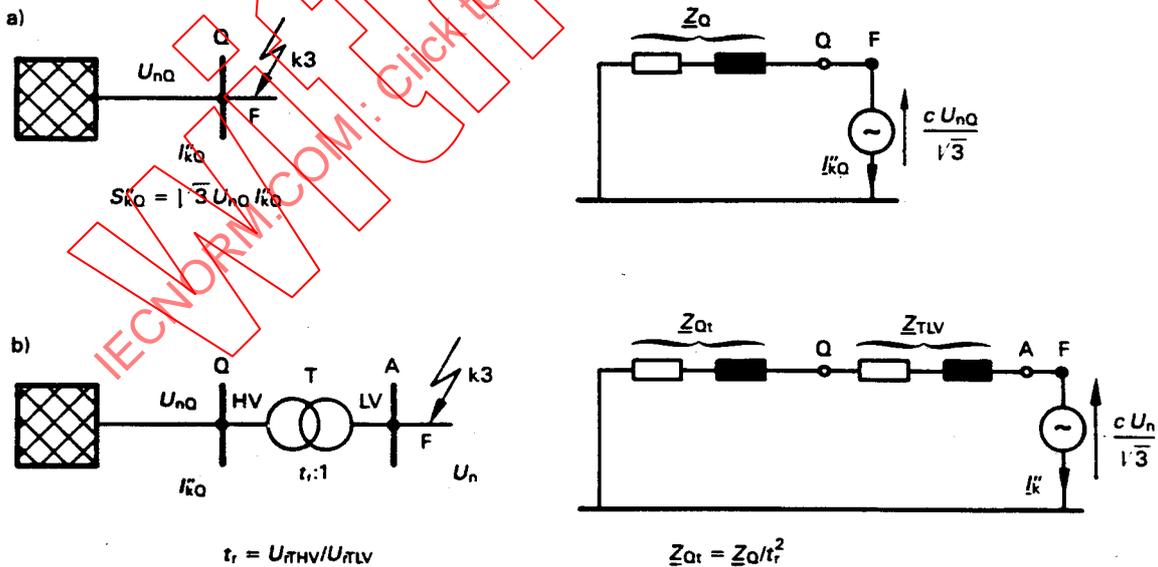
When calculating the zero-sequence short-circuit impedance of a line, for instance (see Figure 5d, page 33), $\underline{Z}_{(0)} = \underline{U}_{(0)} / \underline{I}_{(0)}$ is determined by assuming an a.c. voltage between the three paralleled conductors and the joint return (e.g. earth, earthing device, neutral conductor, earth wire, cable sheath and cable armoring). In this case, the three-fold zero-sequence current flows through the joint return.

Normally the zero-sequence short-circuit impedances differ from the positive-sequence short-circuit impedances: $\underline{Z}_{(0)}$ may be larger than, equal to or smaller than $\underline{Z}_{(1)}$.

8.3.2.1 Network feeders

If a short circuit in accordance with Figure 6a, page 35, is fed from a network in which only the initial symmetrical short-circuit power S''_{kQ} or the initial symmetrical short-circuit current I''_{kQ} at the feeder connection point Q is known, then the equivalent impedance Z_Q of the network (positive-sequence short-circuit impedance) at the feeder connection point Q should be determined by:

$$Z_Q = \frac{cU_{nQ}^2}{S''_{kQ}} = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3} I''_{kQ}} \tag{5a}$$



- a) Without transformer.
- b) With transformer.

FIG. 6. — System diagram and equivalent circuit diagram for network feeders.

Si un court-circuit, tel celui qui est indiqué dans la figure 6b, page 34, est alimenté, à travers un transformateur, par un réseau moyenne ou haute tension dont on ne connaît que la puissance de court-circuit symétrique initiale S''_{kQ} ou le courant de court-circuit symétrique initial I''_{kQ} au point de liaison Q à ce réseau, l'impédance équivalente Z_{Qt} rapportée au côté basse tension du transformateur peut être obtenue par:

$$Z_{Qt} = \frac{cU_{nQ}^2}{S''_{kQ}} \cdot \frac{1}{t_r^2} = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3} I''_{kQ}} \cdot \frac{1}{t_r^2} \quad (5b)$$

où:

U_{nQ} = tension nominale du réseau d'alimentation au point Q

S''_{kQ} = puissance apparente de court-circuit symétrique initiale du réseau d'alimentation au point Q

I''_{kQ} = courant de court-circuit symétrique initial du réseau d'alimentation au point Q

c = facteur de tension (voir paragraphe 3.16, tableau I et équation (2))

t_r = rapport de transformation assigné pour lequel le changeur de prise est en position principale (voir aussi paragraphe 8.4)

Dans le cas de réseaux d'alimentation de tensions nominales supérieures à 35 kV constitués de lignes aériennes, l'impédance équivalente Z_Q peut être assimilée à une réactance pure, c'est-à-dire $Z_Q = 0 + jX_Q$. Dans les autres cas, si aucune valeur précise de la résistance R_Q des lignes d'alimentation du réseau n'est fournie, on peut prendre $R_Q = 0,1 X_Q$ avec $X_Q = 0,995 Z_Q$.

La puissance de court-circuit symétrique initiale S''_{kQ} ou le courant de court-circuit symétrique initial I''_{kQ} , côté haute tension du transformateur d'alimentation, doit être fournie par le distributeur.

En général, les calculs n'exigent pas de connaître l'impédance de court-circuit homopolaire des lignes d'alimentation du réseau. Dans des cas particuliers, cependant, il peut être nécessaire de tenir compte de cette impédance.

8.3.2.2 Transformateurs

Les impédances de court-circuit directes des transformateurs à deux enroulements $Z_T = R_T + jX_T$ peuvent être calculées à partir des valeurs assignées comme suit:

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \quad (6)$$

$$R_T = \frac{u_{Rr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3I_{rT}^2} \quad (7)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (8)$$

où:

U_{rT} = tension assignée du transformateur, côté haute ou basse tension

I_{rT} = courant assigné du transformateur, côté haute ou basse tension

S_{rT} = puissance apparente assignée du transformateur

P_{krT} = pertes totales des enroulements du transformateur au courant assigné

u_{kr} = tension de court-circuit assignée, en pour-cent

u_{Rr} = tension résistive assignée, en pour-cent

Les données nécessaires peuvent être relevées sur la plaque signalétique ou obtenues auprès du constructeur.

La composante résistive peut être calculée à partir des pertes totales des enroulements au courant assigné.

If a short circuit in accordance with Figure 6b, page 35, is fed by a transformer from a medium or high-voltage network in which only the initial symmetrical short-circuit power S''_{kQ} or the initial symmetrical short-circuit current I''_{kQ} at the feeder connection point Q is known, then the equivalent impedance Z_{Qt} referred to the low-voltage side of the transformer may be determined by:

$$Z_{Qt} = \frac{cU_{nQ}^2}{S''_{kQ}} \cdot \frac{1}{t_r^2} = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3} I''_{kQ}} \cdot \frac{1}{t_r^2} \quad (5b)$$

where:

U_{nQ} = nominal system voltage at the feeder connection point Q

S''_{kQ} = initial symmetrical short-circuit apparent power at the feeder connection point Q

I''_{kQ} = initial symmetrical short-circuit current at the feeder connection point Q

c = voltage factor (see Sub-clause 3.16, Table I and Equation (2))

t_r = rated transformation ratio at which the tap-changer is in the main position (see also Sub-clause 8.4)

In the case of high-voltage feeders with nominal voltages above 35 kV fed by overhead lines, the equivalent impedance Z_Q may be considered as a reactance, i. e. $Z_Q = 0 + jX_Q$. In other cases, if no accurate value is known for the resistance R_Q of network feeders, one may substitute $R_Q = 0.1 X_Q$ where $X_Q = 0.995 Z_Q$.

The initial symmetrical short-circuit power S''_{kQ} or the initial symmetrical short-circuit current I''_{kQ} on the high-voltage side of the supply transformers shall be given by the supply company.

In general, the equivalent zero-sequence short-circuit impedance of network feeders is not required for calculations. In special cases, however, it may be necessary to consider this impedance.

8.3.2.2 Transformers

The positive-sequence short-circuit impedances of two-winding transformers $Z_T = R_T + jX_T$ can be calculated from the rated transformer data as follows:

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \quad (6)$$

$$R_T = \frac{u_{Rr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3I_{rT}^2} \quad (7)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (8)$$

where:

U_{rT} = rated voltage of the transformer on the high-voltage or low-voltage side

I_{rT} = rated current of the transformer on the high-voltage or low-voltage side

S_{rT} = rated apparent power of the transformer

P_{krT} = total loss of the transformer in the windings at rated current

u_{kr} = rated short-circuit voltage, in per cent

u_{Rr} = rated ohmic voltage, in per cent

The necessary data may be taken from rating plates or obtained from the manufacturer.

The resistive component can be calculated from the total loss in the windings at the rated current.

Le rapport X/R croît généralement avec la taille du transformateur. Pour les gros transformateurs, la résistance est si petite que, dans les calculs d'amplitude des courants de court-circuit, l'impédance peut être assimilée à la seule réactance. La résistance doit être prise en compte lorsqu'il y a lieu de calculer le courant de crête i_p ou la composante apériodique décroissante i_{DC} .

L'impédance de court-circuit homopolaire $\underline{Z}_{(0)T} = R_{(0)T} + jX_{(0)T}$ des transformateurs à deux ou plus de deux enroulements peut être obtenue auprès du constructeur.

Note. - Pour les transformateurs équipés de changeurs de prise, il suffit de calculer Z_T d'après la formule (6) pour la position principale du changeur et de convertir les impédances, courants et tensions d'après le paragraphe 8.4, au moyen du rapport de transformateurs assigné t_r correspondant au changeur en position principale.

Des précautions particulières ne sont nécessaires que si:

- pour un court-circuit à alimentation unique, le courant de court-circuit est de même sens que le courant de charge préexistant (court-circuit côté basse tension d'un transformateur ou de transformateurs en parallèle avec changeurs de prise, conformément à la figure 3, page 24, et à la figure 6b, page 34),
- il est possible de changer le rapport de transformation d'un transformateur avec changeur de prise à large plage $U_{THV} = U_{rTHV} (1 \pm p_T)$, avec $p_T > 0,05$,
- la tension de court-circuit minimale $u_{k\ min}$ est beaucoup plus petite que la tension de court-circuit assignée, correspondant à la position principale du changeur de prise ($u_{k\ min} < u_{kr}$),
- la tension en cours de fonctionnement est nettement plus élevée que la tension nominale du réseau ($U \geq 1,05 U_n$).

Pour les transformateurs à trois enroulements, les impédances de court-circuit directes \underline{Z}_A , \underline{Z}_B et \underline{Z}_C , correspondant à la figure 7, page 40, peuvent être calculées à partir des trois impédances de court-circuit (rapportées à l'enroulement A du transformateur).

$$\underline{Z}_{AB} = \frac{u_{krAB}}{100\%} \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAB}} \quad (\text{borne C ouverte}) \quad (9a)$$

$$\underline{Z}_{AC} = \frac{u_{krAC}}{100\%} \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAC}} \quad (\text{borne B ouverte}) \quad (9b)$$

$$\underline{Z}_{BC} = \frac{u_{krBC}}{100\%} \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTBC}} \quad (\text{borne A ouverte}) \quad (9c)$$

suivant les formules:

$$\underline{Z}_A = \frac{1}{2} (\underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{AC} - \underline{Z}_{BC}) \quad (10a)$$

$$\underline{Z}_B = \frac{1}{2} (\underline{Z}_{BC} + \underline{Z}_{AB} - \underline{Z}_{AC}) \quad (10b)$$

$$\underline{Z}_C = \frac{1}{2} (\underline{Z}_{AC} + \underline{Z}_{BC} - \underline{Z}_{AB}) \quad (10c)$$

où:

U_{rTA} = tension assignée

S_{rTAB} = puissance apparente assignée entre les bornes A et B

S_{rTAC} = puissance apparente assignée entre les bornes A et C

S_{rTBC} = puissance apparente assignée entre les bornes B et C

u_{krAB} = tension de court-circuit assignée, en pour-cent, entre les bornes A et B

u_{krAC} = tension de court-circuit assignée, en pour-cent, entre les bornes A et C

u_{krBC} = tension de court-circuit assignée, en pour-cent, entre les bornes B et C

The ratio X/R generally increases with transformer size. For large transformers the resistance is so small that the impedance may be assumed to consist only of reactance when calculating short-circuit current magnitude. Resistance must be considered if the peak short-circuit current i_p or the decaying aperiodic component i_{DC} is to be calculated.

The zero-sequence short-circuit impedances $\underline{Z}_{(0)T} = R_{(0)T} + jX_{(0)T}$ of transformers with two or more windings may be obtained from the manufacturer.

Note. – It is sufficient for transformers with tap-changers to determine Z_T in accordance with formula (6) for the main position and to convert the impedances, currents and voltages according to Sub-clause 8.4 using the rated transformation ratio t_r corresponding to the tap-changer in the main position.

Special considerations are necessary, only if:

- a single fed short-circuit current is calculated and the short-circuit current has the same direction as the operational current before the short-circuit occurs (short circuit on the low-voltage side of one transformer or parallel transformers with tap changers according to Figure 3, page 25, or Figure 6b, page 35),
- it is possible to change the transformation ratio of a transformer with the tap changer in a wide range, $U_{THV} = U_{rTHV} (1 \pm p_T)$ with $p_T > 0.05$,
- the minimum short-circuit voltage $u_{k \min}$ is considerably lower than the rated short-circuit voltage in the main position ($u_{k \min} < u_{kr}$),
- the voltage during operation is considerably higher than the nominal system voltage ($U \geq 1.05 U_n$).

In the case of three-winding transformers, the positive-sequence short-circuit impedances \underline{Z}_A , \underline{Z}_B and \underline{Z}_C referring to Figure 7, page 41, can be calculated by the three short-circuit impedances (related to side A of the transformer):

$$\underline{Z}_{AB} = \frac{u_{krAB}}{100\%} \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAB}} \quad (\text{side C open}) \quad (9a)$$

$$\underline{Z}_{AC} = \frac{u_{krAC}}{100\%} \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAC}} \quad (\text{side B open}) \quad (9b)$$

$$\underline{Z}_{BC} = \frac{u_{krBC}}{100\%} \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTBC}} \quad (\text{side A open}) \quad (9c)$$

with the formulas:

$$\underline{Z}_A = \frac{1}{2} (\underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{AC} - \underline{Z}_{BC}) \quad (10a)$$

$$\underline{Z}_B = \frac{1}{2} (\underline{Z}_{BC} + \underline{Z}_{AB} - \underline{Z}_{AC}) \quad (10b)$$

$$\underline{Z}_C = \frac{1}{2} (\underline{Z}_{AC} + \underline{Z}_{BC} - \underline{Z}_{AB}) \quad (10c)$$

where:

U_{rTA} = rated voltage

S_{rTAB} = rated apparent power between sides A and B

S_{rTAC} = rated apparent power between sides A and C

S_{rTBC} = rated apparent power between sides B and C

u_{krAB} = rated short-circuit voltage, given in percent, between sides A and B

u_{krAC} = rated short-circuit voltage, given in percent, between sides A and C

u_{krBC} = rated short-circuit voltage, given in percent, between sides B and C

8.3.2.3 Lignes aériennes et câbles

Les impédances de court-circuit directes $\underline{Z}_L = R_L + jX_L$ peuvent être calculées à partir des données relatives aux conducteurs, telles que sections et distances entre axes des conducteurs.

Pour la mesure de l'impédance de court-circuit homopolaire, $\underline{Z}_{(0)} = R_{(0)} + jX_{(0)}$, se reporter au paragraphe 8.3.2 et à la figure 5d, page 32. Il est quelquefois possible de déterminer les impédances homopolaires à partir des rapports $R_{(0)L}/R_L$ et $X_{(0)L}/X_L$.

Les impédances $\underline{Z}_{(1)L}$ et $\underline{Z}_{(0)L}$ des câbles basse et haute tensions dépendent des techniques et normes nationales et peuvent être extraites des manuels ou des données fournies par les constructeurs.

La résistance effective par unité de longueur R'_L des lignes aériennes à la température moyenne des conducteurs de 20 °C peut se calculer au moyen de la section nominale q_n et de la résistivité ρ , soit:

$$R'_L = \frac{\rho}{q_n} \quad (11)$$

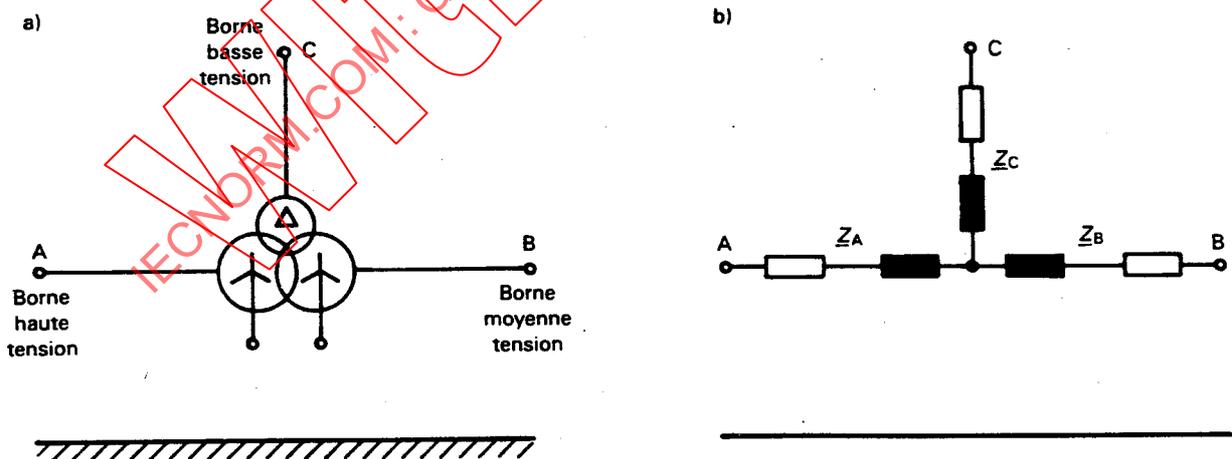
avec:

$$\rho = \frac{1}{54} \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}} \text{ pour le cuivre}$$

$$\rho = \frac{1}{34} \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}} \text{ pour l'aluminium}$$

et

$$\rho = \frac{1}{31} \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}} \text{ pour l'alliage d'aluminium}$$



- a) Indication des couplages des enroulements.
- b) Schéma du circuit équivalent (système direct).

FIG. 7. – Transformateur à trois enroulements (exemple).

8.3.2.3 Overhead lines and cables

The positive-sequence short-circuit impedances $\underline{Z}_L = R_L + jX_L$ may be calculated from the conductor data, such as the cross sections and the centre-distances of the conductors.

For measurement of the zero-sequence short-circuit impedances $\underline{Z}_{(0)} = R_{(0)} + jX_{(0)}$, see Sub-clause 8.3.2 and Figure 5d, page 33. Sometimes it is possible to calculate the zero-sequence impedances with the ratios $R_{(0)L}/R_L$ et $X_{(0)L}/X_L$.

The impedances $\underline{Z}_{(1)L}$ and $\underline{Z}_{(0)L}$ of low-voltage and high-voltage cables depend on national techniques and standards and may be taken from text-books or manufacturer's data.

The effective resistance per unit length R'_L of overhead lines at the medium conductor temperature 20 °C may be calculated from the nominal cross section q_n and the resistivity ρ :

$$R'_L = \frac{\rho}{q_n} \tag{11}$$

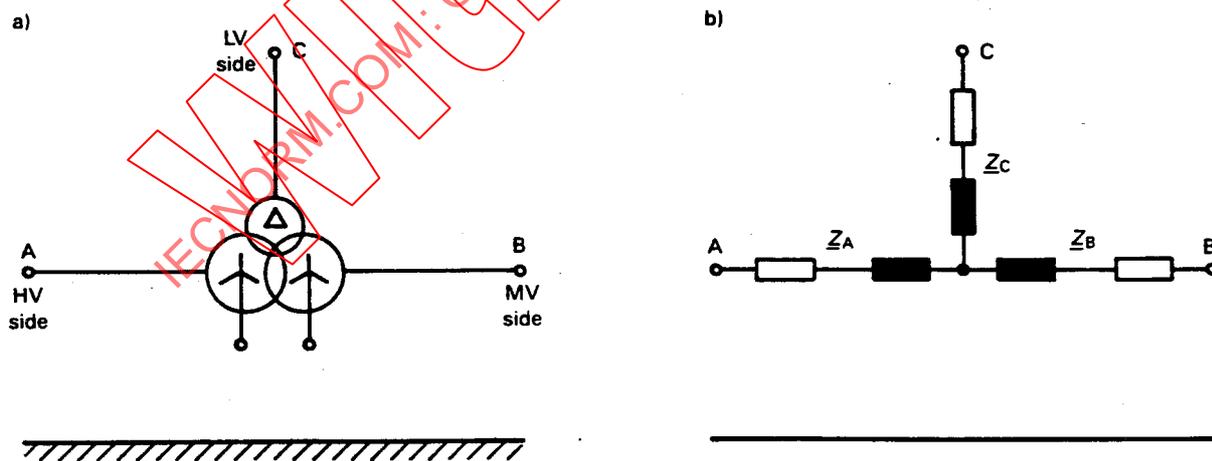
with:

$$\rho = \frac{1}{54} \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}} \text{ for copper}$$

$$\rho = \frac{1}{34} \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}} \text{ for aluminium}$$

and

$$\rho = \frac{1}{31} \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}} \text{ for aluminium alloy}$$



a) Denotation of winding connections.
 b) Equivalent circuit diagram (positive-sequence system).

FIG. 7. - Three-winding transformer (example).

La réactance par unité de longueur X'_L des lignes aériennes peut se calculer, s'il y a transposition, par:

$$X'_L = 2\pi f \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{0,25}{n} + \ln \frac{d}{r} \right) = f \mu_0 \left(\frac{0,25}{n} + \ln \frac{d}{r} \right) \quad (12a)$$

où:

$d = \sqrt[3]{d_{L1 L2} d_{L2 L3} d_{L3 L1}}$ distance géométrique moyenne entre conducteurs, ou entre axes de faisceaux

r = rayon du conducteur, supposé seul. Dans le cas de faisceaux de conducteurs, r est à remplacer par $\sqrt[n]{nrR^{n-1}}$, où R est le rayon du faisceau

n = nombre de conducteurs en faisceau; pour un seul conducteur $n = 1$

Soit $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-4}$ H/km la perméabilité du vide, l'équation (12a) se simplifie et devient:

$$\text{pour } f = 50 \text{ Hz, } X'_L = 0,0628 \left(\frac{0,25}{n} + \ln \frac{d}{r} \right) \Omega/\text{km} \quad (12b)$$

$$\text{pour } f = 60 \text{ Hz, } X'_L = 0,0754 \left(\frac{0,25}{n} + \ln \frac{d}{r} \right) \Omega/\text{km} \quad (12c)$$

8.3.2.4 Réactances de limitation du courant de court-circuit

Les impédances de court-circuit directe, inverse et homopolaire sont égales, s'il y a symétrie géométrique. Les réactances de limitation du courant de court-circuit doivent être traitées comme faisant partie de l'impédance de court-circuit.

8.3.2.5 Moteurs

Les moteurs synchrones doivent être traités comme des alternateurs synchrones (voir section deux).

Les moteurs asynchrones des réseaux basse et moyenne tensions contribuent au courant de court-circuit au point de défaut. Lors de courts-circuits triphasés symétriques, les courants de court-circuit des moteurs asynchrones décroissent rapidement.

Il n'y a pas lieu de prendre en compte les moteurs ou groupes de moteurs asynchrones dont la somme des courants assignés est inférieure à 1% du courant de court-circuit symétrique initial I'_k calculé sans la contribution des moteurs. Le supplément de courant de court-circuit dû aux moteurs asynchrones, par rapport à I'_k peut être négligé si:

$$\Sigma I_{TM} \leq 0,01 I'_k \quad (13)$$

où:

ΣI_{TM} = somme des courants assignés des moteurs situés dans le voisinage du point de défaut (voir section deux, paragraphe 11.5.3.5)

I'_k = courant de court-circuit au point de défaut sans contribution des moteurs

Dans les autres cas, se reporter à la section deux.

The reactance per unit length X'_L for overhead lines may be calculated, assuming transposition, from:

$$X'_L = 2\pi f \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{0.25}{n} + \ln \frac{d}{r} \right) = f \mu_0 \left(\frac{0.25}{n} + \ln \frac{d}{r} \right) \quad (12a)$$

where:

$d = \sqrt[3]{d_{L1 L2} d_{L2 L3} d_{L3 L1}}$ geometric mean distance between conductors, respectively the centre of bundles

r = radius of a single conductor. In the case of conductor bundles, r is to be substituted by $\sqrt[nrR^{n-1}]$, with the bundle radius R

n = number of bundled conductors; for single conductors $n = 1$

Taking $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-4}$ H/km as the permeability of a vacuum, equation (12a) may be simplified as follows:

$$\text{for } f = 50 \text{ Hz, } X'_L = 0.0628 \left(\frac{0.25}{n} + \ln \frac{d}{r} \right) \Omega/\text{km} \quad (12b)$$

$$\text{for } f = 60 \text{ Hz, } X'_L = 0.0754 \left(\frac{0.25}{n} + \ln \frac{d}{r} \right) \Omega/\text{km} \quad (12c)$$

8.3.2.4 Short-circuit current limiting reactors

The positive-sequence, the negative-sequence and the zero-sequence short-circuit impedances are equal, assuming geometric symmetry. Short-circuit current limiting reactors shall be treated as a part of the short-circuit impedance.

8.3.2.5 Motors

Synchronous motors are to be treated as synchronous generators (see Section Two).

Asynchronous motors in low-voltage and medium-voltage systems supply short-circuit currents to the short-circuit location. In the case of three-phase balanced short circuits, the short-circuit currents of asynchronous motors decay rapidly.

It is not necessary to take into account asynchronous motors or groups of asynchronous motors which have a total rated current less than 1% of the initial symmetrical short-circuit current I'_k calculated without the influence of motors. The supplement of short-circuit currents of asynchronous motors to the current I'_k may be neglected if:

$$\Sigma I_{TM} \leq 0.01 I'_k \quad (13)$$

where:

ΣI_{TM} = sum of the rated currents of motors in the neighbourhood of the short-circuit location (see Section Two, Sub-clause 11.5.3.5)

I'_k = short-circuit current at the short-circuit location without the influence of motors

In other cases see Section Two.

8.4 Conversion des impédances, courants et tensions

Lorsqu'on calcule des courants de court-circuit dans des réseaux de niveaux de tension différents, il est nécessaire de convertir les impédances, courants et tensions d'un niveau à un autre (voir par exemple la figure 3b, page 24). Pour les calculs en valeurs réduites (par unité) ou selon des systèmes analogues, aucune conversion n'est nécessaire si ces systèmes sont cohérents.

La conversion s'effectue en divisant ou en multipliant les impédances des matériels des réseaux en amont ou en aval par le carré du rapport de transformation assigné t_r ou, dans certains cas, par le carré du rapport de transformation t correspondant à sa position réelle, si celle-ci est connue.

Les tensions et courants de ces réseaux sont à diviser par le rapport de transformation t_r ou t .

9. Calcul des courants de court-circuit

9.1 Méthode de calcul des courts-circuits symétriques

9.1.1 Court-circuit triphasé à simple alimentation

9.1.1.1 Courant de court-circuit symétrique initial I'_k

Comme il est indiqué dans la figure 3, page 24, la valeur initiale du courant de court-circuit triphasé symétrique est donnée par:

$$I'_k = \frac{cU_n}{\sqrt{3} \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} = \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_k} \quad (14)$$

où:

$cU_n/\sqrt{3}$ = Source de tension équivalente (voir article 6)

$R_k = R_{Q1} + R_T + R_L$ = somme des résistances d'une phase placées en série comme il est indiqué à la figure 3b, page 24. R_k est la résistance du conducteur de ligne à 20 °C (voir paragraphe 8.3.2)

$X_k = X_{Q1} + X_T + X_L$ = somme des réactances d'une phase placées en série, comme il est indiqué à la figure 3b (voir paragraphe 8.3.2)

$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2}$ = impédance de court-circuit (voir paragraphe 8.3.1)

On peut négliger les résistances R_k inférieures à environ $0,3 X_k$. L'impédance de l'alimentation $Z_{Q1} = R_{Q1} + jX_{Q1}$ doit être rapportée à la tension du côté du transformateur où le court-circuit a lieu et se calcule au moyen des équations (5a) et (5b) et des indications complémentaires du paragraphe 8.3.2.1.

Dans le cadre de la section un, on a:

$$I_k = I_b = I'_k \quad (15)$$

9.1.1.2 Valeur de crête i_p du courant de court-circuit

Le court-circuit étant alimenté par un circuit série, la valeur de crête du courant de court-circuit s'écrit:

$$i_p = \kappa \sqrt{2} I'_k \quad (16)$$

8.4 Conversion of impedances, currents and voltages

When calculating short-circuit currents in systems with different voltage levels, it is necessary to convert impedances, currents and voltages from one level to the other (e. g. see Figure 3b, page 25). For per unit or other similar unit systems no conversion is necessary, if these systems are coherent.

The impedances of the equipment in superimposed or subordinated networks are to be divided or multiplied by the square of the rated transformation ratio t_r or in special cases by the square of the transformation ratio t , corresponding to the actual position if it is known.

Voltages and currents are to be converted by the rated transformation ratio t_r or t .

9. Calculation of short-circuit currents

9.1 Calculation method for balanced short circuits

9.1.1 Single fed three-phase short circuit

9.1.1.1 Initial symmetrical short-circuit current I'_k

In accordance with Figure 3, page 25, the three-phase initial symmetrical short-circuit current I'_k becomes:

$$I'_k = \frac{cU_n}{\sqrt{3} \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} = \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_k} \quad (14)$$

where:

$cU_n/\sqrt{3}$ = equivalent voltage source (see Clause 6)

$R_k = R_{O1} + R_T + R_L$ = sum of series-connected resistances in accordance with Figure 3b, page 25, R_L is the line resistance for a conductor temperature of 20 °C (see Sub-clause 8.3.2)

$X_k = X_{O1} + X_T + X_L$ = sum of series-connected reactances in accordance with Figure 3b (see Sub-clause 8.3.2)

$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2}$ = short-circuit impedance (see Sub-clause 8.3.1)

Resistances of the order of $R_k < 0.3 X_k$ may be neglected. The impedance of the system feeder $Z_{O1} = R_{O1} + jX_{O1}$, referred to the voltage of that transformer side where the short circuit occurs, is to be calculated according to equations (5a) and (5b) and additional information in Sub-clause 8.3.2.1.

The scope of Section One supports the following equation:

$$I_k = I_b = I'_k \quad (15)$$

9.1.1.2 Peak short-circuit current i_p

Because the short circuit is fed by a series circuit, the peak short-circuit current can be expressed by:

$$i_p = \kappa \sqrt{2} I'_k \quad (16)$$

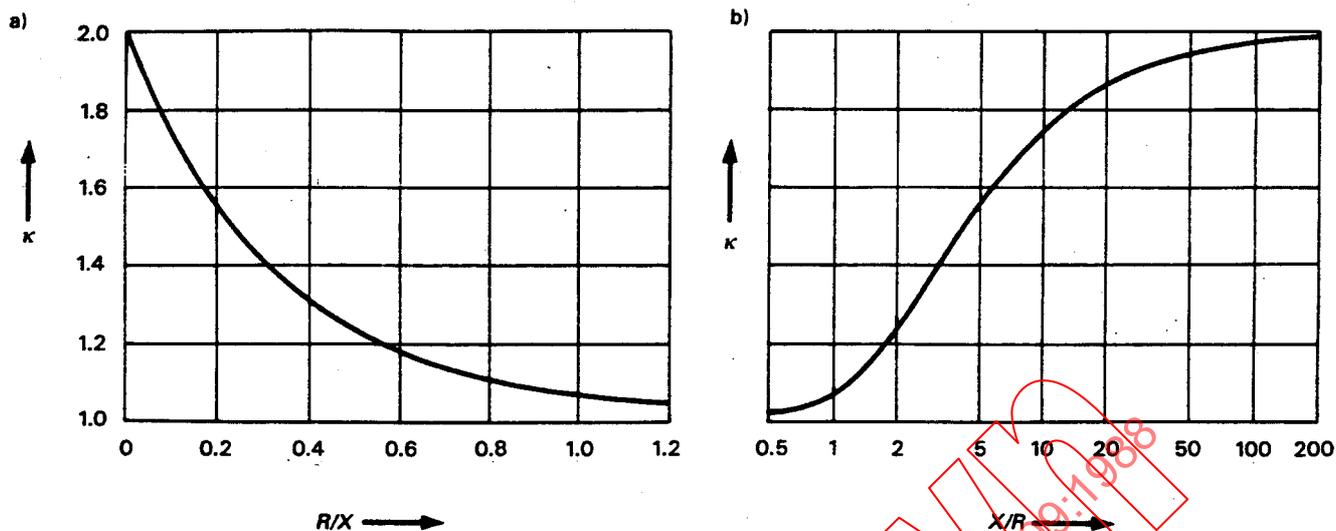


FIG. 8. — Facteur κ pour les circuits série en fonction:
a) du rapport R/X ; b) du rapport X/R .

Le facteur κ en fonction des rapports R/X ou X/R est donné par la figure 8.

Il peut également être calculé par la formule approchée:

$$\kappa \approx 1,02 + 0,98 e^{-3R/X}$$

9.1.2 Court-circuit triphasé alimenté par des sources non maillées

9.1.2.1 Courant de court-circuit symétrique initial I'_k

Le courant de court-circuit symétrique initial I'_k , le courant symétrique coupé I_b et le courant de court-circuit permanent I_k au point de défaut F alimenté par des sources non maillées, comme il est indiqué à la figure 9, page 48, s'obtiennent en faisant la somme des courants de court-circuit des différentes branches, courants qui sont indépendants les uns des autres:

$$I'_k = I'_{kT1} + I'_{kT2} \quad (17)$$

$$I_k = I_b = I'_k \quad (18)$$

Les courants de court-circuit de chaque branche sont à calculer en tant que courants de court-circuit triphasé, conformément au paragraphe 9.1.1.

Note. — Le courant de court-circuit au point de défaut F est la somme géométrique des courants de branche. Dans la plupart des cas, les angles de phase de ces courants sont très voisins. Le courant de court-circuit en F est alors égal à la somme algébrique des courants de branche.

Les impédances entre le point de défaut F et le jeu de barres B, où les courants de court-circuit des branches se rejoignent, conformément à la figure 9, peuvent être négligées si elles sont inférieures à $0,05 U_n / (\sqrt{3} I'_{kB})$, expression dans laquelle I'_{kB} est le courant de court-circuit triphasé symétrique initial sur le jeu de barres déterminé par l'équation (17). Dans tous les autres cas, le calcul s'effectue comme indiqué au paragraphe 9.1.3.

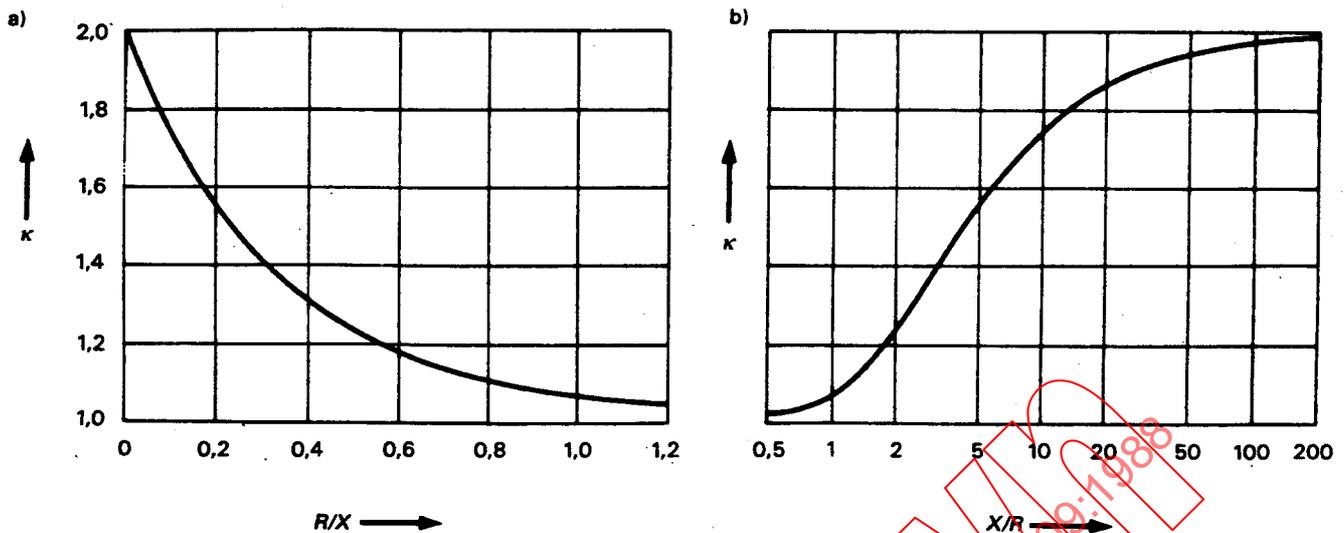


FIG. 8. — Factor κ for series circuits as a function of:
a) ratio R/X ; b) ratio X/R .

The factor κ for the ratios R/X and X/R is taken from Figure 8.

The factor κ may also be calculated by the approximate equation:

$$\kappa \approx 1.02 + 0.98 e^{-3R/X}$$

9.1.2 Three-phase short circuit fed from non-meshed sources

9.1.2.1 Initial symmetrical short-circuit current I'_k

The initial symmetrical short-circuit current I'_k , the symmetrical breaking current I_b and the steady-state short-circuit current I_k at the short-circuit location F, fed from sources which are not meshed with one another in accordance with Figure 9, page 49, may be composed of the various separate branch short-circuit currents which are independent of each other:

$$I'_k = I'_{kT1} + I'_{kT2} \quad (17)$$

$$I_k = I_b = I'_k \quad (18)$$

The branch short-circuit currents are to be calculated like a single-fed three-phase short-circuit current in accordance with Sub-clause 9.1.1.

Note. — The short-circuit current at the short-circuit location F is the phasor sum of the branch short-circuit currents. In most cases the phase angles of the branch short-circuit currents are nearly the same. The short-circuit current at F is then equal to the algebraic sum of the branch short-circuit currents.

Impedances between the short-circuit location F and the busbar B, where the branch short-circuit currents flow together as shown in Figure 9, may be neglected if they are smaller than $0.05 U_n / (\sqrt{3} I'_{kB})$, where I'_{kB} is the initial symmetrical short-circuit current on the busbar determined by equation (17) with a three-phase busbar short circuit. In all other cases, calculations are made in accordance with Sub-clause 9.1.3.

9.1.2.2 Valeur de crête i_p du courant de court-circuit

La valeur de crête i_p du courant de court-circuit au point de défaut F, alimenté par des sources non maillées, conformément à la figure 9, peut s'obtenir en faisant la somme des courants de branche i_{pT1} et i_{pT2} , soit:

$$i_p = i_{pT1} + i_{pT2} \tag{19}$$

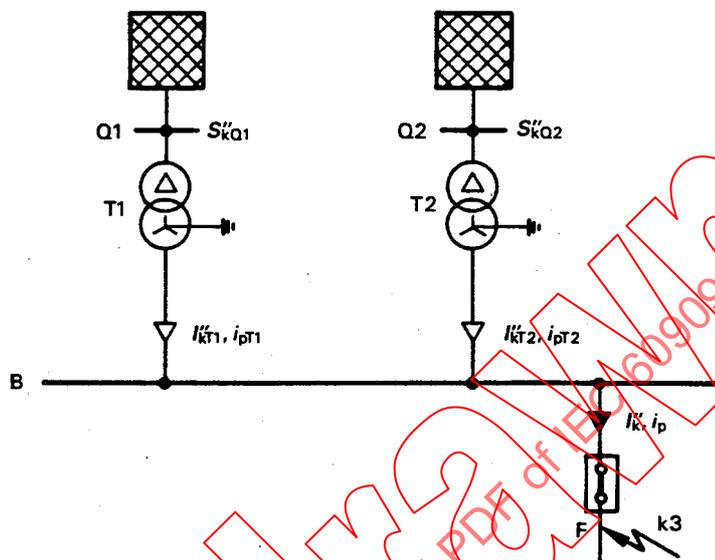


FIG. 9. — Schéma de réseau illustrant un court-circuit alimenté par plusieurs sources indépendantes les unes des autres. (Dans certains cas, l'impédance entre le jeu de barres B et le point de défaut F peut être négligée.)

9.1.3 Courts-circuits triphasés dans les réseaux maillés

9.1.3.1 Courant de court-circuit symétrique initial I'_k

Conformément à l'exemple indiqué dans la figure 10, page 50, la source de tension équivalente $cU_n/\sqrt{3}$ est localisée au point de défaut et constitue la seule source de tension active du réseau.

Le calcul s'effectue comme il est indiqué au paragraphe 8.3.1 et dans la figure 4a, page 26, plus spécialement (impédance de court-circuit directe vue du point de défaut F). En général, il est nécessaire, pour déterminer l'impédance de court-circuit $Z_k = Z_{(1)}$, de transformer le réseau (liaisons en série, en parallèle, conversion triangle-étoile par exemple) à partir des impédances directes des matériels électriques (voir paragraphe 8.3.2).

Toutes les impédances sont rapportées à la basse tension des transformateurs (voir figure 10). La ligne d'alimentation du réseau se traite conformément au paragraphe 8.3.2.1.

$$I'_k = \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_k} = \frac{cU_n}{\sqrt{3} \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \tag{20}$$

où:

$cU_n/\sqrt{3}$ = source de tension équivalente (voir article 6)

Z_k = impédance de court-circuit, d'après le paragraphe 8.3.1 et la figure 4a, page 26

Pour le calcul de I_b et I_k , se reporter à l'équation (15).

9.1.2.2 Peak short-circuit current i_p

The peak short-circuit current i_p at the short-circuit location F, fed from sources which are not meshed with one another in accordance with Figure 9, may be composed of the branch short-circuit currents i_{pT1} and i_{pT2} :

$$i_p = i_{pT1} + i_{pT2} \quad (19)$$

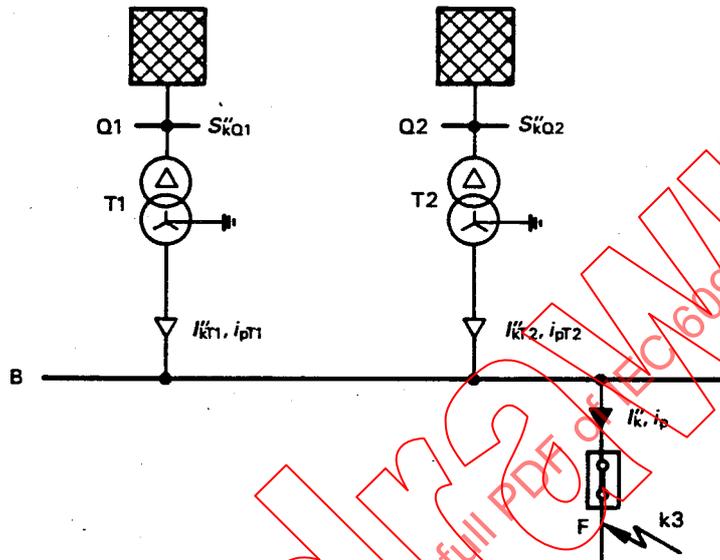


FIG. 9. – System diagram illustrating a short circuit fed from several sources which are independent of one another. (In some cases the impedance between busbar B and the short-circuit location F may be neglected.)

9.1.3 Three-phase short circuits in meshed networks

9.1.3.1 Initial symmetrical short-circuit current I'_k

In accordance with the example shown in Figure 10, page 51, the equivalent voltage source $cU_n/\sqrt{3}$ is established at the short-circuit location as the only active voltage in the network.

The calculation is to be carried out in accordance with Sub-clause 8.3.1, especially with Figure 4a, page 27 (positive-sequence short-circuit impedance at the short-circuit location F). It is generally necessary to ascertain the short-circuit impedance $Z_k = Z_{(1)}$, by network transformation (e.g. series connection, parallel connection and deltastar transformation) considering the positive-sequence short-circuit impedances of electrical equipment (see Sub-clause 8.3.2).

All impedances are referred to the low-voltage side of the transformers (see Figure 10). The network feeder is treated in accordance with Sub-clause 8.3.2.1.

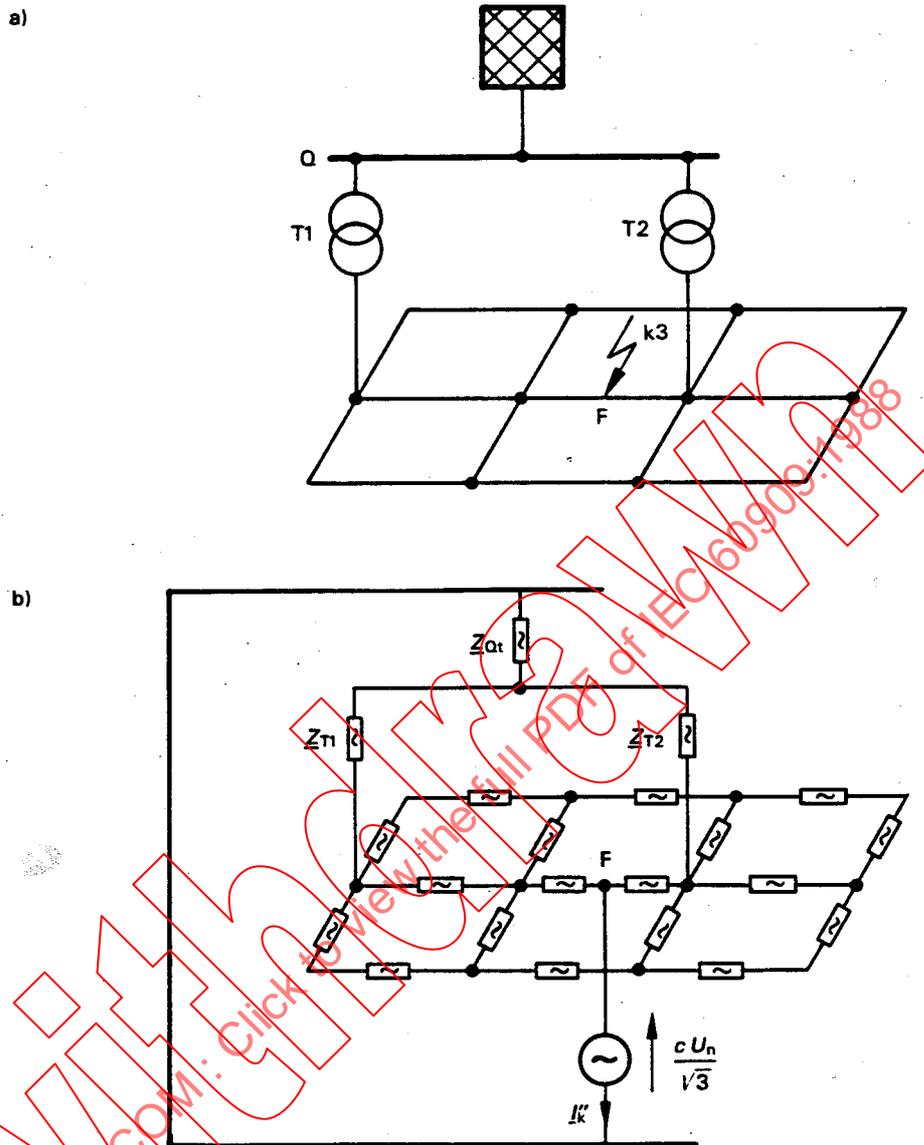
$$I'_k = \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_k} = \frac{cU_n}{\sqrt{3} \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (20)$$

where:

$cU_n/\sqrt{3}$ = equivalent voltage source (see Clause 6)

Z_k = short-circuit impedance, according to Sub-clause 8.3.1 and Figure 4a, page 27

For the calculation of I_b and I_k , see Equation (15).

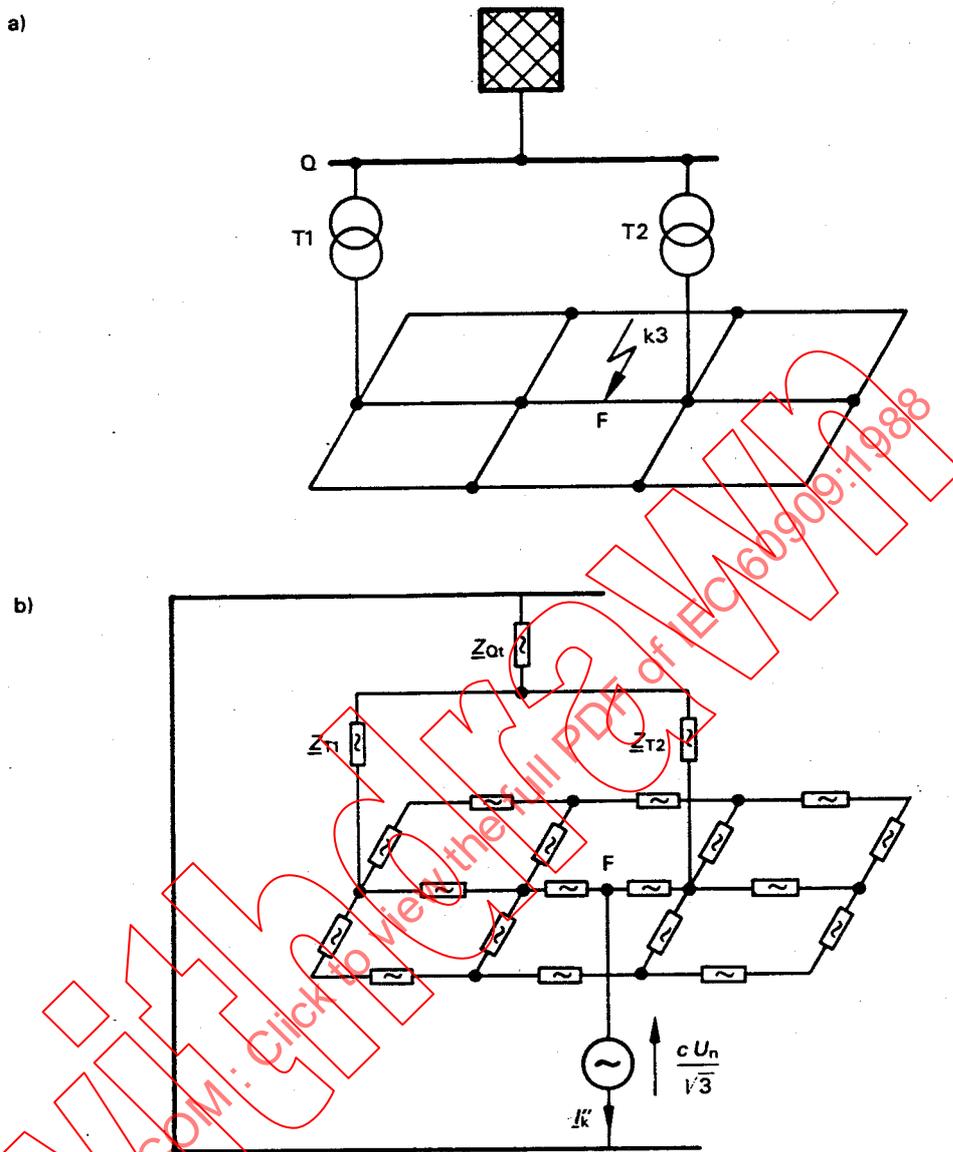


a) Schéma du réseau.
 b) Schéma du circuit équivalent alimenté par la source de tension équivalente, conformément à l'article 6.
 Z_{Qt} , Z_{T1} , Z_{T2} = impédances calculées côté basse tension des transformateurs.

Fig. 10. – Illustration du calcul du courant de court-circuit symétrique initial I''_k dans un réseau maillé. Le courant de court-circuit au point de défaut F est alimenté par le point Q de liaison à la source à travers les transformateurs T1 et T2.

9.1.3.2 Valeur de crête i_p du courant de court-circuit

Le calcul de la valeur de crête i_p du courant de court-circuit dans les réseaux maillés s'effectue au moyen de l'équation (16) et en choisissant l'une des approximations A, B ou C ci-après, afin d'obtenir une valeur de κ correcte. Si l'on n'a pas besoin d'une grande précision, la méthode A convient.



a) System diagram.
 b) Equivalent circuit diagram with the equivalent voltage source in accordance with Clause 6.
 Z_{Q1} , Z_{T1} , Z_{T2} = impedances referred to the low-voltage side of the transformers.

FIG. 10. - Illustration of the calculation of the initial symmetrical short-circuit current I''_k in a meshed network. The short-circuit current at the short-circuit location F is supplied by the feeder connection point Q through transformers T1 and T2.

9.1.3.2 Peak short-circuit current i_p

For the calculation of the peak short-circuit current i_p in meshed networks Equation (16) is used and one of the following approximations A, B, or C is chosen to find a suitable value for κ . If high accuracy is not needed, the Method A is sufficient.

Méthode A – Rapport R/X ou X/R uniforme: prendre $\kappa = \kappa_a$.

Le facteur κ_a est donné par la figure 8, page 46, en prenant la plus petite valeur du rapport R/X (ou la plus grande valeur du rapport X/R) de toutes les branches du réseau.

Il est suffisant de choisir les branches qui, ensemble, véhiculent au moins 80% du courant total au point de défaut calculé à la tension nominale correspondante. Chaque branche peut être une combinaison de plusieurs éléments en série.

Dans les réseaux basse tension, la valeur de κ_a est limitée à 1,8.

Méthode B – Rapport R/X ou X/R au point de défaut:

Le facteur κ est donné par:

$$\kappa = 1,15 \kappa_b \tag{21}$$

où 1,15 est un coefficient de sécurité couvrant les imprécisions introduites par l'emploi du rapport R/X déduit de la réduction du réseau maillé en impédances complexes.

Le facteur κ_b est donné par la figure 8 pour le rapport R/X déduit de l'impédance $Z_k = R_k + jX_k$ au point de défaut F, calculée à la fréquence de 50 Hz ou 60 Hz.

Pour les réseaux basse tension, la valeur de $1,15 \kappa_b$ est limitée à 1,8 et pour les réseaux haute tension à 2,0.

Méthode C – Fréquence équivalente f_c : prendre $\kappa = \kappa_c$.

Le facteur κ_c est donné par la figure 8, pour le rapport:

$$\frac{R}{X} = \frac{R_c}{X_c} \cdot \frac{f_c}{f} \tag{22a}$$

$$\frac{X}{R} = \frac{X_c}{R_c} \cdot \frac{f}{f_c} \tag{22b}$$

où:

$$Z_c = R_c + jX_c$$

R_c = partie réelle de $Z_c \neq R$ à la fréquence industrielle
Résistance effective équivalente à la fréquence équivalente f_c vue du point de défaut

X_c = partie imaginaire de $Z_c \neq X$ à la fréquence industrielle
Réactance effective équivalente à la fréquence équivalente f_c vue du point de défaut

L'impédance équivalente $Z_c = R_c + j2 \pi f_c L_c$ est l'impédance vue du point de défaut lorsqu'une source de tension équivalente de fréquence f_c y est placée comme seule source de tension active du réseau.

La fréquence f_c vaut:

- pour les réseaux de fréquence nominale 50 Hz: $f_c = 20$ Hz,
- pour les réseaux de fréquence nominale 60 Hz: $f_c = 24$ Hz.

9.2 Méthode de calcul des courts-circuits biphasés et monophasés

Les types de courts-circuits considérés sont indiqués dans les figures 2b à 2d, page 22.

La figure 11, page 54, indique le type de court-circuit donnant lieu au plus fort courant quand la composante de courant alternatif est décroissante, c'est-à-dire si $Z_{(2)}/Z_{(1)} < 1$ (voir section deux).

La section un correspond à $Z_{(2)}/Z_{(1)} = 1$.

Method A – Uniform ratio R/X or X/R : use $\kappa = \kappa_a$.

The factor κ_a is determined from Figure 8, page 47, taking the smallest ratio of R/X or the largest ratio X/R of all branches of the network.

It is only necessary to choose the branches which together carry 80% of the current at the nominal voltage corresponding to the short-circuit location. Any branch may be a series combination of several elements.

In low-voltage networks the value κ_a is limited to 1.8.

Method B – Ratio R/X or X/R at the short-circuit location:

The factor κ is given by:

$$\kappa = 1.15 \kappa_b \quad (21)$$

where 1.15 is a safety factor to cover inaccuracies caused by using the ratio R/X from a meshed network reduction with complex impedances.

The factor κ_b is found from Figure 8 for the ratio R/X given by the short-circuit impedance $\underline{Z}_k = R_k + jX_k$ at the short-circuit location F, calculated with the frequency $f = 50$ Hz or $f = 60$ Hz.

In low-voltage networks the product $1.15 \kappa_b$ is limited to 1.8 and in high-voltage networks to 2.0.

Method C – Equivalent frequency f_c : use $\kappa = \kappa_c$.

The factor κ_c is found from Figure 8 for the ratio:

$$\frac{R}{X} = \frac{R_c}{X_c} \cdot \frac{f_c}{f} \quad (22a)$$

$$\frac{X}{R} = \frac{X_c}{R_c} \cdot \frac{f}{f_c} \quad (22b)$$

where:

$$\underline{Z}_c = R_c + jX_c$$

$$R_c = \text{Re} \{ \underline{Z}_c \} \neq R \text{ at power frequency}$$

Equivalent effective resistance for the equivalent frequency f_c as seen from the short-circuit location

$$X_c = \text{Im} \{ \underline{Z}_c \} \neq X \text{ at power frequency}$$

Equivalent effective reactance for the equivalent frequency f_c as seen from the short-circuit location

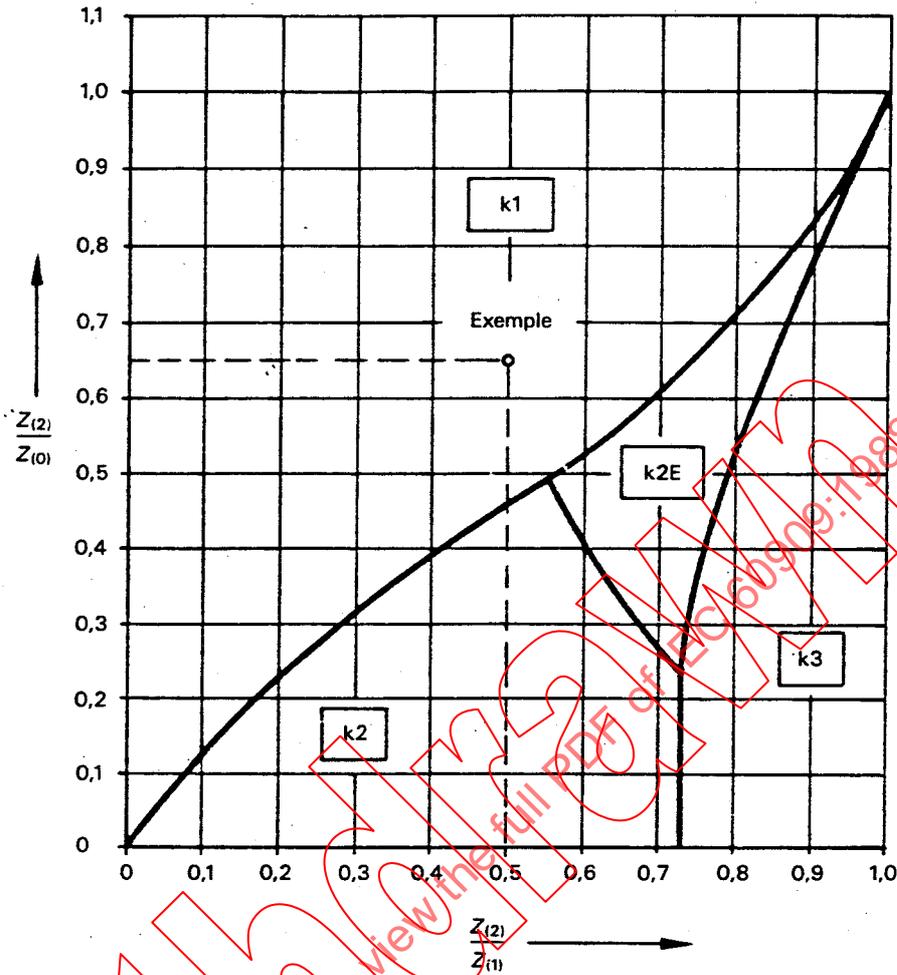
The equivalent impedance $\underline{Z}_c = R_c + j2\pi f_c L_c$ is the impedance as seen from the short-circuit location if an equivalent voltage source with the frequency $f_c = 20$ Hz (for a nominal frequency 50 Hz) or 24 Hz (for a nominal frequency 60 Hz) is applied there as the only active voltage.

9.2 Calculation method for line-to-line and line-to-earth short circuits

The types of short circuit considered are given in Figures 2b to 2d, page 23.

Figure 11, page 55, shows which type of short circuit leads to the highest short-circuit currents if the a.c. component decays, i. e. if $Z_{(2)}/Z_{(1)} < 1$ (see Section Two).

In Section One $Z_{(2)}/Z_{(1)} = 1$ is valid.



On suppose que les différences du rapport R/X pour les composantes directe et homopolaire sont petites.

Exemple:

$$Z_{(2)}/Z_{(1)} = 0,5$$

$$Z_{(2)}/Z_{(0)} = 0,65$$

Le court-circuit monophasé (k1) conduit au plus fort courant de court-circuit.

FIG. 11. — Diagramme indiquant le type de court-circuit donnant lieu au plus fort courant.

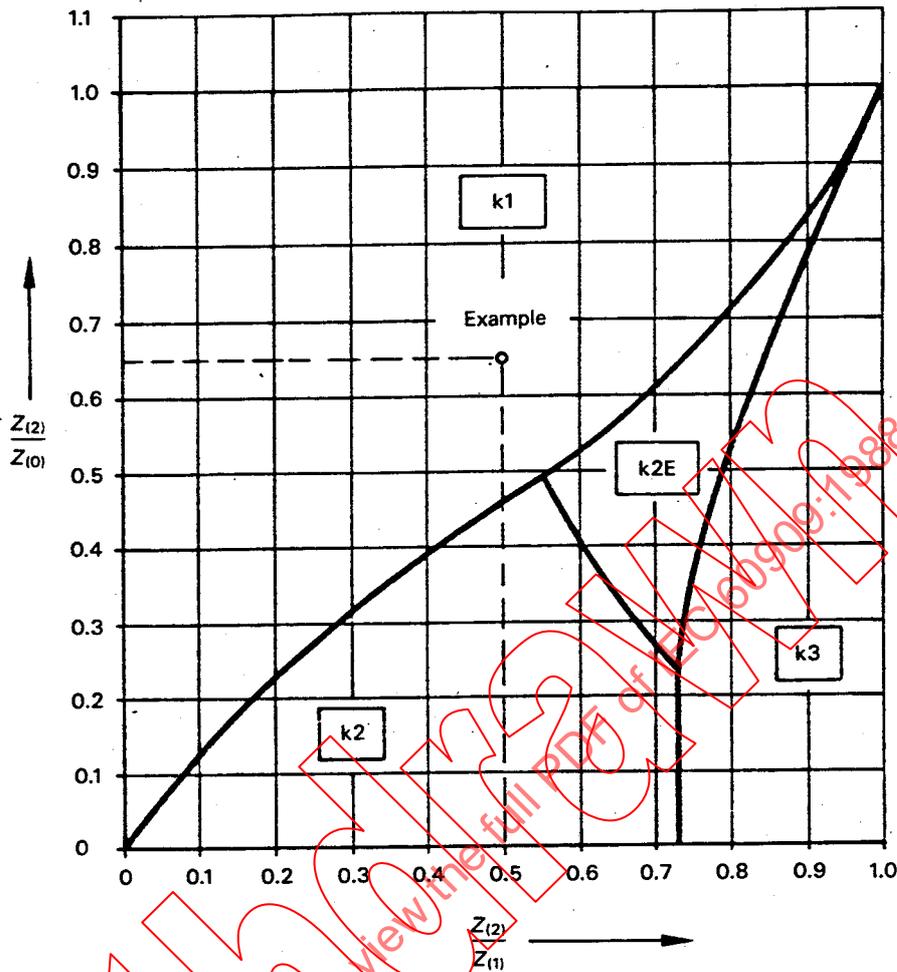
9.2.1 Courts-circuits biphasés isolés

9.2.1.1 Courant de court-circuit initial I'_{k2}

Quelle que soit la configuration du réseau, le courant de court-circuit initial biphasé, sans liaison à la terre (voir figure 2b, page 22) se calcule par:

$$I'_{k2} = \frac{cU_n}{|Z_{(1)} + Z_{(2)}|} = \frac{cU_n}{2|Z_{(1)}|} \quad \text{avec } Z_{(1)} = Z_{(2)} \quad (23)$$

$Z_{(1)} = Z_k$ est l'impédance de court-circuit directe du réseau vue du point de défaut F (voir figure 4a, page 26).



It is anticipated that the differences between R/X-ratios for positive-sequence and zero-sequence systems are small.

Example:

$$\frac{Z_{(2)}}{Z_{(1)}} = 0.5$$

$$\frac{Z_{(2)}}{Z_{(0)}} = 0.65$$

} The single phase circuit (k1) will give the highest short-circuit current.

FIG. 11. - Chart indicating the type of short-circuit giving the highest current.

9.2.1 Line-to-line short circuit without earth connection

9.2.1.1 Initial short-circuit current I'_{k2}

Independent of system configuration, the initial short-circuit current of a line-to-line short circuit without earth connection (see Figure 2b, page 23) is calculated by:

$$I'_{k2} = \frac{cU_n}{|\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)}|} = \frac{cU_n}{2|\underline{Z}_{(1)}|} \quad \text{with } \underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)} \quad (23)$$

$\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_k$ is the positive-sequence short-circuit impedance at the short-circuit location F (see Figure 4a, page 27).

D'après les équations (20) et (23), le rapport de I''_{k2} à I''_k vaut:

$$\frac{I''_{k2}}{I''_k} = \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (24)$$

Pour un court-circuit éloigné de tout alternateur, le courant de court-circuit permanent I_{k2} et le courant coupé I_{b2} sont égaux au courant de court-circuit initial I''_{k2} :

$$I_{k2} = I_{b2} = I''_{k2} \quad (25)$$

9.2.1.2 Valeur de crête i_{p2} du courant de court-circuit

La valeur de crête du courant de court-circuit peut s'écrire:

$$i_{p2} = \kappa \sqrt{2} I''_{k2} \quad (26)$$

Le facteur κ se calcule conformément au paragraphe 9.1.1.2 ou 9.1.3.2 selon la configuration du réseau. On peut prendre la même valeur que dans le cas d'un court-circuit triphasé.

9.2.2 Court-circuit biphasé à la terre

9.2.2.1 Courants de court-circuit initiaux I''_{k2E} et I''_{kE2E}

La figure 2c, page 22, montre qu'il y a lieu de distinguer entre les courants I''_{k2E} et I''_{kE2E} .

Les valeurs de I''_{k2E} sont données par:

$$I''_{k2E L2} = cU_n \frac{|1 + \underline{a}^2 + \underline{Z}_{(0)}/\underline{Z}_{(1)}|}{|\underline{Z}_{(1)} + 2 \underline{Z}_{(0)}|} \quad (27a)$$

$$I''_{k2E L3} = cU_n \frac{|1 + \underline{a} + \underline{Z}_{(0)}/\underline{Z}_{(1)}|}{|\underline{Z}_{(1)} + 2 \underline{Z}_{(0)}|} \quad (27b)$$

avec $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$.

\underline{a} et \underline{a}^2 sont données par l'équation (4) du paragraphe 8.2.

Le courant de court-circuit initial I''_{kE2E} s'écoulant à la terre et/ou dans les conducteurs de terre, se calcule, d'après la figure 2c, page 22, par:

$$I''_{kE2E} = \frac{\sqrt{3} cU_n}{|\underline{Z}_{(1)} + 2 \underline{Z}_{(0)}|} \quad (28)$$

9.2.2.2 Valeur de crête i_{p2E} du courant de court-circuit

Il n'est pas nécessaire de calculer i_{p2E} , car on a toujours:

$$i_{p3} \geq i_{p2E} \text{ OU } i_{p1} \geq i_{p2E}.$$

9.2.3 Court-circuit phase-terre

9.2.3.1 Courant de court-circuit initial I''_{k1}

Le courant de court-circuit initial d'un défaut phase-terre se calcule, conformément à la figure 2d, page 22, par:

The ratio I''_{k2} to I'_k according to Equations (20) and (23) is:

$$\frac{I''_{k2}}{I'_k} = \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (24)$$

In the case of a far-from-generator short circuit, the steady-state short-circuit current I_{k2} and the short-circuit breaking current I_{b2} are equal to the initial short-circuit current I''_{k2} :

$$I_{k2} = I_{b2} = I''_{k2} \quad (25)$$

9.2.1.2 Peak short-circuit current i_{p2}

The peak short-circuit current can be expressed by:

$$i_{p2} = \kappa \sqrt{2} I''_{k2} \quad (26)$$

The factor κ is calculated according to Sub-clause 9.1.1.2 or 9.1.3.2 depending on the system configuration. The same value as used in the case of a three-phase short circuit may be taken.

9.2.2 Line-to-line short circuit with earth connection

9.2.2.1 Initial short-circuit currents I''_{k2E} and I''_{kE2E}

According to Figure 2c, page 23, one has to distinguish between the currents I''_{k2E} and I''_{kE2E} . To calculate the value of I''_{k2E} , the following formulae are given:

$$I''_{k2E \text{ L2}} = cU_n \frac{|1 + \underline{a}^2 + \underline{Z}_{(0)}/\underline{Z}_{(1)}|}{|\underline{Z}_{(1)} + 2 \underline{Z}_{(0)}|} \quad (27a)$$

$$I''_{k2E \text{ L3}} = cU_n \frac{|1 + \underline{a} + \underline{Z}_{(0)}/\underline{Z}_{(1)}|}{|\underline{Z}_{(1)} + 2 \underline{Z}_{(0)}|} \quad (27b)$$

with $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$.

\underline{a} and \underline{a}^2 are given in Sub-clause 8.2, Equation (4).

The initial short-circuit current I''_{kE2E} , flowing to earth and/or grounded wires according to Figure 2c, page 23, is calculated by:

$$I''_{kE2E} = \frac{\sqrt{3} cU_n}{|\underline{Z}_{(1)} + 2 \underline{Z}_{(0)}|} \quad (28)$$

9.2.2.2 Peak short-circuit current i_{p2E}

It is not necessary to calculate i_{p2E} because either:

$$i_{p3} \geq i_{p2E} \text{ OR } i_{p1} \geq i_{p2E}.$$

9.2.3 Line-to-earth short circuit

9.2.3.1 Initial short-circuit current I''_{k1}

The initial short-circuit current of a line-to-earth short circuit according to Figure 2d, page 23, is calculated by:

$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3} c U_n}{|\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(0)}|} = \frac{\sqrt{3} c U_n}{|2 \underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)}|} \quad (29)$$

Pour un court-circuit éloigné de tout alternateur, le courant de court-circuit permanent I_{k1} et le courant coupé I_{b1} sont égaux au courant de court-circuit initial I''_{k1} (voir aussi les équations (15) et (25)):

$$I_{k1} = I_{b1} = I''_{k1} \quad (30)$$

9.2.3.2 Valeur de crête i_{p1} du courant de court-circuit

La valeur de crête du courant de court-circuit peut s'exprimer par:

$$i_{p1} = \kappa \sqrt{2} I''_{k1} \quad (31)$$

Le facteur κ se calcule d'après les paragraphes 9.1.1.2 et 9.1.3.2 selon la configuration du réseau. Par mesure de simplification, on peut prendre la même valeur que pour un court-circuit triphasé.

9.3. Courants de court-circuit minimaux

9.3.1 Généralités

Pour le calcul des courants de court-circuit minimaux, il y a lieu de tenir compte des conditions suivantes:

- le facteur de tension c correspond au calcul du courant de court-circuit minimum donné au tableau I;
- on doit choisir la configuration de réseau et, dans certains cas, l'alimentation minimale par les sources et les lignes d'alimentation du réseau, qui conduisent à la valeur minimale du courant de court-circuit au point de défaut;
- les moteurs doivent être ignorés;
- les résistances R_L des lignes (lignes aériennes, câbles, conducteurs de phase et de neutre) sont prises à température plus élevée.

$$R_L = \left[1 + \frac{0,004}{^\circ\text{C}} (\theta_e - 20^\circ\text{C}) \right] \cdot R_{L20} \quad (32)$$

où R_{L20} est la résistance à la température de 20 °C et θ_e en °C est la température du conducteur admissible à la fin du court-circuit. Le facteur 0,004/°C s'applique au cuivre, à l'aluminium et aux alliages d'aluminium.

9.3.2 Courant de court-circuit symétrique I''_k

Dans le calcul du courant de court-circuit triphasé d'après le paragraphe 9.1, la valeur minimale du courant de court-circuit initial est donnée par:

$$I''_{k \min} = \frac{c U_n}{\sqrt{3} Z_k} \quad (33)$$

$Z_k = \underline{Z}_{(1)}$ est l'impédance de court-circuit dans les conditions indiquées au paragraphe 9.3.1.

La valeur du facteur de tension c dépend de nombreux paramètres, tels que la tension de service des câbles et lignes aériennes et la localisation du court-circuit. En l'absence de normes nationales, on peut utiliser les valeurs du tableau I.

$$I'_{k1} = \frac{\sqrt{3} c U_n}{|\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(0)}|} = \frac{\sqrt{3} c U_n}{|2 \underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)}|} \quad (29)$$

In the case of a far-from-generator short circuit, the steady-state short-circuit current I_{k1} and the breaking current I_{b1} are equal to the initial short-circuit current I'_{k1} (see also Equations (15) and (25)):

$$I_{k1} = I_{b1} = I'_{k1} \quad (30)$$

9.2.3.2 Peak short-circuit current i_{p1}

The peak short-circuit current can be expressed by:

$$i_{p1} = \kappa \sqrt{2} I'_{k1} \quad (31)$$

The factor κ is calculated according to Sub-clauses 9.1.1.2 or 9.1.3.2 depending on the system configuration. For simplification, the same value as used in the case of a three-phase short circuit may be taken.

9.3. The minimum short-circuit currents

9.3.1 General

When calculating minimum short-circuit currents, it is necessary to introduce the following conditions:

- voltage factor c for the calculation of minimum short-circuit current according to Table I;
- choose the system configuration and, in some cases, the minimum contribution from sources and network feeders, which lead to a minimum value of short-circuit current at the short-circuit location;
- motors are to be neglected;
- resistances R_L of lines (overhead lines and cables, phase conductors and neutral conductors) are to be introduced at a higher temperature:

$$R_L = \left[1 + \frac{0.004}{^\circ\text{C}} (\theta_e - 20^\circ\text{C}) \right] \cdot R_{L20} \quad (32)$$

where R_{L20} is the resistance at a temperature of 20 °C and θ_e in °C the conductor temperature at the end of the short circuit. The factor 0.004/°C is valid for copper, aluminium and aluminium alloy.

9.3.2 Initial symmetrical short-circuit current I'_k

When calculating three-phase short-circuit currents according to Sub-clause 9.1, the minimum initial short-circuit current is given by:

$$I'_{k \min} = \frac{c U_n}{\sqrt{3} Z_k} \quad (33)$$

$Z_k = Z_{(1)}$ is the short-circuit impedance under the conditions of Sub-clause 9.3.1.

The value of the voltage factor c depends on many influences, for example operational voltage of cables or overhead lines, location of short circuit. If there are no national standards, the values of Table I may be used.

Dans les calculs relatifs à des courts-circuits dissymétriques, conformément au paragraphe 9.2, on choisit la source de tension équivalente $cU_n/\sqrt{3}$ et les impédances $\underline{Z}_{(1)}$ et $\underline{Z}_{(0)}$ dans les conditions définies au paragraphe 9.3.1.

SECTION DEUX – RÉSEAUX DANS LESQUELS LES COURANTS DE COURT-CIRCUIT ONT DES COMPOSANTES ALTERNATIVES DÉCROISSANTES (COURTS-CIRCUITS PROCHES DES ALTERNATEURS)

10. Généralités

Cette section fournit les procédures de calcul des courants de court-circuit ayant des composantes alternatives décroissantes. L'influence des moteurs est également prise en compte.

Elle donne les procédures de calcul des courants de court-circuit des moteurs synchrones et asynchrones si leur contribution dépasse 5% du courant de court-circuit symétrique initial I_k'' calculé hors moteurs (voir paragraphe 13.2.1).

11. Paramètres de court-circuit

11.1 Généralités

Dans le calcul des courants de court-circuit alimentés par des alternateurs, des groupes générateur-transformateur et des moteurs (courts-circuits proches des alternateurs), il est utile de considérer non seulement le courant symétrique initial I_k'' et le courant de crête i_p , mais également le courant de court-circuit symétrique coupé I_b et le courant de court-circuit permanent I_k .

En général, le courant de court-circuit symétrique coupé I_b est plus petit que le courant de court-circuit symétrique initial I_k'' et le courant de court-circuit permanent I_k est plus petit que le courant de court-circuit symétrique coupé I_b .

Il arrive fréquemment, en particulier lorsqu'on traite des effets mécaniques des courants de court-circuit, que l'on doit, pour déterminer le courant asymétrique coupé, superposer au courant symétrique coupé la composante continue coupée. Cette composante aperiodique décroissante i_{DC} pourra être calculée suivant l'article 5.

Un courant de court-circuit proche d'un générateur peut être considéré comme la somme des deux composantes suivantes:

- la composante alternative d'amplitude décroissante au cours du court-circuit,
- la composante aperiodique, d'amplitude initiale A, décroissant jusqu'à zéro.

Le courant dû à un court-circuit proche d'un alternateur a généralement l'allure indiquée à la figure 12, page 62. Il peut arriver, dans quelques cas spéciaux, que le courant ne s'annule pour la première fois que quelques périodes après l'apparition du court-circuit. Cela peut avoir lieu lorsque la constante de temps continue d'une machine synchrone dépasse sa constante de temps subtransitoire. Ce phénomène n'est pas traité en détail dans les calculs de courants de court-circuit faisant l'objet de cette norme.

When calculating unbalanced short circuits according to Sub-clause 9.2, the equivalent voltage source $cU_n/\sqrt{3}$ and impedances $\underline{Z}_{(1)}$ and $\underline{Z}_{(0)}$ under the conditions of Sub-clause 9.3.1 are chosen.

SECTION TWO – SYSTEMS WITH SHORT-CIRCUIT CURRENTS HAVING DECAYING A.C. COMPONENTS (NEAR-TO-GENERATOR SHORT CIRCUITS)

10. General

This section gives procedures for calculations in systems with short-circuit currents having decaying a.c. components. The influence of motors is also taken into account.

Procedures for the calculation of short-circuit currents of synchronous and asynchronous motors are given if their contribution is higher than 5% of the initial symmetrical short-circuit current I_k' without motors (see Sub-clause 13.2.1).

11. Short-circuit parameters

11.1 General

In the calculation of the short-circuit currents in systems supplied by generators, power-station units and motors (near-to-generator short circuits), it is of interest not only to know the initial symmetrical short-circuit current I_k' and the peak short-circuit current i_p , but also the symmetrical short-circuit breaking current I_b and the steady-state short-circuit current I_k .

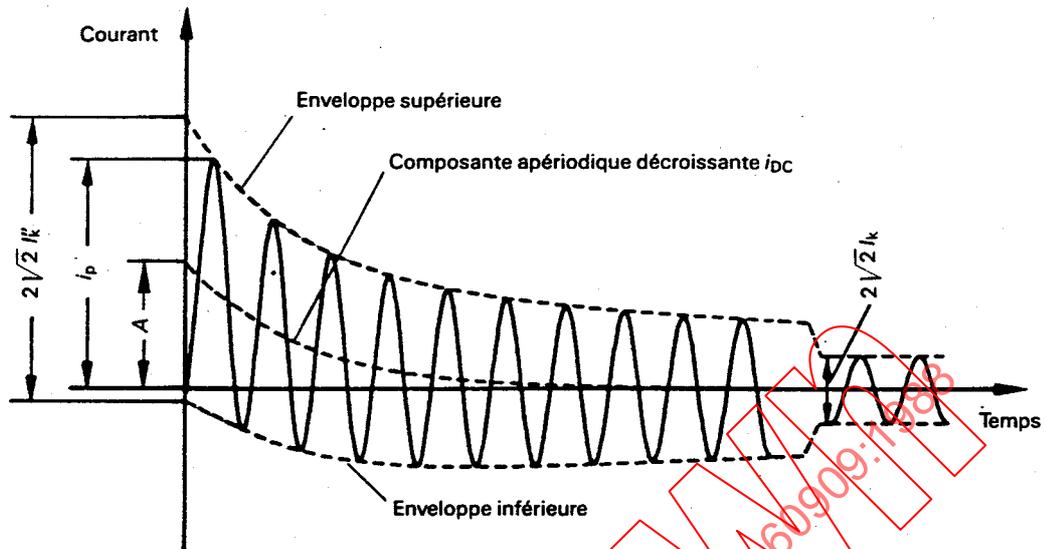
In general the symmetrical short-circuit breaking current I_b is smaller than the initial symmetrical short-circuit current I_k' . Normally the steady-state short-circuit current I_k is smaller than the symmetrical short-circuit breaking current I_b .

Frequently, especially when dealing with the mechanical effects of short-circuit currents, it will be necessary to determine the asymmetrical short-circuit breaking current from the a.c. breaking current and the superimposed d.c. breaking current. The decaying aperiodic component i_{DC} can be calculated according to Clause 5.

In the case of a near-to-generator short circuit the prospective short-circuit current can be considered as the sum of the following two components:

- the a.c. component with decaying amplitude during the short circuit,
- the aperiodic component beginning with an initial value A and decaying to zero.

In a near-to-generator short circuit, the short-circuit current behaves generally as shown in Figure 12, page 63. In some special cases it could happen that the decaying short-circuit current reaches zero for the first time, some periods after the short circuit took place. This is possible if the d.c. time constant of a synchronous machine is larger than the subtransient time constant. This phenomenon is not dealt with in detail by short-circuit currents calculated in this standard.

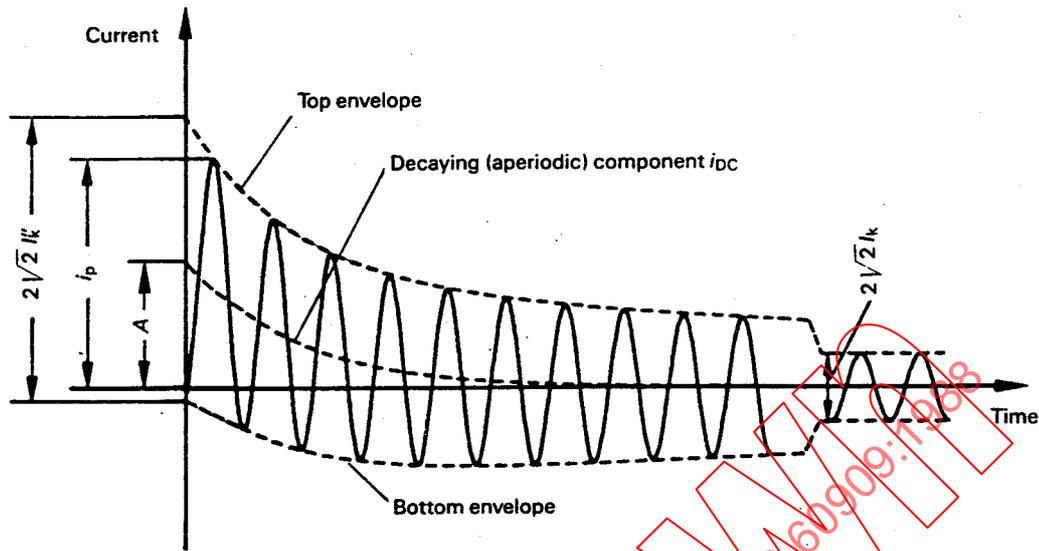


- I_k = courant de court-circuit symétrique initial
- i_p = valeur de crête du courant de court-circuit
- I_k = courant de court-circuit permanent
- i_{DC} = composante décroissante (apériodique) du courant de court-circuit
- A = valeur initiale de la composante apériodique i_{DC}

FIG. 12. — Courant de court-circuit proche d'un alternateur (schéma).

Les courants de court-circuit peuvent être alimentés par une ou plusieurs sources comme il est indiqué dans la figure 13, page 64. De plus, cette figure renvoie à l'article de cette section qui décrit la méthode de calcul correspondante. Les principaux paragraphes traitant du calcul des courants de court-circuit triphasés sont:

- 12.2.1: cas du point 1) de la figure 13a
- 12.2.2: cas du point 2) de la figure 13a
- 12.2.3: cas des figures 13b et 13c respectivement, si l'inégalité indiquée est satisfaite (court-circuit triphasé alimenté par plusieurs sources non reliées entre elles),
- 12.2.4: cas général de la figure 13d (court-circuit triphasé dans des réseaux maillés).



- I_k' = initial symmetrical short-circuit current
 i_p = peak short-circuit current
 I_k = steady-state short-circuit current
 i_{DC} = decaying (aperiodic) component of short-circuit current
 A = initial value of the aperiodic component i_{DC}

FIG. 12. – Short-circuit current of a near-to-generator short circuit (schematic diagram).

Short-circuit currents may have one or more sources as shown in Figure 13, page 65. The figure also specifies which clause of this section describes the short-circuit current calculation. The main sub-clauses for the calculation of the three-phase short-circuit currents are:

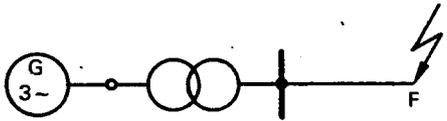
- 12.2.1: for the case shown in Item 1) of Figure 13a
 - 12.2.2: for the case shown in Item 2) of Figure 13a
 - 12.2.3: for the cases shown in Figures 13b, 13c respectively, if the given inequality is fulfilled (three-phase short-circuit fed from non-meshed sources),
 - 12.2.4: for the general case shown in Figure 13d (three-phase short circuit in meshed networks).
- } single fed three-phase short-circuit,

a) Court-circuit alimenté par une seule source.
Calculs conformes aux paragraphes 12.2.1, 12.2.2, 12.3 et 12.4.

1. Court-circuit alimenté par un alternateur (sans transformateur).

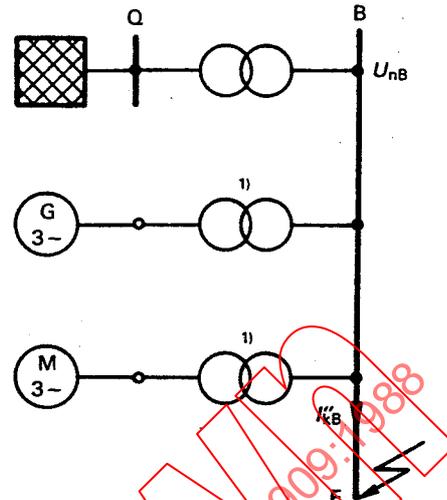


2. Court-circuit alimenté par un générateur (alternateur et transformateur associés).



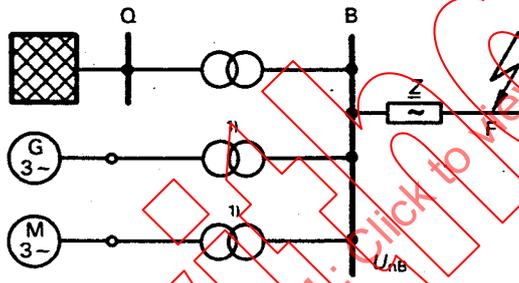
b) Court-circuit alimenté par plusieurs sources indépendantes.

Calculs conformes aux paragraphes 12.2.3, 12.3 et 12.4.



c) Court-circuit alimenté par plusieurs sources à travers une impédance commune Z .

Calculs conformes aux paragraphes 12.2.3, 12.2.4, 12.3 et 12.4.



Z peut être négligé si

$$Z < 0,05 \frac{U_{nB}}{\sqrt{3} I_{kB}}$$

I_{kB} étant calculé pour le cas de la figure 13b

d) Court-circuit dans un réseau maillé.

Calculs conformes aux paragraphes 12.2.4, 12.3 et 12.4.

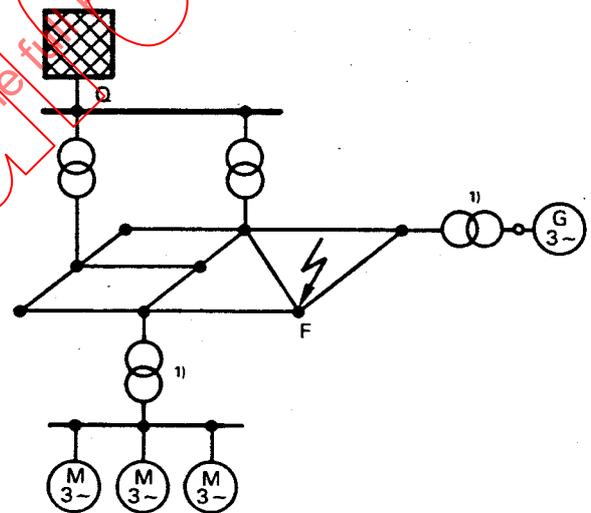


FIG. 13. — Divers schémas d'alimentation de courts-circuits.

11.2 Court-circuit symétrique

Les indications du paragraphe 8.1 sont applicables.

11.3 Court-circuit dissymétrique

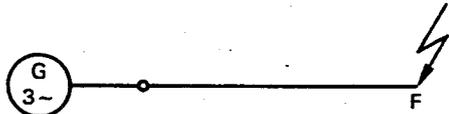
Les indications du paragraphe 8.2 sont applicables.

¹⁾ Des alternateurs et des moteurs peuvent également être reliés au réseau sans transformateur.

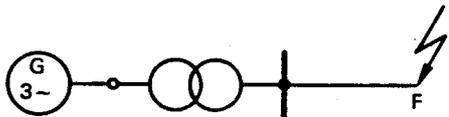
a) Single fed short circuit.

Calculation according to Sub-clauses 12.2.1, 12.2.2, 12.3 and 12.4.

1. Short circuit fed from one generator (without transformer).

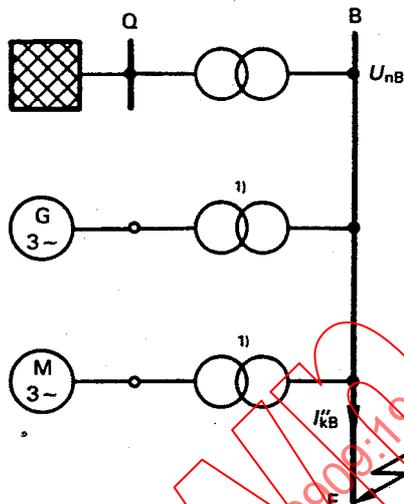


2. Short circuit fed from one power-station unit (generator and unit transformer).



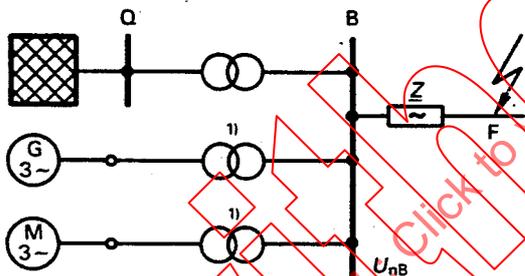
b) Short circuit fed from non-meshed sources.

Calculation according to Sub-clauses 12.2.3, 12.3 and 12.4.



c) Short circuit fed from several sources with the common impedance Z .

Calculation according to Sub-clauses 12.2.3, 12.2.4, 12.3 and 12.4.



Z can be neglected if

$$Z < 0.05 \frac{U_{nB}}{3 I''_{kB}}$$

I''_{kB} is calculated according to Figure 13b

d) Short circuit in meshed networks.

Calculation according to Sub-clauses 12.2.4, 12.3 and 12.4.

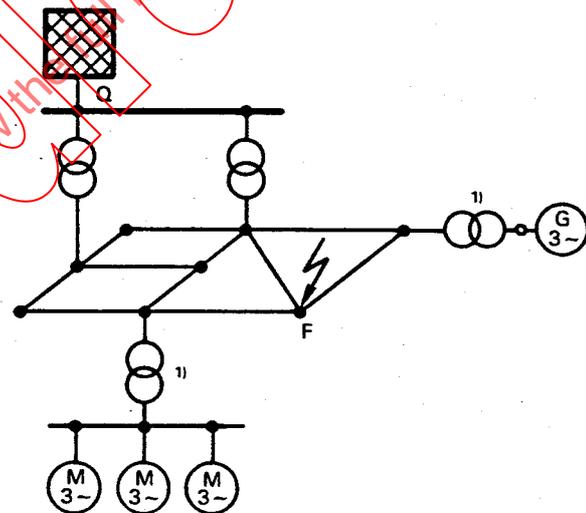


FIG. 13. - Various short-circuit source connections.

11.2 *Balanced short circuit*

The details of Sub-clause 8.1 are valid.

11.3 *Unbalanced short circuit*

The details of Sub-clause 8.2 are valid.

1) Generators and motors can also be connected without transformers.

11.4 *Source de tension équivalente au point de défaut*

Dans tous les cas, on peut déterminer le courant de court-circuit au point de défaut F au moyen d'une source de tension équivalente $cU_n/\sqrt{3}$, en introduisant des facteurs correctifs pour l'impédance des alternateurs et celle des groupes alternateur-transformateur (voir paragraphes 11.5.3.6, 11.5.3.7, 11.5.3.8 et article 12). L'article 6 et le tableau I fournissent tous détails utiles sur la source de tension équivalente $cU_n/\sqrt{3}$.

Dans la méthode proposée, la source de tension équivalente $cU_n/\sqrt{3}$ au point de défaut est la seule tension active du réseau. Les tensions internes de toutes les machines synchrones et asynchrones sont annulées. Les machines synchrones n'interviennent donc que par leurs impédances subtransitoires et les moteurs asynchrones que par leur impédance calculée à partir du courant à rotor bloqué.

Dans cette méthode également, toutes les capacités de ligne et admittances parallèles de charges non tournantes, sauf celles du système homopolaire, doivent être négligées (voir figure 15, page 76, et figure 20, page 86).

Le cas des moteurs est examiné en détail dans l'article 13.

11.5 *Impédances de court-circuit*

En plus de celles indiquées au paragraphe 8.3.2, il y a lieu de prendre en compte les impédances des alternateurs et des moteurs. Pour les groupes générateur-transformateur, des indications complémentaires sont données aux paragraphes 11.5.3.7 et 11.5.3.8. Les impédances de court-circuit des lignes d'alimentation du réseau, des transformateurs de réseau, des lignes aériennes et des câbles, ainsi que des réactances de limitation de court-circuit sont inchangées.

11.5.1 *Impédances de court-circuit au point de défaut F*

Le paragraphe 8.3.1 et la figure 4, page 26, sont applicables au calcul du courant de court-circuit symétrique initial lors d'un court-circuit proche d'alternateurs.

11.5.2 *Impédances de court-circuit du matériel électrique*

Les considérations générales du paragraphe 8.3.2 sont applicables. Les cas des moteurs et des alternateurs sont traités aux paragraphes 11.5.3.5 à 11.5.3.8.

11.5.3 *Calcul des impédances de court-circuit du matériel électrique*

11.5.3.1 *Réseau d'alimentation*

Le paragraphe 8.3.2.1 est applicable, sauf dans le cas particulier traité au paragraphe 12.2.3.1.

11.5.3.2 *Transformateurs*

Le paragraphe 8.3.2.2 est applicable. Le cas des transformateurs de groupe est dissocié et traité aux paragraphes 11.5.3.7 et 11.5.3.8.

11.5.3.3 *Lignes aériennes et câbles*

Le paragraphe 8.3.2.3 est applicable.

11.5.3.4 *Réactances de limitation du courant de court-circuit*

Le paragraphe 8.3.2.4 est applicable.

11.4 *Equivalent voltage source at the short-circuit location*

It is possible in all cases to determine the short-circuit current at the short-circuit location F by means of an equivalent voltage source $cU_n/\sqrt{3}$, if correction factors are introduced for the impedances of generators and for the impedances of generators and transformers of power-station units (see Sub-clauses 11.5.3.6, 11.5.3.7, 11.5.3.8 and Clause 12). Details for the equivalent voltage source $cU_n/\sqrt{3}$ are given in Clause 6 and Table I.

In this method the equivalent voltage source $cU_n/\sqrt{3}$ at the short-circuit location is the only active voltage of the system. The internal voltages of all synchronous and asynchronous machines are set to zero. Therefore the synchronous machines are only effective with their subtransient impedances and the asynchronous motors are only effective with their impedances calculated from their locked-rotor currents.

Furthermore in this method all line capacitances and parallel admittances of non-rotating loads except those of the zero-sequence system shall be neglected (see Figure 15, page 77, and Figure 20, page 87).

Details for consideration of motors are given in Clause 13.

11.5 *Short-circuit impedances*

In addition to Sub-clause 8.3.2, impedances of generators and motors are introduced. Additional calculations are given for power-station units in Sub-clauses 11.5.3.7 and 11.5.3.8. The short-circuit impedances of network feeders, network transformers, overhead lines and cables as well as short-circuit limiting reactors are valid.

11.5.1 *Short-circuit impedances at the short-circuit location F*

For the calculation of the initial symmetrical short-circuit current in a near-to-generator short circuit Sub-clause 8.3.1 and Figure 4, page 27, are valid.

11.5.2 *Short-circuit impedances of electrical equipment*

The general considerations made in Sub-clause 8.3.2 are valid. Motors and generators are dealt with in Sub-clauses 11.5.3.5 to 11.5.3.8.

11.5.3 *Calculation of short-circuit impedances of electrical equipment*

11.5.3.1 *Network feeders*

The details given in Sub-clause 8.3.2.1 are valid, except for the special case given in Sub-clause 12.2.3.1.

11.5.3.2 *Transformers*

The details given in Sub-clause 8.3.2.2 are valid. Unit transformers of power-station units are excluded and dealt with in Sub-clauses 11.5.3.7 and 11.5.3.8.

11.5.3.3 *Overhead lines and cables*

Details given in Sub-clause 8.3.2.3 are valid.

11.5.3.4 *Short-circuit current limiting reactors*

Details given in Sub-clause 8.3.2.4 are valid.

11.5.3.5 Moteurs

Pour le calcul de la valeur initiale des courants de court-circuit triphasé symétrique I_k' , les moteurs et compensateurs synchrones sont traités comme des alternateurs synchrones (voir paragraphes 11.5.3.6, 11.5.3.7, 11.5.3.8 et 13.1).

L'impédance $Z_M = R_M + jX_M$ des moteurs asynchrones dans les systèmes direct et inverse peut se déterminer par:

$$Z_M = \frac{1}{I_{LR}/I_{TM}} \cdot \frac{U_{TM}}{\sqrt{3} I_{TM}} = \frac{1}{I_{LR}/I_{TM}} \cdot \frac{U_{TM}^2}{S_{TM}} \quad (34)$$

où:

U_{TM} = tension assignée du moteur

I_{TM} = courant assigné du moteur

S_{TM} = puissance apparente assignée du moteur $S_{TM} = P_{TM}/(\eta_r \cos \varphi_r)$

I_{LR}/I_{TM} = rapport du courant à rotor bloqué (paragraphe 3.12) au courant assigné du moteur

On peut, avec une précision suffisante, prendre les rapports R_M/X_M suivants:

$R_M/X_M = 0,10$, avec $X_M = 0,995 Z_M$ pour les moteurs haute tension de puissance assignée P_{TM} par paire de pôles ≥ 1 MW,

$R_M/X_M = 0,15$, avec $X_M = 0,989 Z_M$ pour les moteurs haute tension de puissance assignée P_{TM} par paire de pôles < 1 MW,

$R_M/X_M = 0,42$, avec $X_M = 0,922 Z_M$ pour les groupes de moteurs basse tension reliés par câbles.

Tous détails pour la prise ou la non-prise en compte des moteurs ou groupes de moteurs asynchrones dans le calcul des courants de court-circuit sont donnés au paragraphe 13.2.1.

Les moteurs à convertisseur statique sont traités, pour le calcul des courants de court-circuit, comme des moteurs asynchrones. Dans ce cas, on a:

Z_M = comme indiqué dans l'équation (34)

U_{TM} = tension assignée, côté réseau, du transformateur de convertisseur statique ou tension assignée du convertisseur statique s'il est à alimentation directe

I_{TM} = courant assigné, côté réseau, du transformateur de convertisseur statique ou courant assigné du convertisseur statique s'il est à alimentation directe

$I_{LR}/I_{TM} = 3$

$R_M/X_M = 0,10$ avec $X_M = 0,995 Z_M$

11.5.3.6 Alternateurs directement raccordés au réseau

Pour le calcul des courants de court-circuit symétriques initiaux dans les réseaux directement alimentés par des alternateurs sans transformateur intermédiaire, par exemple dans les réseaux industriels ou à basse tension, l'impédance à utiliser dans le système direct est:

$$\underline{Z}_{GK} = K_G \underline{Z}_G = K_G (R_G + jX_d'') \quad (35)$$

le facteur correctif K_G étant donné par:

$$K_G = \frac{U_n}{U_{TG}} \cdot \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{TG}} \quad (36)$$

11.5.3.5 Motors

When calculating three-phase initial symmetrical short-circuit currents I_k'' , synchronous motors and synchronous compensators are treated as synchronous generators (see Sub-clauses 11.5.3.6, 11.5.3.7, 11.5.3.8 and 13.1).

The impedance $Z_M = R_M + jX_M$ of asynchronous motors in the positive- and negative-sequence system can be determined by:

$$Z_M = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}}{\sqrt{3} I_{rM}} = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} \quad (34)$$

where:

U_{rM} = rated voltage of the motor

I_{rM} = rated current of the motor

S_{rM} = rated apparent power of the motor $S_{rM} = P_{rM}/(\eta_r \cos \varphi_r)$

I_{LR}/I_{rM} = ratio of the locked-rotor current (Sub-clause 3.11) to the rated current of the motor

The following may be used with sufficient accuracy:

$R_M/X_M = 0.10$, with $X_M = 0.995 Z_M$ for high-voltage motors with powers P_{rM} per pair of poles ≥ 1 MW,

$R_M/X_M = 0.15$, with $X_M = 0.989 Z_M$ for high-voltage motors with powers P_{rM} per pair of poles < 1 MW,

$R_M/X_M = 0.42$, with $X_M = 0.922 Z_M$ for low-voltage motor groups with connection cables.

Details for consideration or omission of asynchronous motors or groups of asynchronous motors for calculation of short-circuit currents are given in Sub-clause 13.2.1.

Static converter fed drives are treated for the calculation of short-circuit currents in a similar way as asynchronous motors. The following applies for static converter fed drives:

Z_M = as in Equation (34)

U_{rM} = rated voltage of the static converter transformer on the network side or rated voltage of the static converter, if no transformer is present

I_{rM} = rated current of the static converter transformer on the network side or rated current of the static converter, if no transformer is present

$I_{LR}/I_{rM} = 3$

$R_M/X_M = 0.10$ with $X_M = 0.995 Z_M$

11.5.3.6 Generators directly connected to systems

When calculating three-phase initial symmetrical short-circuit currents in systems fed directly from generators without unit transformers, for example in industrial networks or in low-voltage networks, the following impedance has to be used in the positive-sequence system:

$$\underline{Z}_{GK} = K_G \underline{Z}_G = K_G (R_G + jX_d'') \quad (35)$$

with the correction factor:

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{rG}} \quad (36)$$

où:

c_{\max} = facteur de tension, voir tableau I

U_n = tension nominale du réseau

U_{rG} = tension assignée de l'alternateur

\underline{Z}_{GK} = impédance corrigée de l'alternateur

\underline{Z}_G = impédance de l'alternateur ($\underline{Z}_G = R_G + jX'_d$)

x'_d = réactance subtransitoire de l'alternateur rapportée à son impédance assignée ($x'_d = X'_d/Z_{rG}$)

φ_{rG} = angle de phase entre \underline{I}_{rG} et $\underline{U}_{rG}/\sqrt{3}$

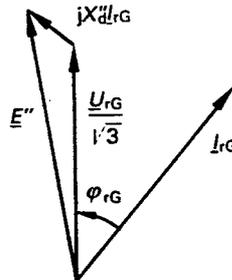


FIG. 14. - Diagramme de phase d'un alternateur synchrone aux conditions assignées.

Du fait que l'on utilise la source de tension équivalente $cU_n/\sqrt{3}$ d'après le paragraphe 12.2.1.1 au lieu de la tension subtransitoire E'' de l'alternateur synchrone (voir figure 14), il est nécessaire d'introduire le facteur correctif K_G (équation (36)) pour le calcul de la valeur corrigée \underline{Z}_{GK} (équation (35)) de l'impédance de l'alternateur.

On peut utiliser, avec une précision suffisante, les valeurs de R_G suivantes:

$R_G = 0,05 X'_d$ pour les alternateurs dont $U_{rG} > 1 \text{ kV}$ et $S_{rG} \geq 100 \text{ MVA}$

$R_G = 0,07 X'_d$ pour les alternateurs dont $U_{rG} > 1 \text{ kV}$ et $S_{rG} < 100 \text{ MVA}$

$R_G = 0,15 X'_d$ pour les alternateurs dont $U_{rG} \leq 1000 \text{ V}$

En plus de la décroissance de la composante continue, les facteurs 0,05, 0,07 et 0,15 prennent en compte la décroissance de la composante alternative du courant de court-circuit pendant la première demi-période suivant l'apparition du court-circuit. L'influence des diverses températures d'enroulement sur R_G n'est pas prise en compte.

Note. = La résistance effective du stator des machines synchrones est généralement bien inférieure aux valeurs indiquées pour R_G .

Les impédances inverse et homopolaire des générateurs synchrones seront prises égales à:

$$\underline{Z}_{(2)G} = \underline{Z}_{GK} = K_G \underline{Z}_G \quad (37)$$

Pour les machines synchrones à pôles saillants pour lesquelles X'_d diffère de X'_q , on prend

$$X_{(2)G} = \frac{1}{2}(X'_d + X'_q).$$

$$\underline{Z}_{(0)G} = K_G (R_{(0)G} + jX_{(0)G}) \quad (38)$$

Pour le calcul des courants de court-circuit entre phases et entre phase et terre (paragraphe 12.3), on doit prendre en compte le facteur correctif donné par l'équation (36).

where:

c_{\max} = voltage factor according to Table I

U_n = nominal voltage of the system

U_{rG} = rated voltage of the generator

\underline{Z}_{GK} = corrected impedance of the generator

\underline{Z}_G = impedance of the generator ($\underline{Z}_G = R_G + jX'_d$)

x'_d = subtransient reactance of the generator referred to rated impedance ($x'_d = X'_d / Z_{rG}$)

φ_{rG} = phase angle between \underline{I}_{rG} and $\underline{U}_{rG} / \sqrt{3}$

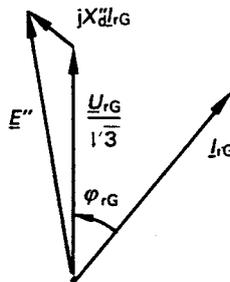


FIG. 14. – Phasor diagram of a synchronous generator at rated conditions.

Using the equivalent voltage source $cU_n / \sqrt{3}$ according to Sub-clause 12.2.1.1 instead of the subtransient voltage E'' of the synchronous generator (see Figure 14), the correction factor K_G (Equation (36)) for the calculation of the corrected impedance \underline{Z}_{GK} (Equation (35)) of the generator has to be introduced.

The following values of sufficient accuracy may be used:

$R_G = 0.05 X'_d$ for generators with $U_{rG} > 1 \text{ kV}$ and $S_{rG} \geq 100 \text{ MVA}$

$R_G = 0.07 X'_d$ for generators with $U_{rG} > 1 \text{ kV}$ and $S_{rG} < 100 \text{ MVA}$

$R_G = 0.15 X'_d$ for generators with $U_{rG} \leq 1000 \text{ V}$

In addition to the decay of the d.c. component, the factors 0.05, 0.07 and 0.15, also take account of the decay of the a.c. component of the short-circuit current during the first half-period after the short circuit took place. The influence of various winding-temperatures on R_G is not considered.

Note. = The effective resistance of the stator of synchronous machines lies generally much below the given values for R_G .

For the impedances of synchronous generators in the negative-sequence system and the zero-sequence system the following applies:

$$\underline{Z}_{(2)G} = \underline{Z}_{GK} = K_G \underline{Z}_G \quad (37)$$

For salient-pole synchronous machines with differing values of X'_d and X'_q ,

$$X_{(2)G} = \frac{1}{2}(X'_d + X'_q).$$

$$\underline{Z}_{(0)G} = K_G (R_{(0)G} + jX_{(0)G}) \quad (38)$$

For the calculation of short-circuit currents for line-to-line and line-to-earth short circuits (Sub-clause 12.3) the correction factor according to Equation (36) shall be taken into account.

11.5.3.7 Groupes générateur-transformateur

Dans ce cas, il y a lieu d'introduire des facteurs correctifs pour les impédances des alternateurs et des transformateurs de groupe:

$$\underline{Z}_{G, PSU} = K_{G, PSU} \underline{Z}_G \quad (39)$$

avec comme facteur correctif:

$$K_{G, PSU} = \frac{c_{\max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{rG}} \quad (40)$$

$$\underline{Z}_{T, PSU} = K_{T, PSU} \underline{Z}_{TLV} \quad (41)$$

avec comme facteur correctif:

$$K_{T, PSU} = c_{\max} \quad (42)$$

où:

- $\underline{Z}_{G, PSU}; \underline{Z}_{T, PSU}$ = impédances corrigées des alternateurs (G) et transformateurs de groupe (T)
- \underline{Z}_G = impédance de l'alternateur $\underline{Z}_G = R_G + jX_d''$ (voir paragraphe 11.5.3.6)
- \underline{Z}_{TLV} = impédance, côté basse tension, du transformateur de groupe (voir paragraphe 8.3.2.2)
- x_d'', φ_{rG} = (voir paragraphe 11.5.3.6)

Les impédances $\underline{Z}_{G, PSU}$ et $\underline{Z}_{T, PSU}$ seront ramenées, s'il y a lieu, du côté haute tension (voir paragraphe 12.2.2) au moyen du rapport de transformation fictif t_f .

Pour la détermination des courants relatifs à un court-circuit se produisant entre l'alternateur et son transformateur, on introduira la source de tension équivalente $cU_{rG}/\sqrt{3}$ au point de défaut. Dans ce cas, il y aura lieu de prendre la tension assignée de l'alternateur, car la tension nominale du réseau ne peut être définie. Ces cas sont traités au paragraphe 12.2.3.1.

- Notes 1. - Les équations (40) et (42) correspondent à $U_Q = U_{nQ}$ et $U_G = U_{rG}$. Des précautions particulières sont recommandées si, pour un groupe générateur-transformateur ayant un transformateur avec changeur de prise, la tension de fonctionnement U_{Qmin} est en permanence supérieure à U_{nQ} ($U_{Qmin} > U_{nQ}$) et/ou si U_G diffère de U_{rG} ($U_G > U_{rG}$) ou si, pour une unité de production ayant un transformateur sans changeur de prise, la tension U_G de l'alternateur est en permanence supérieure à U_{rG} ($U_G > U_{rG}$).
2. - Les valeurs des facteurs de correction pour les impédances négative et homopolaire intervenant dans les courts-circuits dissymétriques sont à l'étude.

11.5.3.8 Groupes de production

Pour le calcul des courants relatifs à des courts-circuits situés du côté haute tension des groupes générateur-transformateur, il n'est pas nécessaire d'utiliser les facteurs de correction indiqués au paragraphe 11.5.3.7. On utilisera les formules suivantes qui introduisent un facteur de correction de l'impédance du groupe alternateur-transformateur:

$$\underline{Z}_{PSU} = K_{PSU} (t_r^2 \underline{Z}_G + \underline{Z}_{THV}) \quad (43)$$

avec comme facteur correctif:

$$K_{PSU} = \left(\frac{t_f}{t_r} \right)^2 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + (x_d'' - x_T) \sin \varphi_{rG}} = \frac{U_{nQ}^2}{U_{rG}^2} \cdot \frac{U_{rTLV}^2}{U_{rTHV}^2} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + (x_d'' - x_T) \sin \varphi_{rG}} \quad (44)$$

11.5.3.7 Generators and unit transformers of power-station units

In this case correction factors for the impedances of generators and transformers of power-station units have to be introduced:

$$\underline{Z}_{G, \text{PSU}} = K_{G, \text{PSU}} \underline{Z}_G \quad (39)$$

with the correction factor:

$$K_{G, \text{PSU}} = \frac{c_{\max}}{1 + x''_d \sin \varphi_{rG}} \quad (40)$$

$$\underline{Z}_{T, \text{PSU}} = K_{T, \text{PSU}} \underline{Z}_{\text{TLV}} \quad (41)$$

with the correction factor:

$$K_{T, \text{PSU}} = c_{\max} \quad (42)$$

where:

- $\underline{Z}_{G, \text{PSU}}$; $\underline{Z}_{T, \text{PSU}}$ = corrected impedances of generators (G) and unit transformers (T) of power-station units
 \underline{Z}_G = impedance of the generator $\underline{Z}_G = R_G + jX''_d$ (see Sub-clause 11.5.3.6)
 $\underline{Z}_{\text{TLV}}$ = impedance of the unit transformer related to the low-voltage side (see Sub-clause 8.3.2.2)
 x''_d, φ_{rG} = (see Sub-clause 11.5.3.6)

If necessary the impedances $\underline{Z}_{G, \text{PSU}}$ and $\underline{Z}_{T, \text{PSU}}$ are converted by the fictitious transformation ratio t_f to the high-voltage side (see Sub-clause 12.2.2).

For the calculation of short-circuit currents at short circuits between generator and unit transformer of a power-station unit the equivalent voltage source $cU_{rG}/\sqrt{3}$ at the short-circuit location is to be introduced. In this case the rated voltage of the generator is chosen, because the nominal system voltage cannot be determined. These cases are dealt with in Sub-clause 12.2.3.1.

Notes 1. - Equations (40) and (42) are valid if $U_Q = U_{nQ}$ and $U_G = U_{rG}$. Special considerations are recommended if for a power-station unit having a transformer with a tap changer the operational voltage $U_{Q\min}$ is permanently higher than U_{nQ} ($U_{Q\min} > U_{nQ}$), and/or U_G differs from U_{rG} ($U_G > U_{rG}$) or for a power-station unit having a transformer without a tap changer the voltage U_G of the generator is permanently higher than U_{rG} ($U_G > U_{rG}$).

2. - Values for correction factors for negative-sequence impedances and zero-sequence impedances at unbalanced short circuits are under consideration.

11.5.3.8 Power-station units

For the calculation of short-circuit currents of power-station units for short circuits on the high-voltage side it is not necessary to deal with the correction factors according to Sub-clause 11.5.3.7. In this case the following formula for the correction of the impedance of the whole power-station unit (PSU) is used:

$$\underline{Z}_{\text{PSU}} = K_{\text{PSU}} (t_f^2 \underline{Z}_G + \underline{Z}_{\text{THV}}) \quad (43)$$

with the correction factor:

$$K_{\text{PSU}} = \left(\frac{t_f}{t_r} \right)^2 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + (x''_d - x_T) \sin \varphi_{rG}} = \frac{U_{nQ}^2}{U_{rG}^2} \cdot \frac{U_{\text{rTLV}}^2}{U_{\text{rTHV}}^2} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + (x''_d - x_T) \sin \varphi_{rG}} \quad (44)$$

où:

- Z_{PSU} = impédance corrigée du groupe générateur-transformateur, rapportée au côté haute tension
- Z_G = impédance de l'alternateur $Z_G = R_G + jX'_d$ (voir paragraphe 11.5.3.6)
- Z_{THV} = impédance du transformateur de groupe, rapportée au côté haute tension (voir paragraphe 8.3.2.2)
- U_{nQ} = tension nominale du réseau au point de connexion Q avec le groupe générateur-transformateur
- t_r = rapport de transformation assigné correspondant à la position principale du changeur de prise
- t_f = rapport de transformation fictif $t_f = U_n / U_{rG} = U_{nQ} / U_{rG}$
- x'_d, φ_{rG} = (voir paragraphe 11.5.3.6)
- x_T = réactance du transformateur de groupe, rapportée à U_{rT}^2 / S_{rT} , $x_T = X_T / (U_{rT}^2 / S_{rT})$

Notes 1. - L'équation (44) correspond à $U_Q = U_{nQ}$ et $U_G = U_{rG}$. Des précautions particulières sont recommandées si, pour un groupe générateur-transformateur ayant un transformateur avec changeur de prise, la tension de fonctionnement U_{Omin} est en permanence supérieure à U_{nQ} ($U_{Omin} > U_{nQ}$) et/ou si U_G diffère de U_{rG} ($U_G > U_{rG}$) ou si, pour un groupe générateur-transformateur ayant un transformateur sans changeur de prise, la tension U_G de l'alternateur est en permanence supérieure à U_{rG} ($U_G > U_{rG}$).

2. - Les valeurs des facteurs de correction pour les impédances négative et homopolaire intervenant dans les courts-circuits dissymétriques sont à l'étude.

11.6 Conversion des impédances, courants et tensions

Les indications détaillées données au paragraphe 8.4 restent applicables. Des exceptions figurant aux paragraphes 12.2.2.1 et 12.2.3.1 sont à prendre en considération.

12. Calcul des courants de court-circuit

12.1 Généralités

Pour le calcul du courant de court-circuit symétrique initial I''_k , du courant de court-circuit symétrique coupé I_b et du courant de court-circuit permanent I_k au point de défaut, on peut transformer le réseau en une impédance de court-circuit équivalente Z_k . Cette procédure n'est pas applicable au calcul de la valeur de crête i_p du courant de court-circuit. Dans ce cas, il y a lieu de distinguer les réseaux qui ont des branches en parallèle de ceux qui n'en ont pas (voir paragraphes 9.1.1.2, 9.1.2.2 et 9.1.3.2).

12.2 Méthode de calcul des courts-circuits symétriques

12.2.1 Court-circuit alimenté par un alternateur

12.2.1.1 Courant de court-circuit symétrique initial I''_k

Les valeurs initiales du courant de court-circuit symétrique correspondant aux exemples du point 1) de la figure 13a, page 64, et de la figure 15, page 76, se calculent au moyen de la tension de source équivalente $cU_n / \sqrt{3}$ au point de défaut et de l'impédance de court-circuit $Z_k = R_k + jX_k$:

$$I''_k = \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_k} = \frac{cU_n}{\sqrt{3} \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (45)$$

Pour le calcul du courant de court-circuit maximal, prendre le facteur de tension c indiqué au tableau I.

Note. = On peut normalement considérer que la tension assignée U_{rG} du générateur dépasse de 5% la tension nominale du réseau U_n .

where:

- Z_{PSU} = corrected impedance of power-station unit related to the high-voltage side
 Z_G = impedance of the generator $Z_G = R_G + jX_d''$ (see Sub-clause 11.5.3.6)
 Z_{THV} = impedance of the unit transformer related to the high-voltage side (see Sub-clause 8.3.2.2)
 U_{nQ} = nominal system voltage at the connection point Q of the power-station unit
 t_t = rated transformation ratio at which the tap-changer is in the main position
 t_f = fictitious transformation ratio $t_f = U_n / U_{rG} = U_{nQ} / U_{rG}$
 x_d'', φ_{rG} = (see Sub-clause 11.5.3.6)
 x_T = reactance of the unit transformer related to U_{rT}^2 / S_{rT} , $x_T = X_T / (U_{rT}^2 / S_{rT})$

- Notes 1. – Equation (44) is valid if $U_Q = U_{nQ}$ and $U_G = U_{rG}$. Special considerations are recommended if for a power-station unit having a transformer with a tap changer the operational voltage U_{Qmin} is permanently higher than U_{nQ} ($U_{Qmin} > U_{nQ}$), and/or U_G differs from U_{rG} ($U_G > U_{rG}$) or for a power-station unit having a transformer without a tap changer the voltage U_G of the generator is permanently higher than U_{rG} ($U_G > U_{rG}$).
2. – Values for correction factors for negative-sequence impedances and zero-sequence impedances at unbalanced short circuits are under consideration.

11.6 Conversion of impedances, currents and voltages

The details given in Sub-clause 8.4 remain valid. Exceptions in the Sub-clauses 12.2.2.1 and 12.2.3.1 are to be regarded.

12. Calculation of short-circuit currents

12.1 General

For the calculation of the initial symmetrical short-circuit current I_k'' , the symmetrical short-circuit breaking current I_b and the steady-state short-circuit current I_k at the short-circuit location, the system may be converted by transformations into an equivalent short-circuit impedance Z_k . This procedure is not allowed when calculating the peak short-circuit current i_p . In this case it is necessary to distinguish between systems with and without parallel branches (see Sub-clauses 9.1.1.2, 9.1.2.2 and 9.1.3.2).

12.2 Calculation method for balanced short circuits

12.2.1 Short circuit fed from one generator

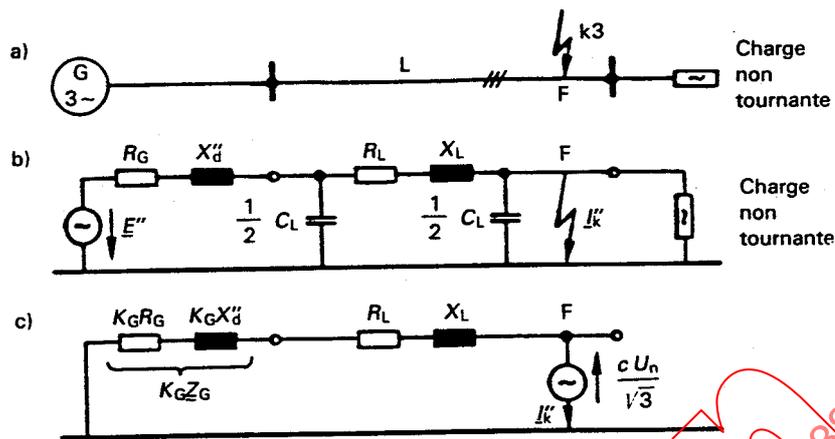
12.2.1.1 Initial symmetrical short-circuit current I_k''

The initial symmetrical short-circuit current for the examples of item 1) of Figure 13a, page 65, and of Figure 15, page 77, is calculated with the equivalent source voltage $cU_n / \sqrt{3}$ at the short-circuit location and the short-circuit impedance $Z_k = R_k + jX_k$:

$$I_k'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_k} = \frac{cU_n}{\sqrt{3} \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (45)$$

For calculation of the maximum short-circuit current, the value of the voltage factor c is chosen according to Table I.

Note. = Normally it can be presumed that the rated voltage U_{rG} of the generator is 5% higher than the nominal system voltage U_n .



- a) Schéma du réseau.
- b) Circuit équivalent (système direct), comprenant la tension subtransitoire E'' de l'alternateur.
- c) Circuit équivalent pour le calcul du courant de court-circuit, comprenant la source de tension équivalente (voir article 6 et paragraphe 11.4) et les impédances, d'après les paragraphes 11.5.3 et, plus spécialement, 11.5.3.6.

FIG. 15. - Exemple de calcul du courant de court-circuit symétrique initial I_k'' relatif à un court-circuit alimenté directement par un alternateur.

12.2.1.2 Valeur de crête i_p du courant de court-circuit

Le calcul de la valeur de crête du courant de court-circuit s'effectue comme il est indiqué au paragraphe 9.1.1.2. Pour les alternateurs, il y a lieu de prendre les valeurs corrigées de résistance $K_G R_G$ et de réactance $K_G X_d''$.

12.2.1.3 Courant de court-circuit symétrique coupé I_b

On tient compte de la décroissance du courant de court-circuit symétrique coupé par l'introduction du facteur μ .

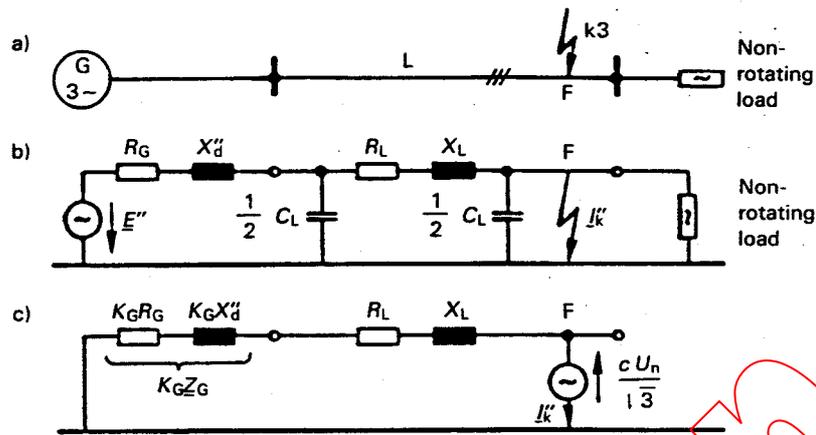
$$I_b = \mu I_k'' \tag{46}$$

où μ est fonction du temps mort minimal t_{min} (voir paragraphe 3.23) et du rapport I_k''/I_{rG} .

Les valeurs de μ données par les équations ci-après s'appliquent aux cas des turbo-alternateurs à moyenne tension, aux alternateurs à pôles saillants et aux compensateurs synchrones à excitation par machine tournante ou par redresseur statique (pourvu que, pour ce qui est des redresseurs statiques, le temps mort minimal soit inférieur à 0,25 s et la tension maximale d'excitation inférieure à 1,6 fois la tension d'excitation à charge assignée). Dans tous les autres cas, on prendra $\mu = 1$ si sa valeur exacte n'est pas connue.

$$\begin{aligned} \mu &= 0,84 + 0,26 e^{-0,26 I_{rG}/I_k''} \text{ pour } t_{min} = 0,02 \text{ s} \\ \mu &= 0,71 + 0,51 e^{-0,30 I_{rG}/I_k''} \text{ pour } t_{min} = 0,05 \text{ s} \\ \mu &= 0,62 + 0,72 e^{-0,32 I_{rG}/I_k''} \text{ pour } t_{min} = 0,10 \text{ s} \\ \mu &= 0,56 + 0,94 e^{-0,38 I_{rG}/I_k''} \text{ pour } t_{min} \geq 0,25 \text{ s} \end{aligned} \tag{47}$$

Les valeurs I_{kG}'' (courant de court-circuit partiel aux bornes de l'alternateur) et I_{rG} se rapportent à la même tension. Dans le cas de moteurs asynchrones, remplacer I_{kG}''/I_{rG} par I_{kM}''/I_{rM} (voir le tableau II).



- a) System diagram.
 b) Equivalent circuit (positive-sequence system) with the subtransient voltage E'' of the generator.
 c) Equivalent circuit for the calculation with the equivalent voltage source (see Clause 6 and Sub-clause 11.4) and the impedances according to Sub-clause 11.5.3 and especially to Sub-clause 11.5.3.6.

FIG. 15. – Example for the calculation of the initial symmetrical short-circuit current I_k'' for a short circuit fed directly from one generator.

12.2.1.2 Peak short-circuit current i_p

The calculation of the peak short-circuit current is done as shown in Sub-clause 9.1.1.2. For the generator the corrected resistance $K_G R_G$ and the corrected reactance $K_G X_d''$ is used.

12.2.1.3 Symmetrical short-circuit breaking current I_b

The decay to the symmetrical short-circuit breaking current is taken account of with the factor μ .

$$I_b = \mu I_k'' \quad (46)$$

where μ is dependent on the minimum time delay t_{\min} (see Sub-clause 3.23) and the ratio I_k''/I_{TG} .

The values of μ of the following equations apply to the case where medium voltage turbine generators, salient-pole generators and synchronous compensators are excited by rotating exciters or by static converter exciters (provided that for static exciters the minimum time delay is less than 0.25 s and the maximum excitation-voltage is less than 1.6 times the rated load excitation-voltage). For all other cases μ is taken to be $\mu = 1$ if the exact value is unknown.

$$\begin{aligned} \mu &= 0.84 + 0.26 e^{-0.26 I_{kG}/I_{TG}} \text{ for } t_{\min} = 0.02 \text{ s} \\ \mu &= 0.71 + 0.51 e^{-0.30 I_{kG}/I_{TG}} \text{ for } t_{\min} = 0.05 \text{ s} \\ \mu &= 0.62 + 0.72 e^{-0.32 I_{kG}/I_{TG}} \text{ for } t_{\min} = 0.10 \text{ s} \\ \mu &= 0.56 + 0.94 e^{-0.38 I_{kG}/I_{TG}} \text{ for } t_{\min} \geq 0.25 \text{ s} \end{aligned} \quad (47)$$

The values I_{kG} (partial short-circuit current at the terminals of the generator) and I_{TG} are related to the same voltage. In the case of asynchronous motors, replace I_{kG}/I_{TG} by I_{kM}/I_{TM} (see Table II).

Si $I''_{kG}/I_{rG} \leq 2$, prendre $\mu = 1$ pour tout temps mort minimal t_{min} .

On peut également déduire μ de la figure 16 en prenant pour abscisse le courant de court-circuit triphasé. Pour les valeurs intermédiaires de temps mort minimal on pourra procéder par interpolation linéaire entre les courbes.

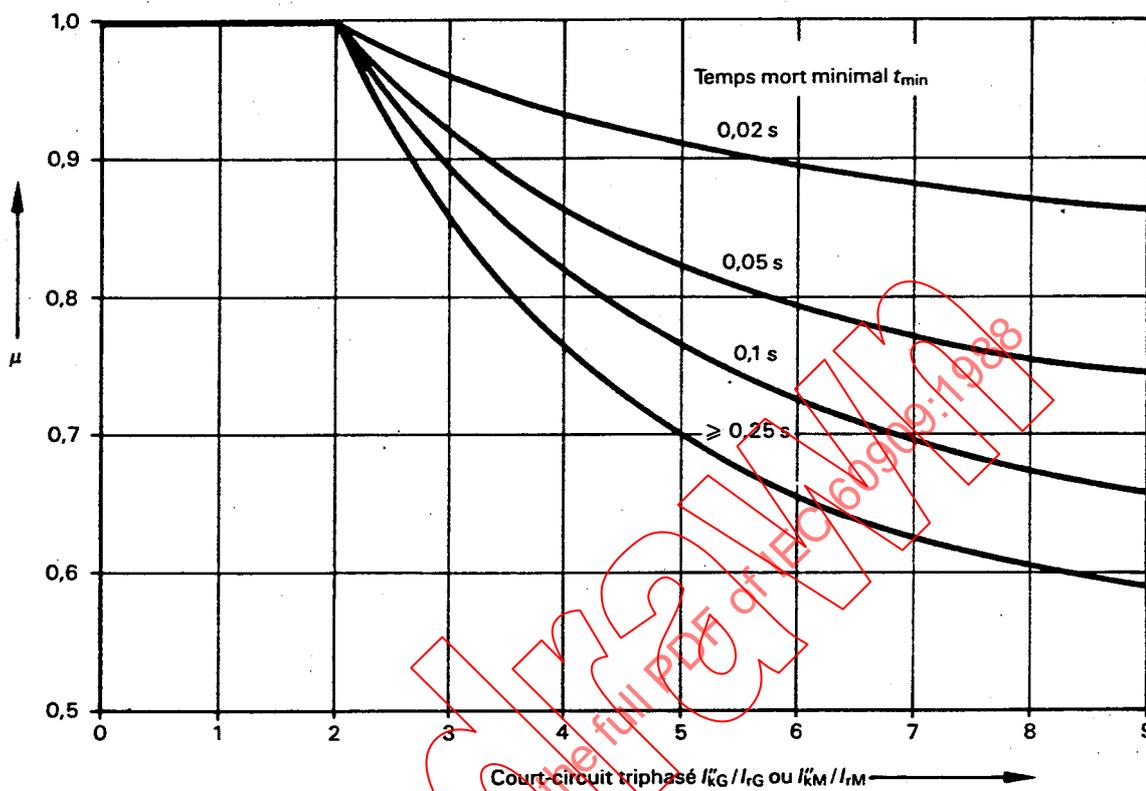


FIG. 16. — Facteur μ pour le calcul du courant de court-circuit coupé I_b .

La figure 16 peut également être utilisée avec les générateurs basse tension à excitation compound dont le temps mort minimal est $t_{min} \leq 0,1$ s. Le calcul des courants coupés basse tension après un temps mort t_{min} de plus de 0,1 s sort du cadre des procédures indiquées. Les constructeurs des générateurs sont à même de fournir ces renseignements.

12.2.1.4 Courant de court-circuit permanent I_k

L'amplitude du courant de court-circuit permanent I_k dépendant des conditions de saturation et des manœuvres dans le réseau, son calcul est moins précis que celui du courant symétrique initial I''_k . Les méthodes de calcul proposées peuvent être considérées comme procurant une estimation suffisamment précise des valeurs supérieure et inférieure pour le cas où le court-circuit est alimenté par un générateur ou une machine synchrone.

a) Courant de court-circuit permanent maximal I_{kmax}

On peut considérer que, sous la plus forte excitation du générateur synchrone, le courant de court-circuit permanent maximal est donné par:

$$I_{kmax} = \lambda_{max} I_{rG} \tag{48}$$

λ_{max} peut s'obtenir à partir de la figure 17 pour les turbo-alternateurs et de la figure 18 pour les machines à pôles saillants. x_{dsat} (sat = saturé) est l'inverse du rapport de court-circuit.

If $I'_{kG}/I_{rG} \leq 2$, apply $\mu = 1$ at every minimum time delay t_{min} .

The factor μ may also be obtained from Figure 16 taking the abscissa for three-phase short circuit. For other values of minimum time delay, linear interpolation between curves is acceptable.

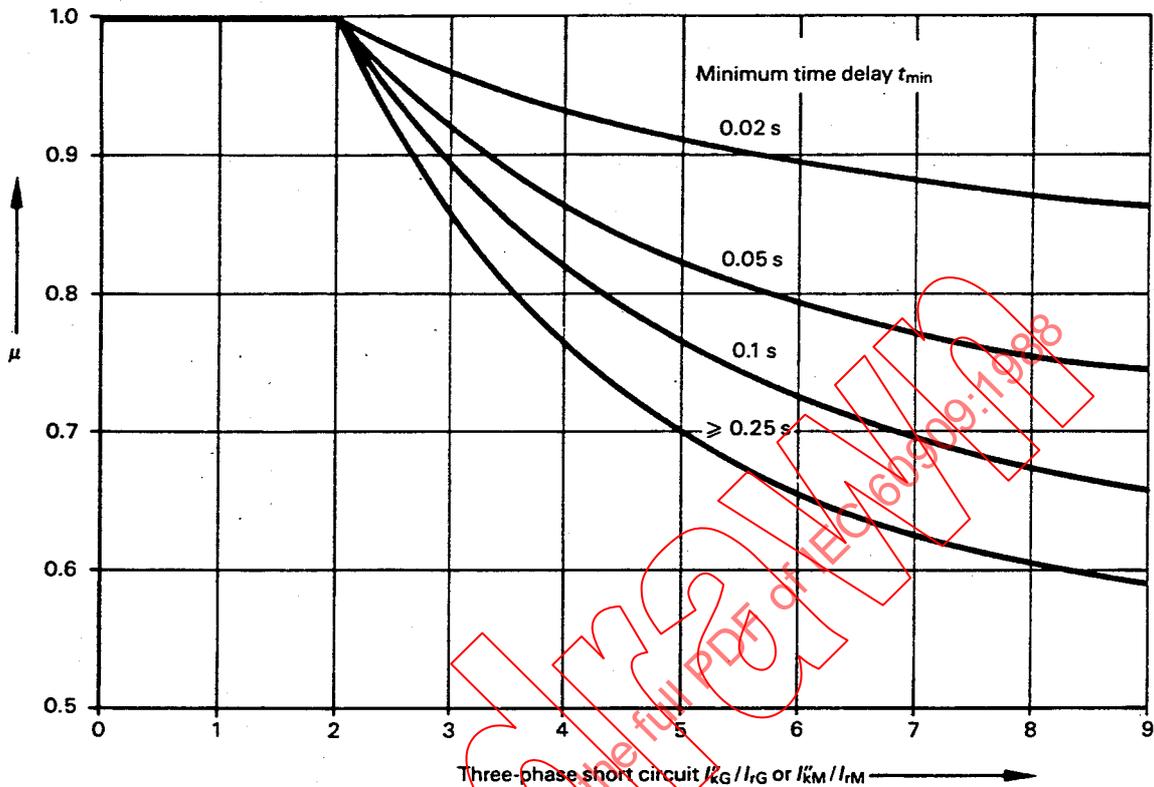


FIG. 16. - Factor μ for the calculation of short-circuit breaking current I_b .

Figure 16 can also be used for compound excited low-voltage generators with a minimum time delay $t_{min} \leq 0.1$ s. The calculation of low-voltage breaking currents after a time delay $t_{min} > 0.1$ s is not included in these procedures; generator manufacturers may be able to provide information.

12.2.1.4 Steady-state short-circuit current I_k

Because the magnitude of the steady-state short-circuit I_k depends upon saturation influences and switching-condition changes in the system its calculation is less accurate than that of the initial symmetrical short-circuit current I'_k . The methods of calculation given here can be regarded as a sufficient estimate for the upper and lower limits, in the case when the short circuit is fed by one generator or one synchronous machine respectively.

a) Maximum steady-state short-circuit current I_{kmax}

The following may be set at the highest excitation of the synchronous generator for the maximum steady-state short-circuit current:

$$I_{kmax} = \lambda_{max} I_{rG} \tag{48}$$

λ_{max} may be obtained from Figures 17 or 18 for turbine generators or salient-pole machines. x_{dsat} (sat = saturated) is the reciprocal of the short-circuit ratio.

Les courbes de λ_{\max} de la série un sont fondées sur les plus fortes tensions d'excitation charge possibles, prises égales à 1,3 fois la tension d'excitation assignée à la charge et au facteur de puissance assignés pour les turbo-alternateurs (voir figure 17a) et à 1,6 fois la tension d'excitation assignée pour les machines à pôles saillants (voir figure 18a).

Les courbes de λ_{\max} de la série deux sont fondées sur les plus fortes tensions d'excitation charge possibles, prises égales à 1,6 fois la tension d'excitation assignée à la charge et au facteur de puissance assignés pour les turbo-alternateurs (voir figure 17b) et à 2,0 fois la tension d'excitation assignée pour les machines à pôles saillants (voir figure 18b).

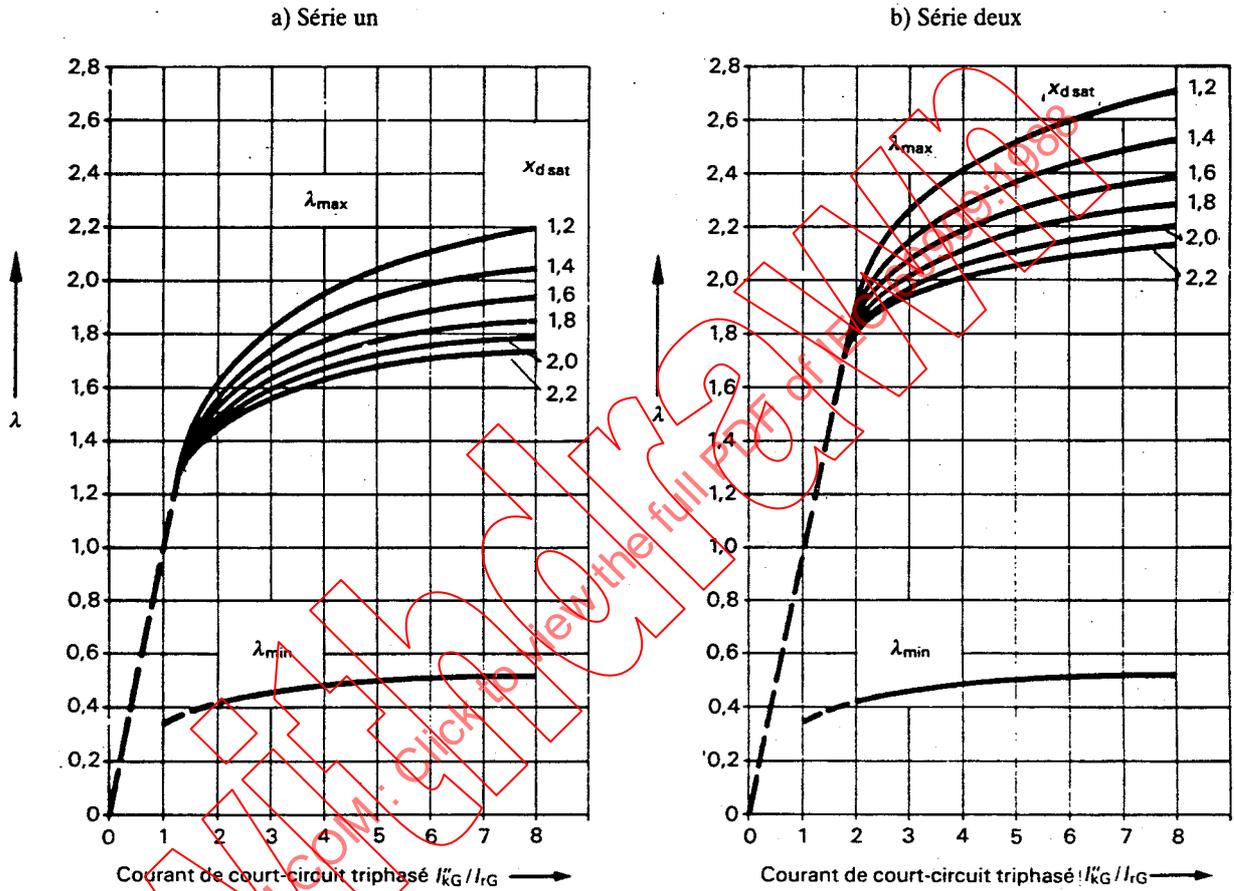


FIG. 17. — Facteurs λ_{\max} et λ_{\min} pour turbo-alternateurs. (Les définitions des séries un et deux sont données dans le texte.)

b) Courant de court-circuit permanent minimal $I_{k \min}$

On admet que le courant de court-circuit permanent minimal est obtenu lorsque la machine synchrone a son excitation constante à vide.

$$I_{k \min} = \lambda_{\min} I_{rG} \tag{49}$$

λ_{\min} s'obtient à partir des figures 17 pour les turbo-alternateurs et 18 pour les alternateurs à pôles saillants.

Note. — En cas d'excitation statique, alimentée par le jeu de barres, sans maintien de courant, le courant de court-circuit permanent minimal pour court-circuit triphasé au jeu de barres est nul.

λ_{max} -curves of Series One are based on the highest possible excitation-voltage according to either 1.3 times the rated excitation at rated load and power factor for turbine generators (see Figure 17a) or 1.6 times the rated excitation for salient-pole machines (see Figure 18a).

λ_{max} -curves of Series Two are based on the highest possible excitation-voltage according to either 1.6 times the rated excitation at rated load and power factor for turbine generators (see Figure 17b) or 2.0 times the rated excitation for salient-pole machines (see Figure 18b).

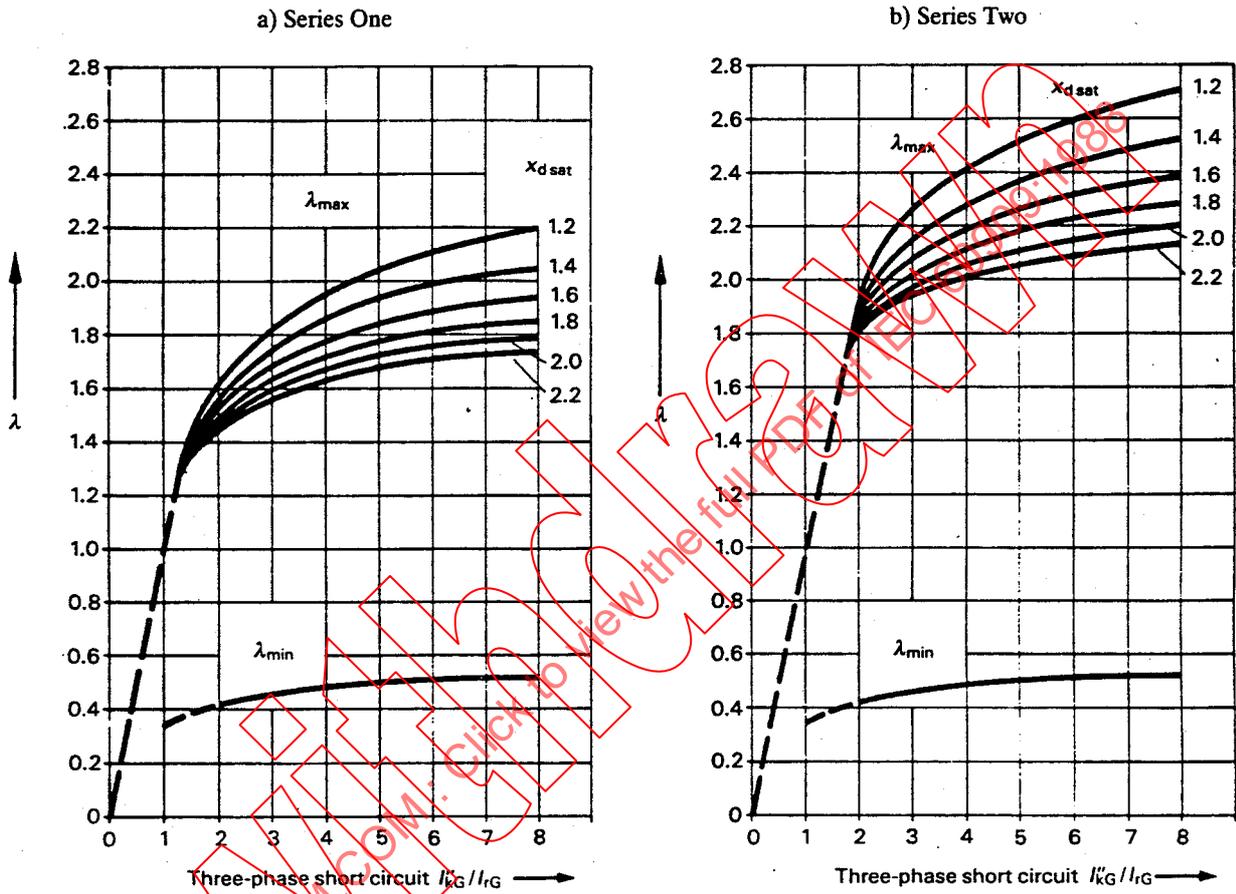


FIG. 17. - Factors λ_{max} and λ_{min} for turbine generators. (Definitions of Series One and Series Two are given in the text.)

b) Minimum steady-state short-circuit current I_{kmin}

For the minimum steady-state short-circuit current, constant no-load excitation of the synchronous machine is assumed.

$$I_{kmin} = \lambda_{min} I_{rG} \tag{49}$$

λ_{min} may be obtained from Figure 17 or 18 for turbine generators or salient-pole machines.

Note. - For bus fed static exciters without current forcing the minimum steady-state short-circuit current for a three-phase bus short circuit is zero.

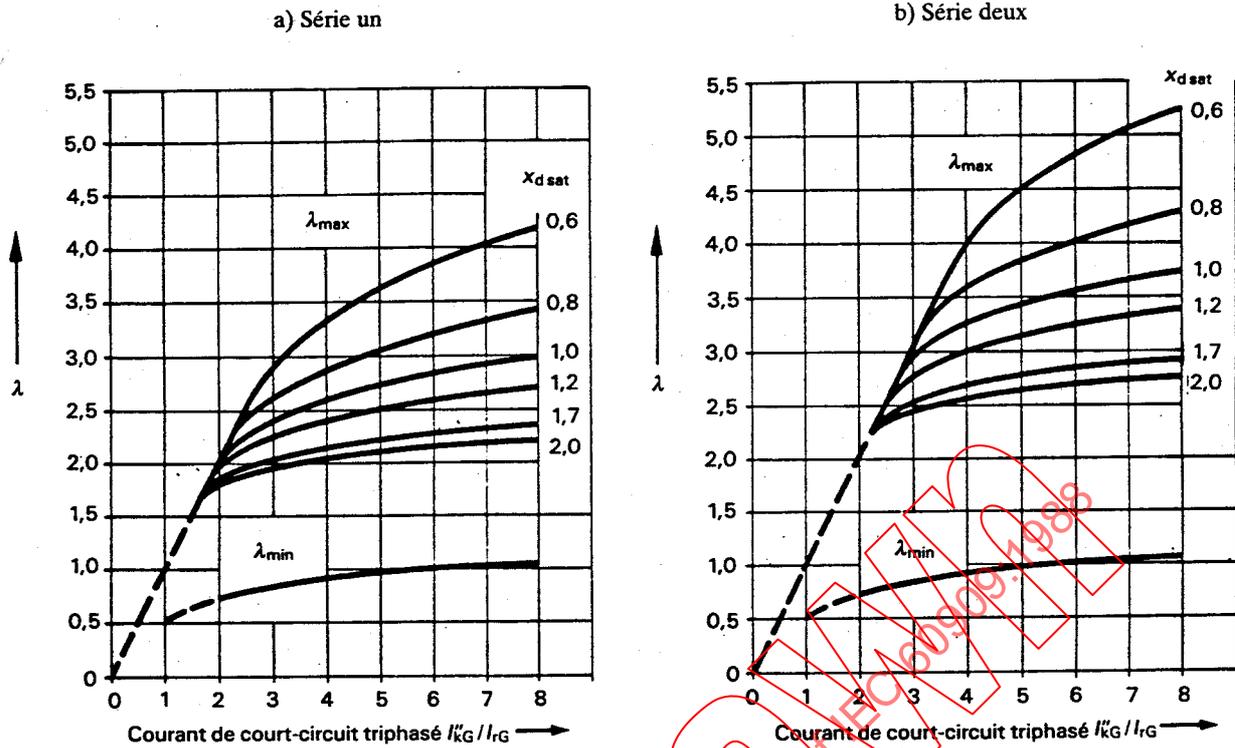


FIG. 18. - Facteurs λ_{max} et λ_{min} pour alternateurs à pôles saillants. (Les définitions des séries un et deux sont données dans le texte.)

12.2.2 Court-circuit alimenté par un groupe alternateur-transformateur

12.2.2.1 Courant de court-circuit symétrique initial I_k

Dans les exemples correspondant au point 2 de la figure 13a, page 64, et à la figure 19, le courant de court-circuit symétrique initial se calcule au moyen de la source de tension équivalente $cU_n / \sqrt{3}$ appliquée au point de défaut et des impédances corrigées de l'alternateur et du transformateur de groupe (paragraphe 11.5.3.7 ou 11.5.3.8), en série avec l'impédance de ligne $Z_L = R_L + jX_L$, conformément au paragraphe 8.3.2.3.

a) Series One

b) Series Two

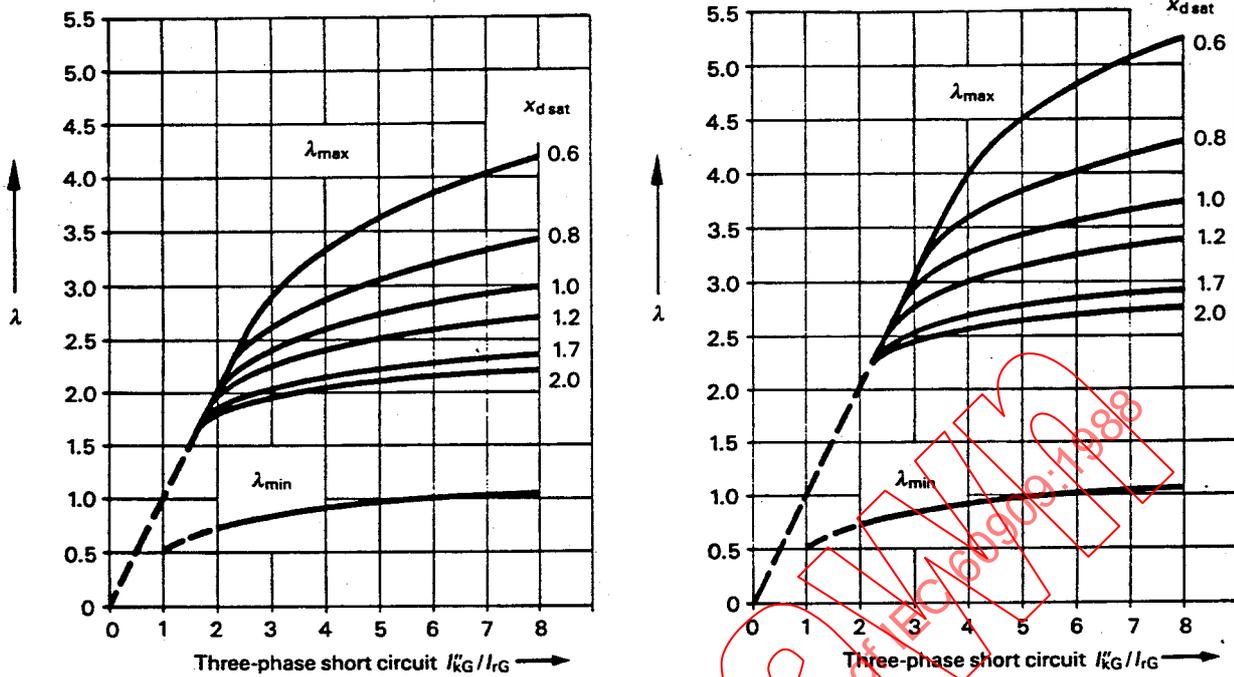
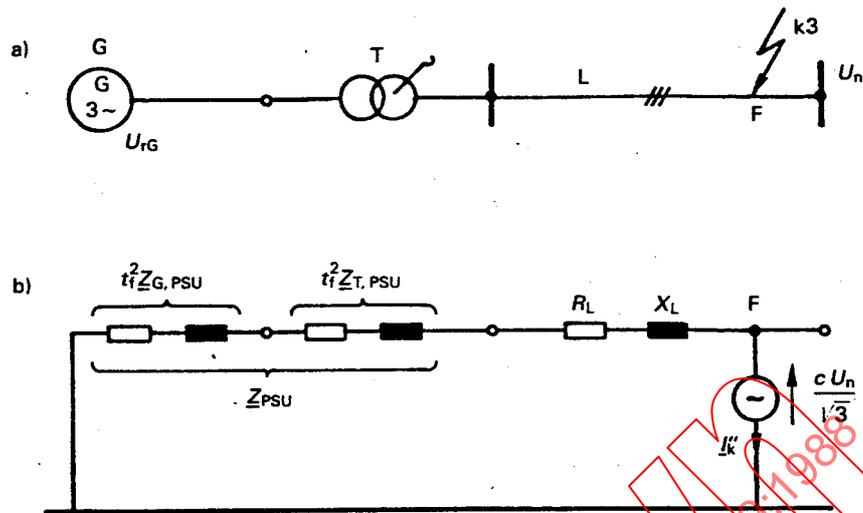


FIG. 18. — Factors λ_{max} and λ_{min} for salient-pole machines. (Definitions of Series One and Two are given in the text.)

12.2.2 Short circuit fed from one power-station unit

12.2.2.1 Initial symmetrical short-circuit current I_k'

For the examples in Item 2) of Figure 13a, page 65, and in Figure 19 the initial symmetrical short-circuit current is calculated with the equivalent voltage source $cU_n/\sqrt{3}$ at the short-circuit location and the corrected impedances of the generator and the transformer of the power-station unit (Sub-clauses 11.5.3.7 or 11.5.3.8) in series with a line impedance $Z_L = R_L + jX_L$ according to Sub-clause 8.3.2.3.



- a) Schéma du réseau.
- b) Schéma du circuit équivalent dans le système direct pour le calcul du courant de court-circuit, comprenant la source de tension équivalente au point de défaut et les impédances corrigées de l'alternateur et du transformateur de groupe.

FIG. 19. — Exemple pour le calcul du courant de court-circuit symétrique initial I''_k , alimenté par un groupe alternateur-transformateur.

Pour le calcul du courant de court-circuit symétrique initial, il convient d'utiliser l'équation (45).

Dans l'exemple de la figure 19, l'impédance de court-circuit est donnée, d'après le paragraphe 11.5.3.7, par:

$$\underline{Z}_k = R_k + jX_k = t_f^2 \underline{Z}_{G,PSU} + t_f^2 \underline{Z}_{T,PSU} + \underline{Z}_L \quad (50)$$

$\underline{Z}_{G,PSU}$ se déduit de l'équation (39) et $\underline{Z}_{T,PSU}$ de l'équation (41). Les deux impédances sont à convertir en haute tension au moyen du rapport de transformation fictif $t_f = U_n / U_{rG}$.

Si l'on opère suivant les indications du paragraphe 11.5.3.8, l'impédance de court-circuit correspondant à l'exemple de la figure 19 est donnée par:

$$\underline{Z}_k = R_k + jX_k = \underline{Z}_{PSU} + \underline{Z}_L \quad (51)$$

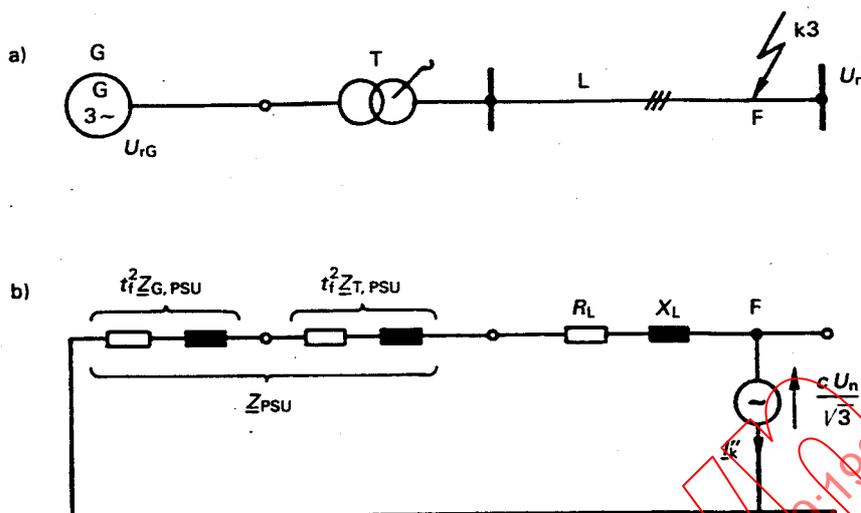
\underline{Z}_{PSU} étant calculé par l'équation (43).

12.2.2.2 Valeur de crête i_p du courant de court-circuit

Le calcul s'effectue conformément au paragraphe 9.1.1.2. Pour les groupes générateur-transformateur, prendre les valeurs corrigées des résistances et réactances comme il est indiqué aux paragraphes 11.5.3.7 et 11.5.3.8.

12.2.2.3 Courant de court-circuit symétrique coupé I_b

Le calcul du courant de court-circuit symétrique coupé s'effectue comme il est indiqué au paragraphe 12.2.1.3 avec la valeur de μ donnée par l'équation (47) ou la figure 16, page 78. Utiliser la valeur transformée $I''_{kPSU} = t_f I''_{kG}$ à la place de I''_{kG} .



- a) System diagram.
- b) Equivalent circuit diagram of the positive-sequence system for the calculation with the equivalent voltage source at the short-circuit location and the corrected impedances of the generator and the transformer of the power-station unit.

FIG. 19. – Example of the calculation of the initial symmetrical short-circuit current I''_k fed from one power-station unit.

For the calculation of the initial symmetrical short-circuit current Equation (45) should be used.

The short-circuit impedance for the example in Figure 19 is given by the following in accordance with Sub-clause 11.5.3.7:

$$\underline{Z}_k = R_k + jX_k = t_f^2 \underline{Z}_{G,PSU} + t_f^2 \underline{Z}_{T,PSU} + \underline{Z}_L \tag{50}$$

$\underline{Z}_{G,PSU}$ is taken from Equation (39) and $\underline{Z}_{T,PSU}$ from Equation (41). Both impedances are to be transformed to the high-voltage side with the fictitious transformation ratio $t_f = U_n / U_{rG}$.

Following Sub-clause 11.5.3.8 the short-circuit impedance for the example in Figure 19 is given by:

$$\underline{Z}_k = R_k + jX_k = \underline{Z}_{PSU} + \underline{Z}_L \tag{51}$$

\underline{Z}_{PSU} is taken from Equation (43).

12.2.2.2 Peak short-circuit current i_p

The calculation is done as shown in Sub-clause 9.1.1.2. For power-station units the corrected resistances and the corrected reactances according to Sub-clause 11.5.3.7 and 11.5.3.8 are used.

12.2.2.3 Symmetrical short-circuit breaking current I_b

The calculation of the symmetrical short-circuit breaking current is done as shown in Sub-clause 12.2.1.3 with μ according to Equation (47) or Figure 16, page 79. Insert the transformed value $I''_{kPSU} = t_f I''_{kPSU}$ in place of I''_{kG} .

12.2.2.4 Courant de court-circuit permanent I_k

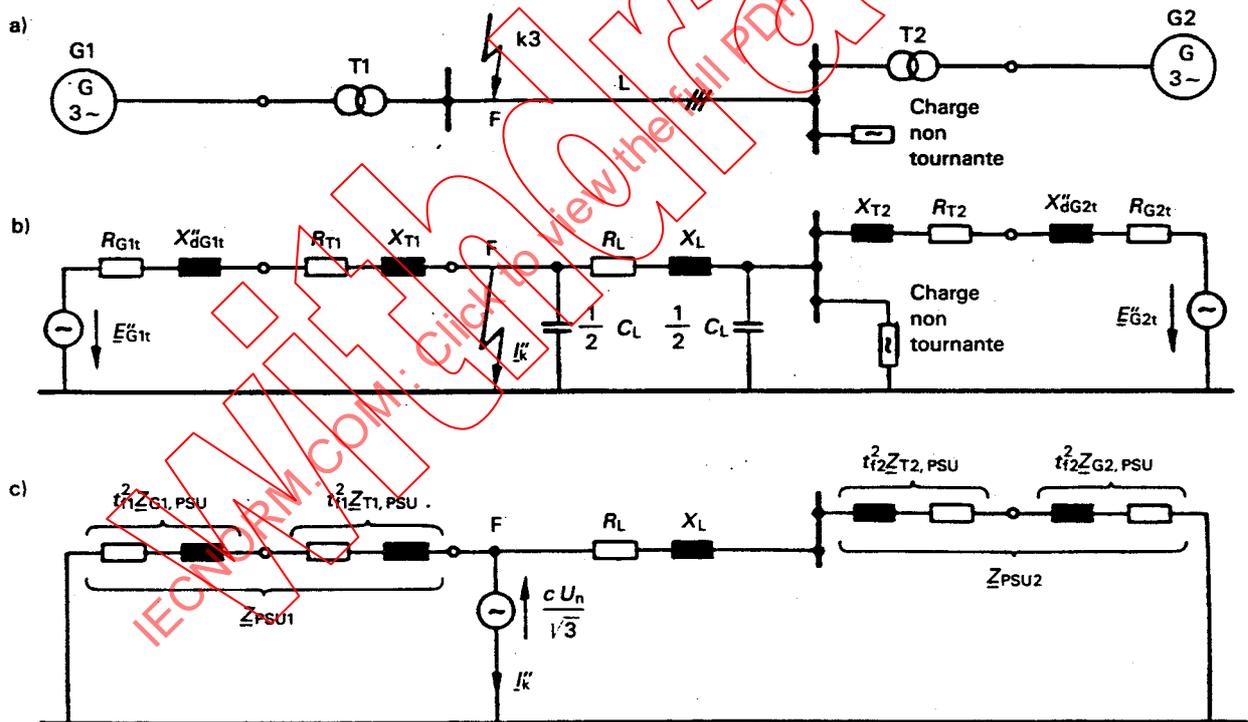
Le calcul peut s'effectuer comme il est indiqué au paragraphe 12.2.1.4 si le court-circuit est alimenté par un groupe générateur-transformateur. Utiliser la valeur transformée $I''_{kPSU1} = t_r I''_{kPSU}$ à la place de I''_{kG} .

12.2.3 Court-circuit triphasé alimenté par plusieurs sources indépendantes

12.2.3.1 Généralités

De même que les courts-circuits alimentés par des sources indépendantes (voir figure 13b, page 64), les courts-circuits alimentés directement à travers une impédance commune Z peuvent se calculer selon la procédure indiquée dans le présent paragraphe, si $Z < 0,05 U_{nB} / (\sqrt{3} I''_{kB})$ (voir figure 13c, page 64).

D'une façon générale, la source de tension équivalente $cU_n / \sqrt{3}$ est placée au point de défaut (voir figure 20c), U_n étant la tension nominale du réseau où se produit le défaut. Les alternateurs alimentant directement (sans transformateur) le court-circuit se traitent comme il est indiqué au paragraphe 11.5.3.6, les groupes générateur-transformateur, comme il est indiqué au paragraphe 11.5.3.7 ou 11.5.3.8 et 12.2.2 et les moteurs asynchrones comme il est indiqué au paragraphe 11.5.3.5, compte tenu de l'article 13.



- a) Schéma du réseau.
- b) Schéma du circuit équivalent dans le système direct, comprenant les tensions subtransitoires E'' .
- c) Schéma du circuit équivalent dans le système direct, comprenant la source de tension équivalente $cU_n / \sqrt{3}$ placée au point de défaut.

FIG. 20. — Exemple de calcul du courant de court-circuit symétrique initial I''_k , alimenté par des sources indépendantes.

12.2.2.4 Steady-state short-circuit current I_k

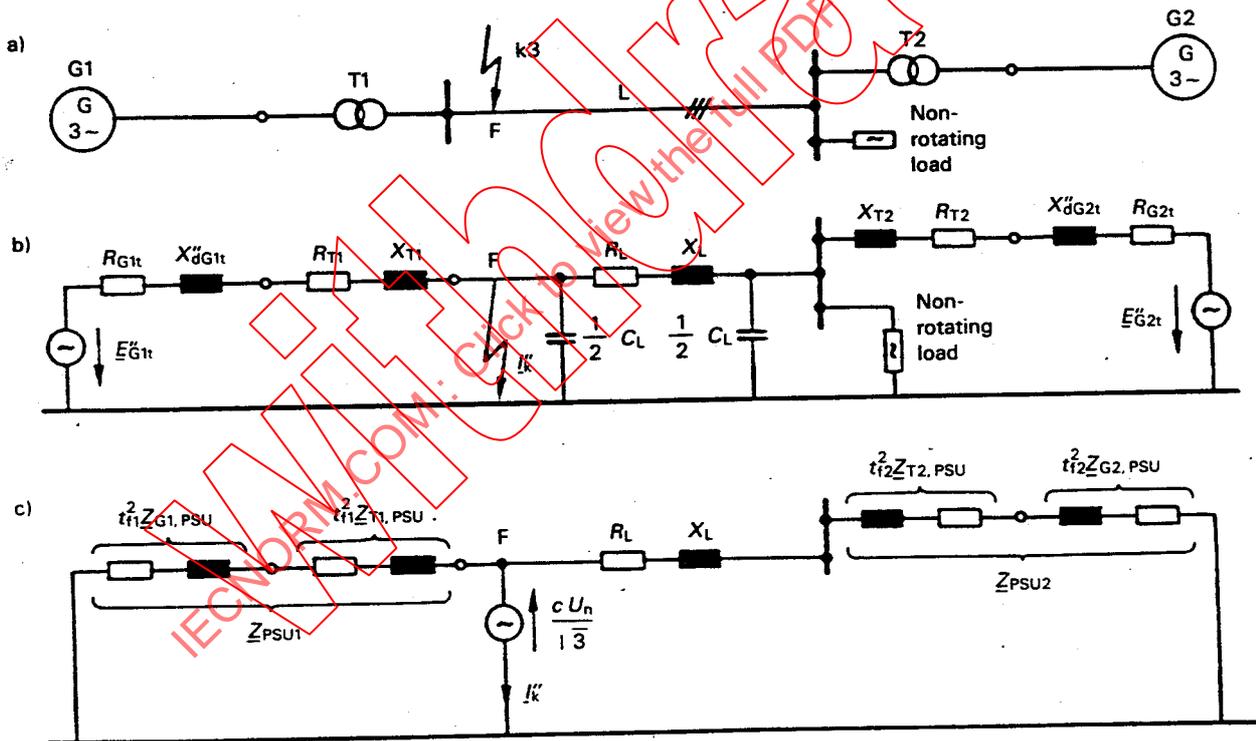
The calculation can be done as shown in Sub-clause 12.2.1.4, if the short circuit is fed by one power-station unit. Insert the transformed value $I'_{kPSU1} = t_r I_{kPSU}$ in place of I'_{kG} .

12.2.3 Three-phase short circuit fed from non-meshed sources

12.2.3.1 General

In addition to short circuits fed from non-meshed sources (see Figure 13b, page 65), all short circuits directly fed through a common impedance Z , can be calculated by the procedure given in this sub-clause, if $Z < 0.05 U_{nB} / (\sqrt{3} I'_{kB})$ holds (see Figure 13c, page 65).

In general the equivalent voltage source $cU_n / \sqrt{3}$ is introduced (see Figure 20c) at the short-circuit location. U_n is the nominal voltage of the system in which the short circuit occurs. Generators, feeding the short circuit directly (without transformers) are to be treated as given in Sub-clause 11.5.3.6, power-station units according to Sub-clauses 11.5.3.7 or 11.5.3.8 and 12.2.2 and asynchronous motors as shown in Sub-clause 11.5.3.5, taking into account Clause 13.



- a) System diagram.
- b) Equivalent circuit diagram of the positive-sequence system with the subtransient voltages E' .
- c) Equivalent circuit diagram of the positive-sequence system for the calculation with the equivalent voltage source $cU_n / \sqrt{3}$ at the short-circuit location.

FIG. 20. - Example of the calculation of the initial symmetrical short-circuit current I'_k fed from non-meshed sources.

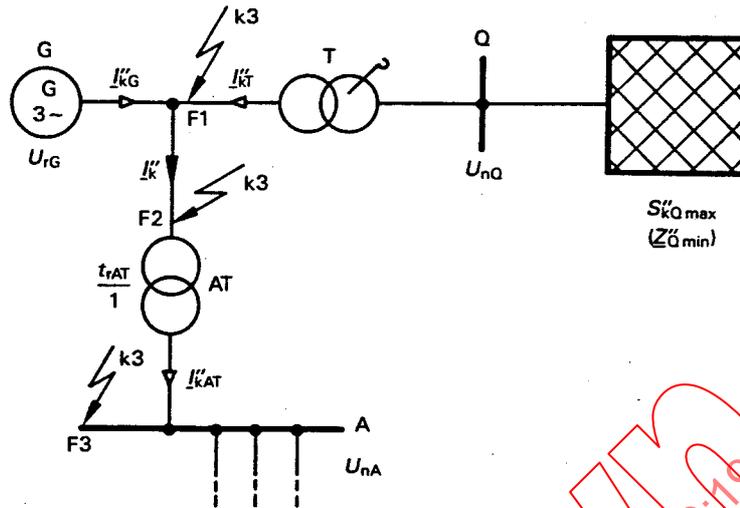


FIG. 21. — Courants partiels et courant total relatifs à des courts-circuits triphasés situés entre alternateur et transformateur d'un groupe de production et sur le jeu de barres A des auxiliaires (voir également le paragraphe 12.2.4.1).

Pour un court-circuit situé en F1 de la figure 21, les courants de court-circuit symétriques initiaux I''_{kG} et I''_{kT} sont donnés par:

$$I''_{kG} = \frac{cU_{rG}}{\sqrt{3} |Z_{G, PSU}|} = \frac{cU_{rG}}{\sqrt{3} K_{G, PSU} |Z_G|} \quad (52)$$

$$I''_{kT} = \frac{cU_{rG}}{\sqrt{3} |Z_{T, PSU} + \frac{1}{t_f^2} Z_{Qmin}|} \quad (53)$$

où:

$Z_{G, PSU}$ = est donné par l'équation (39), au paragraphe 11.5.3.7

$Z_{T, PSU}$ = est donné par l'équation (41), au paragraphe 11.5.3.7

$t_f = U_{nQ}/U_{rG}$ = rapport de transformation fictif donné par le paragraphe 11.6

Z_{Qmin} = valeur minimale de l'impédance de la ligne d'alimentation du réseau, correspondant à S''_{kQmax}

Il y a lieu de prendre pour S''_{kQmax} la plus grande valeur de puissance envisageable au cours de la vie du poste.

Le calcul du courant-circuit I''_k au point de défaut F2, c'est-à-dire sur la connexion haute tension du transformateur d'auxiliaires AT, dans la figure 21, s'effectue simplement par:

$$I''_k = c \frac{U_{rG}}{\sqrt{3}} \left| \frac{1}{Z_{G, PSU}} + \frac{1}{Z_{T, PSU} + \frac{1}{t_f^2} Z_{Qmin}} \right| = c \frac{U_{rG}}{\sqrt{3}} \frac{1}{|Z_{rs}|} \quad (54)$$

Le courant de court-circuit I''_{kAT} au point de défaut F3 se calcule comme il est indiqué au paragraphe 12.2.4.1.

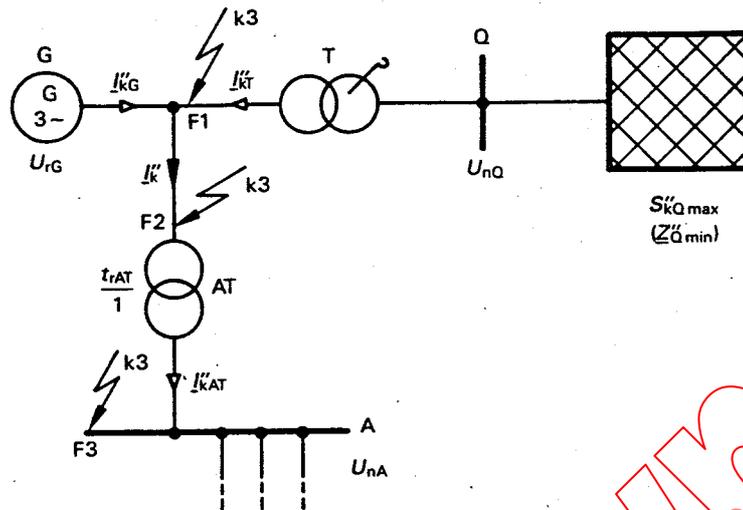


FIG. 21. – Short-circuit currents and partial short-circuit currents for three-phase short circuits between generator and transformer of a power station unit and at the auxiliary busbar A (see also Sub-clause 12.2.4.1).

For calculating the partial short-circuit currents I''_{kG} and I''_{kT} at a short circuit in F1 in Figure 21, the initial symmetrical short-circuit currents are given by:

$$I''_{kG} = \frac{cU_{rG}}{\sqrt{3} |Z_{G, PSU}|} = \frac{cU_{rG}}{\sqrt{3} K_{G, PSU} |Z_G|} \quad (52)$$

$$I''_{kT} = \frac{cU_{rG}}{\sqrt{3} |Z_{T, PSU} + \frac{1}{t_f^2} Z_{Q min}|} \quad (53)$$

where:

$Z_{G, PSU}$ = according to Sub-clause 11.5.3.7, Equation (39)

$Z_{T, PSU}$ = according to Sub-clause 11.5.3.7, Equation (41)

$t_f = U_{nQ}/U_{rG}$ = fictitious transformation ratio, Sub-clause 11.6

$Z_{Q min}$ = minimum value of the impedance of the network feeder, corresponding to $S''_{kQ max}$

For $S''_{kQ max}$ the maximum possible value expected during the life time of the power station is to be introduced.

For the calculation of the short-circuit current I''_k at the short-circuit location F2, for example at the connection to the high-voltage side of the auxiliary transformer AT in Figure 21, it is sufficient to take:

$$I''_k = c \frac{U_{rG}}{\sqrt{3}} \left| \frac{1}{Z_{G, PSU}} + \frac{1}{Z_{T, PSU} + \frac{1}{t_f^2} Z_{Q min}} \right| = c \frac{U_{rG}}{\sqrt{3}} \frac{1}{|Z_{rs}|} \quad (54)$$

The short-circuit current I''_{kAT} at the short-circuit location F3 has to be treated according to Sub-clause 12.2.4.1.

12.2.3.2 *Courant de court-circuit symétrique initial I''_k*

Le courant de court-circuit symétrique initial au point de défaut F peut être pris égal, d'après la figure 22, à la somme des courants de court-circuit partiels. La contribution des moteurs se calcule par application de l'article 13.

$$\underline{I''_k} = \underline{I''_{kPSU}} + \underline{I''_{kT}} + \underline{I''_{kM}} + \dots \quad (55)$$

On obtient une expression plus simple, par excès, en faisant la somme algébrique des courants au lieu de leur somme géométrique.

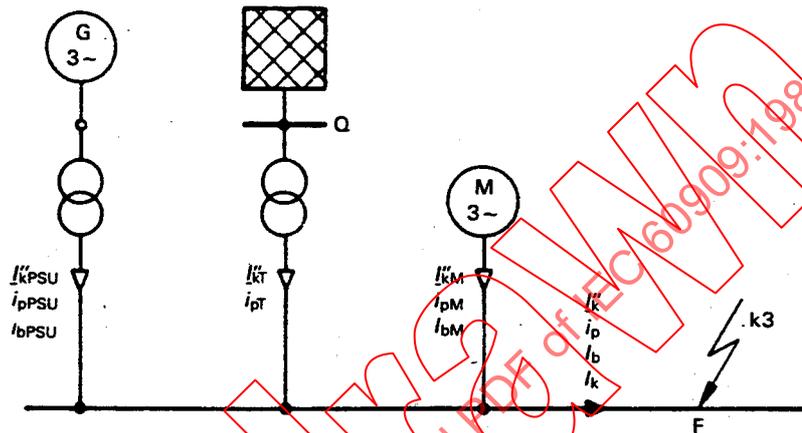


FIG. 22. — Indication pour le calcul d'après les équations (55) à (58) de I''_k , i_p , I_b et I_k relatifs à un court-circuit triphasé alimenté par plusieurs sources indépendantes.

12.2.3.3 *Valeur de crête i_p , courant symétrique coupé I_b et courant permanent I_k*

Si un court-circuit triphasé est alimenté par plusieurs sources indépendantes, conformément à la figure 22, les composantes de la valeur de crête i_p et du courant symétrique coupé I_b au point de défaut F s'ajoutent:

$$i_p = i_{pPSU} + i_{pT} + i_{pM} + \dots \quad (56)$$

$$I_b = I_{bPSU} + I''_{kT} + I_{bM} + \dots \quad (57)$$

$$I_k = I_{bPSU} + I''_{kT} + \dots \quad (58)$$

Les formules simples (57) et (58) donnent des valeurs par excès.

Les courants de court-circuit partiels se calculent comme suit:

- réseaux d'alimentation: comme il est indiqué au paragraphe 8.3.2.1,
- alternateurs *sans* transformateurs entre l'alternateur et le point de défaut: comme il est indiqué au paragraphe 12.2.1,
- groupes générateur-transformateur: comme il est indiqué au paragraphe 12.2.2, compte tenu des paragraphes 11.5.3.7 et 11.5.3.8,
- moteurs: comme il est indiqué au paragraphe 11.5.3.5 et dans l'article 13.

12.2.3.2 Initial symmetrical short-circuit current I_k''

The initial symmetrical short-circuit current at the short-circuit location F can be calculated from the sum of the partial short-circuit currents as shown in Figure 22. Motors are taken into account by the application of Clause 13.

$$\underline{I}_k'' = \underline{I}_{k\text{PSU}}'' + \underline{I}_{k\text{T}}'' + \underline{I}_{k\text{M}}'' + \dots \quad (55)$$

A simpler result, to be on the safe side, is gained by using the algebraic sum of values instead of the geometric sum.

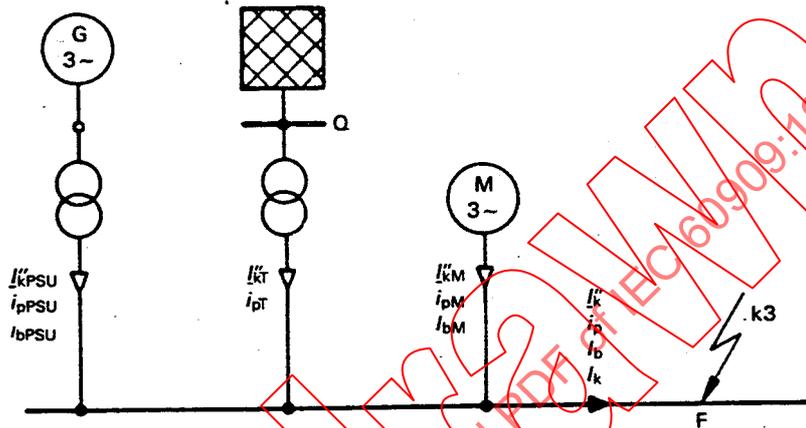


FIG. 22. – Explanation of the calculation of \underline{I}_k'' , i_p , I_b and I_k for a three-phase short circuit fed from non-meshed sources according to equations (55) to (58).

12.2.3.3 Peak short-circuit current i_p , symmetrical short-circuit breaking current I_b and steady-state short-circuit current I_k

If the three-phase short circuit is fed from several non-meshed sources according to Figure 22 the components of the peak short-circuit current i_p and the symmetrical short-circuit breaking current I_b at the short-circuit location F are added:

$$i_p = i_{p\text{PSU}} + i_{p\text{T}} + i_{p\text{M}} + \dots \quad (56)$$

$$I_b = I_{b\text{PSU}} + I_{k\text{T}}'' + I_{b\text{M}} + \dots \quad (57)$$

$$I_k = I_{b\text{PSU}} + I_{k\text{T}}'' + \dots \quad (58)$$

The simple formulae (57) and (58) give results which are on the safe side.

The partial short-circuit currents should be calculated as follows:

- network feeders according to Sub-clause 8.3.2.1,
- generators *without* transformers between the generator and the short-circuit location as in Sub-clause 12.2.1,
- power-station units as in Sub-clause 12.2.2, taking into account Sub-clauses 11.5.3.7 and 11.5.3.8,
- motors as in Sub-clause 11.5.3.5 and Clause 13.

Cela ne s'applique pas au courant de court-circuit permanent I_k . On admet alors que les alternateurs sont en rupture de synchronisme avec le réseau et produisent un courant de court-circuit permanent égal à $I_{kG} \approx I_{bG}$ ou $I_{kPSU} \approx I_{bPSU}$. Pour les lignes d'alimentation du réseau, on a $I_k = I_b = I_k''$. Il n'y a pas de contribution des moteurs au courant de court-circuit triphasé permanent (voir tableau II).

12.2.4 Court-circuit triphasé dans les réseaux maillés

12.2.4.1 Courant de court-circuit symétrique initial I_k''

Le courant de court-circuit symétrique initial se calcule par l'intermédiaire de la source de tension équivalente $cU_n/\sqrt{3}$ au point de défaut. Utiliser l'équation (45). Les impédances des matériels électriques se calculent comme il est indiqué au paragraphe 11.5.3; voir aussi le paragraphe 12.2.2. Pour le calcul du courant de court-circuit partiel, I_{kAT}'' dans la figure 21, page 88 (défaut en F3), il est admis de tirer l'impédance Z_{rs1} de l'équation (54) et de la transformer par t_{rAT}^2 .

Les impédances des réseaux reliés au réseau en défaut par l'intermédiaire de transformateurs doivent être transformées par le carré du rapport de transformation assigné. S'il y a entre deux réseaux plusieurs transformateurs de rapports de transformation assignés, $t_{r1}, t_{r2}, \dots, t_{rm}$, légèrement différents, on peut adopter comme valeur unique la moyenne arithmétique des rapports.

Les figures 13d, page 64, et 23 donnent des exemples de réseaux maillés à plusieurs alimentations.

12.2.4.2 Valeur de crête i_p du courant de court-circuit

Le calcul peut s'effectuer comme il est indiqué au paragraphe 9.1.3.2.

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 909:2000

This directive does not apply to the steady-state short-circuit current I_k . It is assumed that generators fall out of step and produce a steady-state short-circuit current $I_{kG} \approx I_{bG}$ or $I_{kPSU} \approx I_{bPSU}$. For network feeders $I_k = I_b = I_k''$ is valid. There is no motor supplement to the three-phase steady-state short-circuit current (see Table II).

12.2.4 Three-phase short circuit in meshed networks

12.2.4.1 Initial symmetrical short-circuit current I_k''

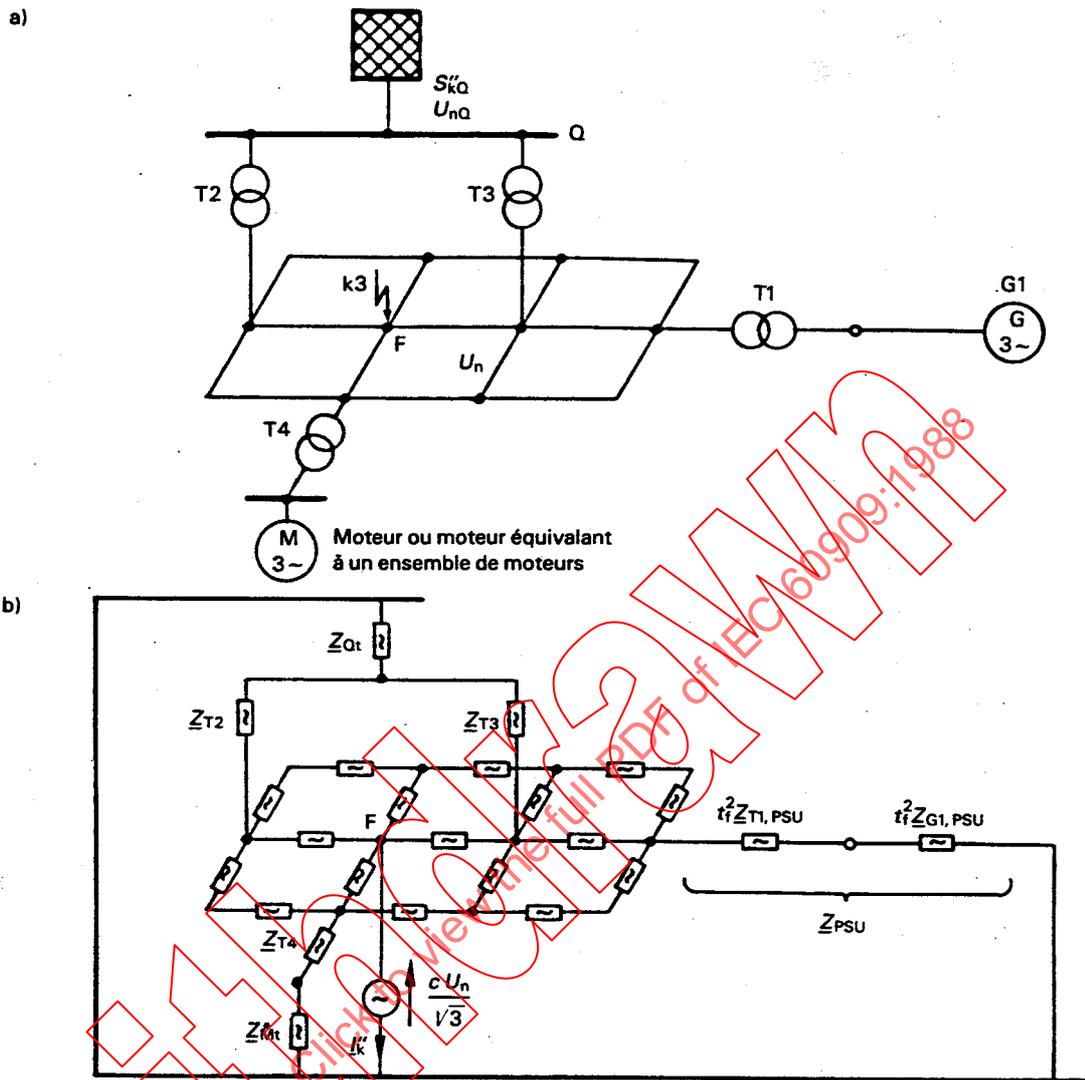
The initial symmetrical short-circuit current is calculated with the equivalent voltage source $cU_n/\sqrt{3}$ at the short-circuit location. Equation (45) is used. The impedances of electrical equipment are calculated according to Sub-clause 11.5.3 (see also Sub-clause 12.2.2). For the calculation of the partial short-circuit current I_{kAT}'' in Figure 21, page 89 (short-circuit location F3), it is permitted to take Z_{rs1} from Equation (54) and to transform this impedance by t_{TAT}^2 .

The impedances in systems connected beyond transformers to the system in which the short circuit occurs have to be transformed by the square of the rated transformation ratio. If there are several transformers with slightly differing rated transformation ratios $t_{r1}, t_{r2}, \dots, t_{rm}$, between two systems, the arithmetic mean value can be used.

Figures 13d, page 65, and 23 show examples for meshed networks with several sources.

12.2.4.2 Peak short-circuit current i_p

The calculation can be done as given in Sub-clause 9.1.3.2.



a) Schéma du réseau
 b) Schéma du circuit équivalent, comprenant la source de tension équivalente $cU_n/\sqrt{3}$ au point de défaut.

* Impédance du moteur ou du moteur équivalent à un ensemble de moteurs.

Fig. 23. — Exemple de calcul du courant de court-circuit symétrique initial I''_k dans un réseau maillé alimenté par plusieurs sources.

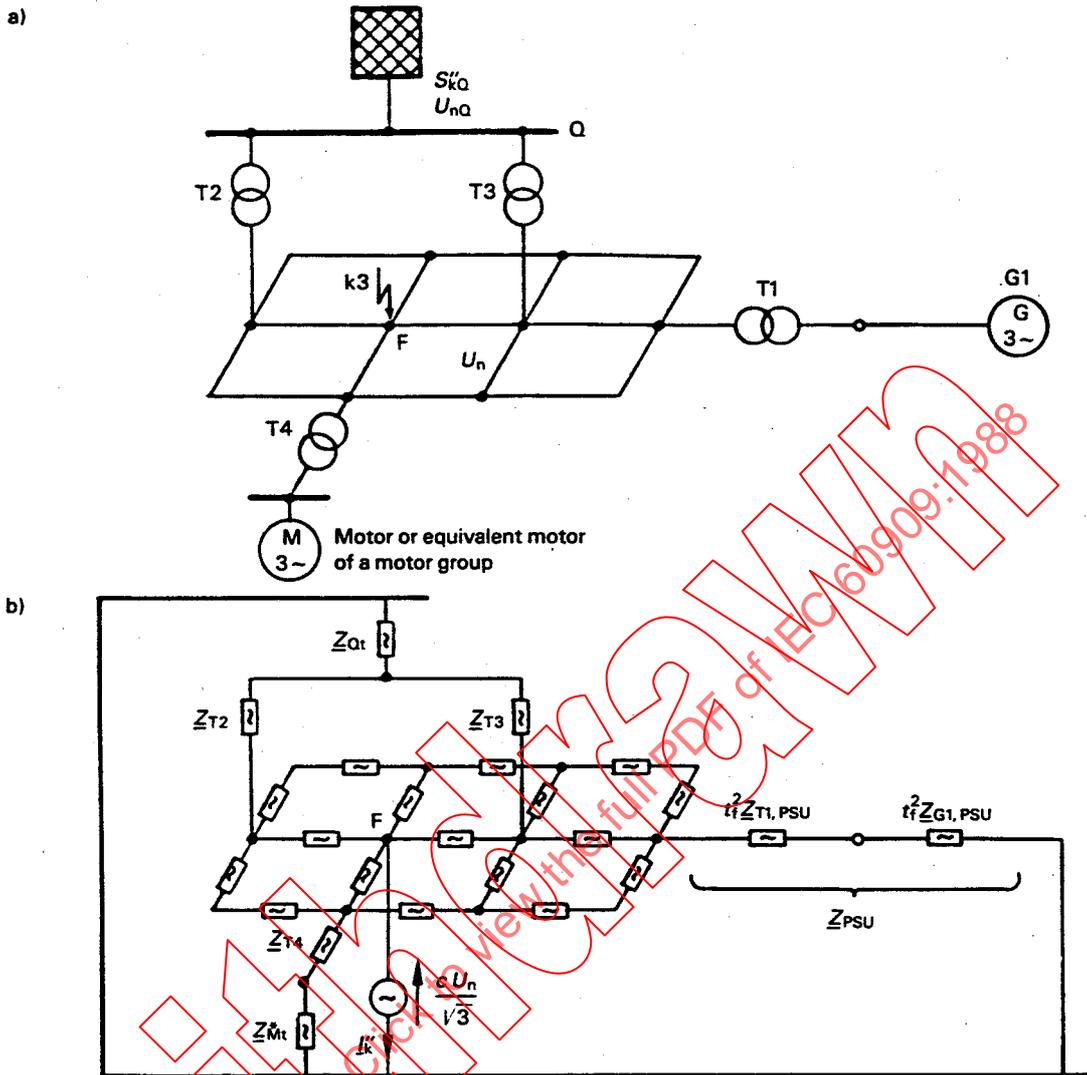
12.2.4.3 Courant de court-circuit symétrique coupé I_b

On peut considérer que, dans les réseaux maillés, on a:

$$I_b = I''_k \tag{59}$$

Les courants calculés selon l'équation (59) sont en fait supérieurs aux courants symétriques coupés réels.

Note. — On peut effectuer un calcul plus précis au moyen des équations suivantes:



- a) System diagram.
 - b) Equivalent circuit diagram for the calculation with the equivalent voltage source $cU_n/\sqrt{3}$ at the short-circuit location.
- * Impedance of a motor or an equivalent motor of a motor group.

FIG. 23. — Example of the calculation of the initial symmetrical short-circuit current I''_k in a meshed network fed from several sources.

12.2.4.3 Symmetrical short-circuit breaking current I_b

The following may be set for the short-circuit breaking current in meshed networks:

$$I_b = I''_k \tag{59}$$

Currents calculated with Equation (59) are larger than the real symmetrical short-circuit breaking currents.

Note. — A more accurate calculation can be done with the following equations:

$$\underline{I}_b = \underline{I}_k - \sum_i \frac{\frac{\Delta U''_{Gi}}{cU_n}}{\sqrt{3}} (1 - \mu_i) \underline{I}''_{kGi} - \sum_j \frac{\frac{\Delta U''_{Mj}}{cU_n}}{\sqrt{3}} (1 - \mu_j q_j) \underline{I}''_{kMj} \quad (60)$$

$$\underline{\Delta U}''_{Gi} = j X''_{di} \underline{I}''_{kGi} \quad (61)$$

$$\underline{\Delta U}''_{Mj} = j X_{Mj} \underline{I}''_{kMj} \quad (62)$$

où:

$\frac{cU_n}{\sqrt{3}}$ = sources de tension équivalente au point de défaut

$\underline{I}_k, \underline{I}_b$ = courants de court-circuit symétrique initial et coupé, tenant compte de l'influence de toutes les lignes d'alimentation du réseau, des machines synchrones et des moteurs asynchrones

$\underline{\Delta U}''_{Gi}, \underline{\Delta U}''_{Mj}$ = écarts de tension initiaux aux points de raccordement de la machine synchrone i ou du moteur asynchrone j

$\underline{I}''_{kGi}, \underline{I}''_{kMj}$ = contributions au courant de court-circuit symétrique initial de la machine synchrone i ou du moteur asynchrone j

μ = (voir le paragraphe 12.2.1.3 et la figure 16, page 78) avec I''_{kGi}/I_{rGi} ou I_{kMj}/I_{rMj} respectivement

q = (voir le paragraphe 13.2.1 et la figure 25, page 102)

Les valeurs des équations (61) et (62) se rapportent aux mêmes tensions.

12.2.4.4 Courant de court-circuit permanent I_k

Le courant de court-circuit permanent I_k peut se calculer par l'équation:

$$I_k = I''_{kM} \quad (63)$$

I''_{kM} est le courant de court-circuit symétrique initial, sans la contribution des moteurs.

12.3 Méthode de calcul des courts-circuits biphasés et phase-terre

Les indications du paragraphe 9.2 s'appliquent sans changement.

12.4 Courant de court-circuit minimal

12.4.1 Généralités

Les indications du paragraphe 9.3 s'appliquent sans changement. Se référer de plus aux paragraphes 12.4.2 à 12.4.4. Des précautions particulières sont indispensables pour les facteurs de correction d'impédance dans les équations (37), (40), (42) et (44), surtout dans le cas du fonctionnement et sous-excitation.

12.4.2 Courant de court-circuit symétrique initial I''_k

12.4.2.1 Court-circuit alimenté par un générateur

Lorsqu'un court-circuit est alimenté par un alternateur, comme il est indiqué dans la figure 15, page 76, appliquer le paragraphe 12.2.1 en introduisant le facteur de tension c_{min} , conformément au tableau I, correspondant au courant de court-circuit minimal.

Cette procédure s'applique également aux courts-circuits alimentés par plusieurs alternateurs identiques débitant en parallèle au même point.

12.4.2.2 Court-circuit dans un réseau maillé

Pour le calcul, utiliser le paragraphe 12.2.4 et le facteur c_{min} approprié pris dans le tableau I.

$$\underline{I}_b = \underline{I}_k - \sum_i \frac{\frac{\Delta U''_{Gi}}{cU_n}}{\sqrt{3}} (1 - \mu_i) \underline{I}''_{kGi} - \sum_j \frac{\frac{\Delta U''_{Mj}}{cU_n}}{\sqrt{3}} (1 - \mu_j q_j) \underline{I}''_{kMj} \quad (60)$$

$$\underline{\Delta U''_{Gi}} = j X''_{di} \underline{I}''_{kGi} \quad (61)$$

$$\underline{\Delta U''_{Mj}} = j X_{Mj} \underline{I}''_{kMj} \quad (62)$$

where:

$\frac{cU_n}{\sqrt{3}}$ = equivalent voltage source at the short-circuit location

$\underline{I}_k, \underline{I}_b$ = initial symmetrical short-circuit current, symmetrical short-circuit breaking current with influence of all network feeders, synchronous machines and asynchronous motors

$\underline{\Delta U''_{Gi}}, \underline{\Delta U''_{Mj}}$ = initial voltage difference at the connection points of the synchronous machine i and the asynchronous motor j

$\underline{I}''_{kGi}, \underline{I}''_{kMj}$ = parts of the initial symmetrical short-circuit current of the synchronous machine i and the asynchronous motor j

μ = (see Sub-clause 12.2.1.3 and Figure 16, page 79) with I''_{kGi}/I_{kGi} or I''_{kMj}/I_{kMj} respectively

q = (see Sub-clause 13.2.1 and Figure 25, page 103)

The values of Equations (61) and (62) are related to the same voltage.

12.2.4.4 Steady-state short-circuit current I_k

The steady-state short-circuit current I_k may be calculated by:

$$I_k = I''_{kM} \quad (63)$$

I''_{kM} is the initial symmetrical short-circuit current calculated without motors.

12.3 Calculation method for line-to-line and line-to-earth short circuits

The details given in Sub-clause 9.2 remain valid.

12.4 The minimum short-circuit currents

12.4.1 General

The details given in Sub-clause 9.3 remain valid. In addition, consider Sub-clauses 12.4.2 to 12.4.4. Careful reflection is necessary for the impedance correction factors in the equations (36), (40), (42) and (44), especially in the case of underexcited operation.

12.4.2 Initial symmetrical short-circuit current I''_k

12.4.2.1 Short-circuit fed from one generator

If a short circuit is fed from one generator as shown in Figure 15, page 77, apply Sub-clause 12.2.1 and introduce a voltage factor c_{\min} according to Table I for the calculation of the minimum short-circuit current.

This procedure is also applied for short circuits, which are fed by several similar generators, operated at one point in parallel.

12.4.2.2 Short circuit in meshed networks

For the calculation use Sub-clause 12.2.4 and a voltage factor c_{\min} according to Table I.

12.4.3 Courant permanent $I_{k\min}$ relatif à un court-circuit alimenté par des alternateurs à excitation compound

Le calcul du courant de court-circuit permanent minimal relatif à un court-circuit proche d'un ou de plusieurs alternateurs en service, en parallèle et identiques, à excitation compound s'effectue comme suit:

$$I_{k\min} = \frac{c_{\min}/U_n}{\sqrt{3} \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (64)$$

La réactance des alternateurs est donnée par:

$$X_{dP} = \frac{U_{rG}}{\sqrt{3} I_{kP}} \quad (65)$$

I_{kP} étant le courant de court-circuit permanent des alternateurs affectés d'un court-circuit triphasé aux bornes.

La valeur de I_{kP} doit, en principe, être obtenue auprès du constructeur.

12.4.4 Valeur initiale des courants de court-circuit dissymétriques

Les valeurs initiales des courants de court-circuit dissymétriques se calculent d'après les paragraphes 9.2 et 12.3. Le facteur de tension c_{\min} est pris dans le tableau I.

13. Contributions des moteurs

13.1 Moteurs et compensateurs synchrones

Qu'il s'agisse de calculer le courant de court-circuit symétrique initial I''_k , le courant de crête i_p , le courant symétrique coupé I_b ou le courant de court-circuit permanent I_k , les moteurs et compensateurs synchrones se traitent comme des générateurs synchrones.

Les exceptions sont: pas de changement de la tension interne; les moteurs peuvent être à excitation constante et non pourvus de régulateur. Les moteurs et compensateurs à excitation statique en bout d'arbre ne contribuent pas au courant I_k .

13.2 Moteurs asynchrones

13.2.1 Généralités

Les moteurs à haute tension et à basse tension contribuent au courant de court-circuit symétrique initial I''_k , au courant de crête i_p , au courant symétrique coupé I_b et, pour les courts-circuits dissymétriques, également au courant de court-circuit permanent I_k .

Les moteurs haute tension doivent toujours être pris en compte dans les calculs de court-circuit. Il en est de même des moteurs basse tension des auxiliaires de centrale, des moteurs basse tension des installations industrielles et analogues, tels que ceux des industries chimiques et sidérurgiques et des stations de pompage.

Les moteurs reliés aux réseaux basse tension de distribution publique peuvent être négligés.

Dans le calcul des courants de court-circuit, on pourra négliger ceux des moteurs, à haute ou basse tension, qui du fait du schéma du circuit (verrouillage) ou du processus de fonctionnement (réversibilité), ne sont pas en service en même temps.

12.4.3 Steady-state short-circuit current $I_{k \min}$ fed from generators with compound excitation

The calculation for the minimum steady-state short-circuit current in a near-to-generator short circuit, fed by one or several similar and parallel working generators with compound excitation, is done as follows:

$$I_{k \min} = \frac{c_{\min} / U_n}{\sqrt{3} \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (64)$$

For the effective reactance of the generators introduce:

$$X_{dP} = \frac{U_{rG}}{\sqrt{3} I_{kP}} \quad (65)$$

I_{kP} is the steady-state short-circuit current of a generator with a three-phase terminal short circuit.

This value I_{kP} should be obtained from the manufacturer.

12.4.4 Initial short-circuit currents at unbalanced short circuits

The initial short-circuit currents at unbalanced short circuits are calculated according to Sub-clauses 9.2 and 12.3. Use the voltage factor c_{\min} according to Table I.

13. Influence of motors

13.1 Synchronous motors and synchronous compensators

When calculating the initial symmetrical short-circuit current I_k'' , the peak short-circuit current i_p , the symmetrical short-circuit breaking current I_b and the steady-state short-circuit current I_k , the synchronous motors and synchronous compensators are treated in the same way as synchronous generators.

Exceptions are: no modification for internal voltage; motors may have constant field voltage and no regulators. Motors and compensators with terminal-fed static exciters do not contribute to I_k .

13.2 Asynchronous motors

13.2.1 General

High-voltage motors and low-voltage motors contribute to the initial symmetrical short-circuit current I_k'' , to the peak short-circuit i_p , to the symmetrical short-circuit breaking current I_b , and for unbalanced short circuits also to the steady-state short-circuit current I_k .

High-voltage motors have to be considered in the calculation of short circuit. Low-voltage motors are to be taken into account in auxiliaries of power-stations and in industrial and similar installations, for example in networks of chemical and steel industries and pump-stations.

Motors in low-voltage public power supply systems may be neglected.

In the calculation of short-circuit currents those high-voltage and low-voltage motors may be neglected, which, according to the circuit diagram (interlocking) or to the process (reversible drives), are not switched in at the same time.

La contribution des moteurs haute et basse tensions, reliés au réseau où le court-circuit a lieu par l'intermédiaire de transformateurs à deux enroulements, peut être négligée en cas de défaut au point Q (voir figure 24), si:

$$\frac{\Sigma P_{rM}}{\Sigma S_{rT}} \leq \frac{0,8}{\left| \frac{c \ 100 \ \Sigma S_{rT}}{S''_{kQ}} - 0,3 \right|} \quad (66)$$

où:

ΣP_{rM} = somme des puissances actives assignées des moteurs haute et basse tensions à prendre en compte

ΣS_{rT} = somme des puissances apparentes assignées de tous les transformateurs alimentant directement les moteurs

S''_{kQ} = puissance de court-circuit symétrique initiale au point d'alimentation Q, hors contribution des moteurs

L'estimation conformément à l'équation (66) n'est pas permise lorsque les transformateurs sont à trois enroulements.

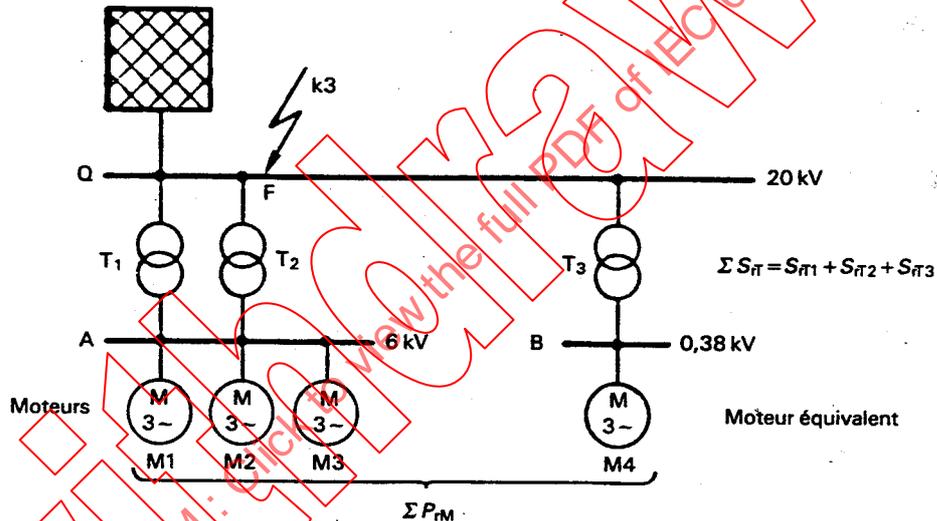


Fig. 24. - Exemple illustrant l'estimation de la contribution de moteurs asynchrones, rapportée au courant de court-circuit total.

High-voltage and low-voltage motors which are connected through two-winding transformers to the network in which the short circuit occurs, may be neglected in the calculation of currents for a short circuit at the feeder connection point Q (see Figure 24), if:

$$\frac{\Sigma P_{rM}}{\Sigma S_{rT}} \leq \frac{0.8}{\left| \frac{c 100 \Sigma S_{rT}}{S''_{kQ}} - 0.3 \right|} \tag{66}$$

where:

ΣP_{rM} = sum of the rated active powers of the high-voltage and the low-voltage motors which should be considered

ΣS_{rT} = sum of the rated apparent powers of all transformers, through which the motors are directly fed

S''_{kQ} = initial symmetrical short-circuit power at the feeder connection point Q without supplement of the motors

The estimation according to Equation (66) is not allowed in the case of three-winding transformers.

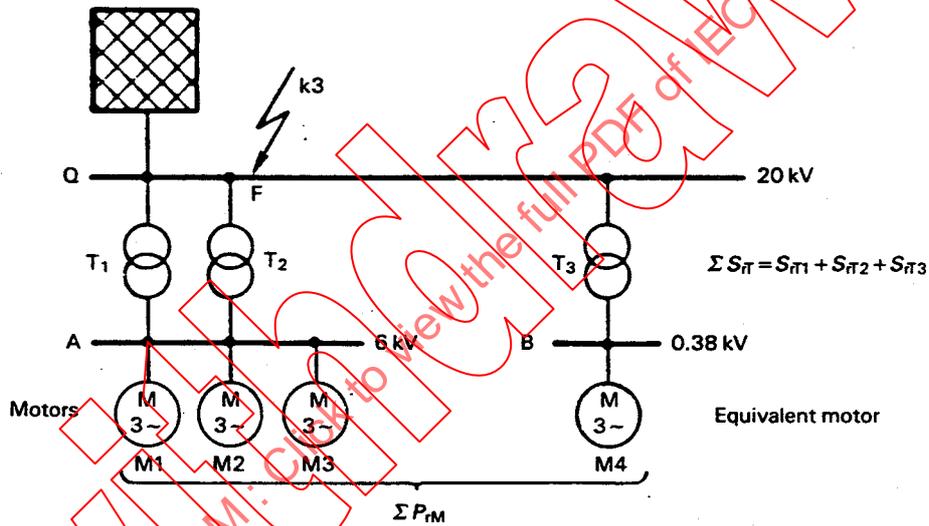


FIG. 24. – Example for the estimation of the contribution from the asynchronous motors in relation to the total short-circuit current.

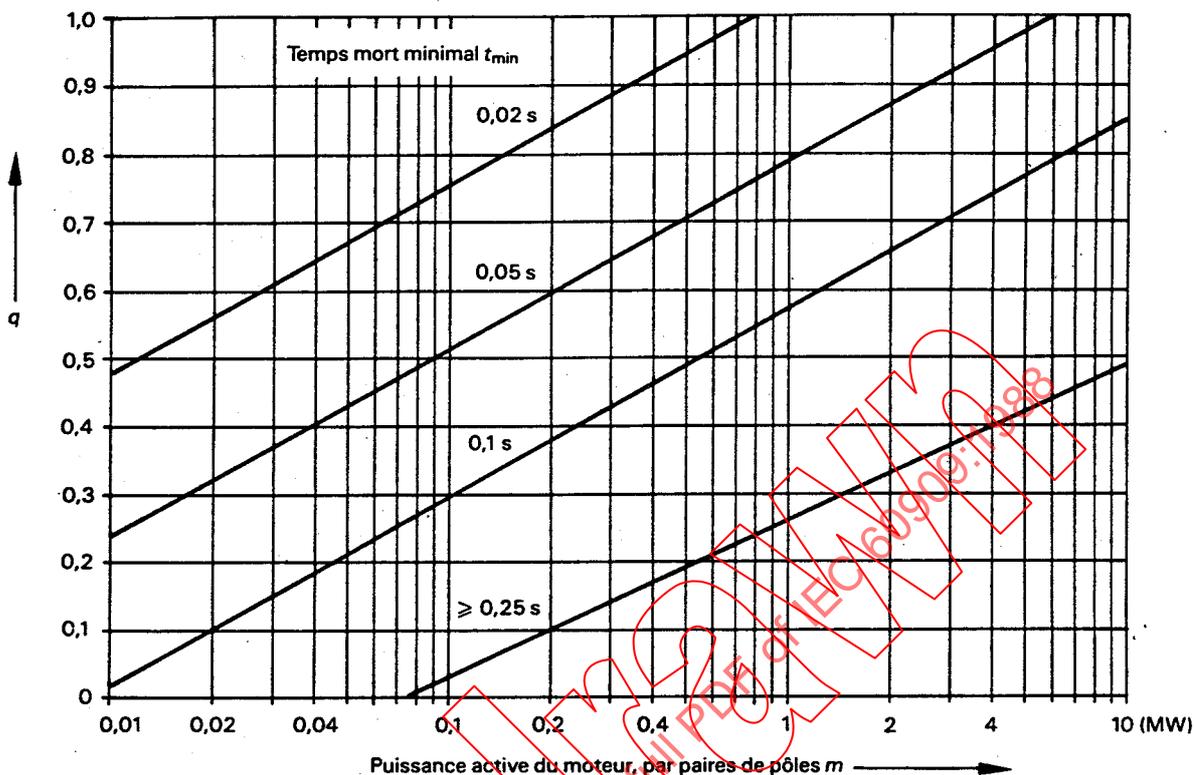


FIG. 25. - Facteur q servant au calcul du courant de court-circuit symétrique coupé de moteurs asynchrones.

Le facteur q servant au calcul du courant de court-circuit symétrique coupé de moteurs asynchrones peut être déterminé en fonction du temps mort minimal t_{min} :

$$\left. \begin{aligned} q &= 1,03 + 0,12 \ln m \text{ pour } t_{min} = 0,02 \text{ s} \\ q &= 0,79 + 0,12 \ln m \text{ pour } t_{min} = 0,05 \text{ s} \\ q &= 0,57 + 0,12 \ln m \text{ pour } t_{min} = 0,10 \text{ s} \\ q &= 0,26 + 0,10 \ln m \text{ pour } t_{min} \geq 0,25 \text{ s} \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{avec } m: \\ \text{puissance active assignée des moteurs} \\ \text{par paire de pôles (MW)} \end{array} \quad (67)$$

Si le calcul selon l'équation (67) donne des valeurs de q supérieures à 1, on prendra $q = 1$. Le facteur q est également donné par la figure 25.

Les moteurs basse tension sont généralement reliés au jeu de barres par des câbles de différentes sections et longueurs. Afin de simplifier les calculs, les groupes de moteurs, y compris leurs câbles de liaison, seront combinés en un moteur équivalent unique, voir moteur M4 de la figure 24.

Pour ces moteurs asynchrones équivalents, y compris leurs câbles de liaison, on pourra prendre:

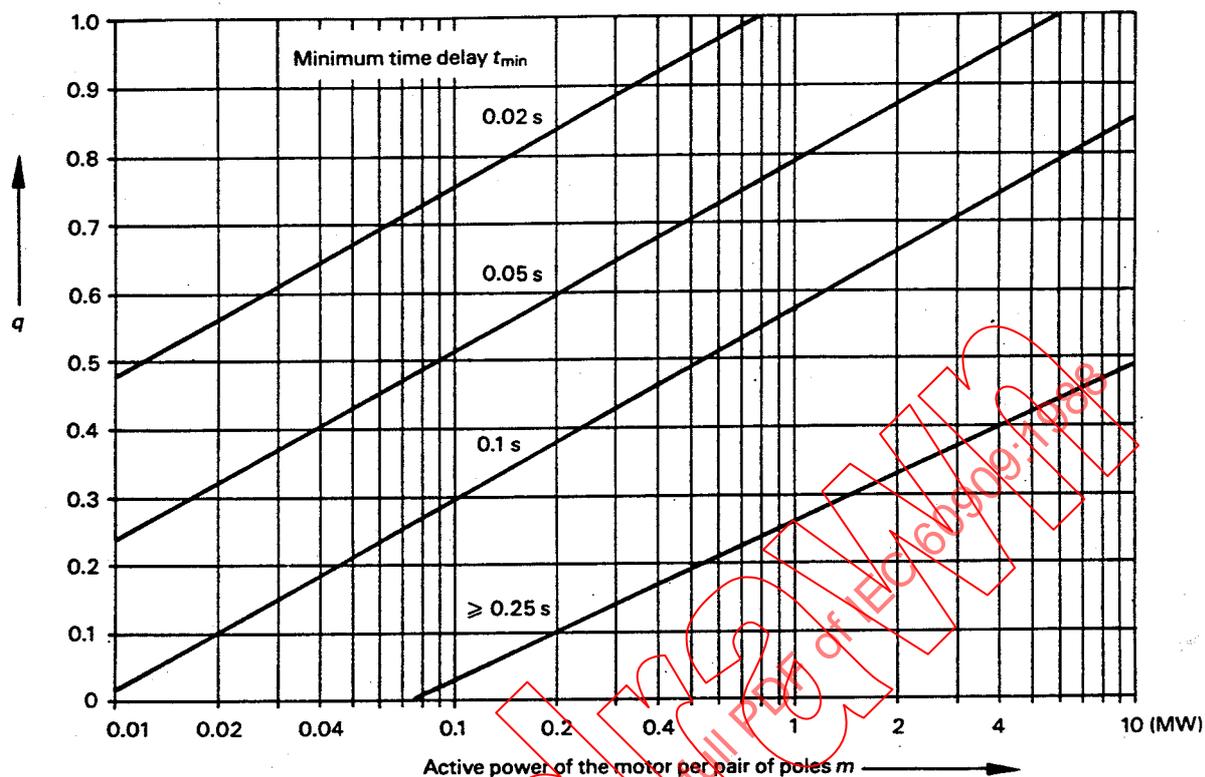


FIG. 25. – Factor q for the calculation of the symmetrical short-circuit breaking current of asynchronous motors.

The factor q for the calculation of the symmetrical short-circuit breaking current for asynchronous motors may be determined as a function of the minimum time delay t_{min} :

$$\left. \begin{aligned}
 q &= 1.03 + 0.12 \ln m \text{ for } t_{min} = 0.02 \text{ s} \\
 q &= 0.79 + 0.12 \ln m \text{ for } t_{min} = 0.05 \text{ s} \\
 q &= 0.57 + 0.12 \ln m \text{ for } t_{min} = 0.10 \text{ s} \\
 q &= 0.26 + 0.10 \ln m \text{ for } t_{min} \geq 0.25 \text{ s}
 \end{aligned} \right\} \begin{array}{l}
 \text{with } m: \\
 \text{the rated active power of motors (MW)} \\
 \text{per pair of poles}
 \end{array} \quad (67)$$

If the calculation in Equation (67) provides larger values than 1 for q , assume that $q = 1$. The factor q may also be obtained from Figure 25.

Low-voltage motors are usually connected to the busbar by cables with different lengths and cross-sections. For simplification of the calculation, groups of motors including their connection cables may be combined to an equivalent motor, see motor M4 in Figure 24.

For these equivalent asynchronous motors including their connection cables the following may be used:

- Z_M = (conformément à l'équation (34))
 I_{TM} = somme des courants assignés de tous les moteurs d'un groupe (moteur équivalent)
 I_{LR}/I_{TM} = 5
 R_M/X_M = 0,42, correspondant à $\kappa_M = 1,3$
 m = 0,05 MW à défaut d'une valeur connue

Pour un court-circuit sur les barres B, conformément à la figure 24, page 100, la contribution du groupe de moteurs basse tension M4 peut être négligée, si la condition suivante est satisfaite:

$$I_{TM4} < 0,01 I''_{kM4} \quad (68)$$

I_{TM4} étant le courant assigné du moteur équivalent M4 et I''_{kM4} étant le courant de court-circuit symétrique initial au point B sans la contribution du moteur équivalent M4.

Dans le cas d'un court-circuit côté haute tension (par exemple court-circuit en Q ou A de la figure 24), on peut, par mesure de simplification, calculer Z_M par l'équation (34) en prenant le courant assigné du transformateur T3 dans la figure 24 ($I_{T3, LV}$) au lieu du courant assigné I_{TM4} du moteur équivalent M4.

13.2.2 Court-circuit aux bornes de moteurs asynchrones

Dans les cas de courts-circuits symétriques et biphasés se produisant aux bornes de moteurs asynchrones, les courants I''_k , i_p , I_b et I_k se calculent comme il est indiqué au tableau II. Dans les réseaux directement reliés à la terre, l'influence des moteurs sur le courant de court-circuit phase-terre ne peut être négligée.

13.2.3 Court-circuit derrière une impédance

Dans le calcul des courants de court-circuit initiaux selon les paragraphes 12.2.3 et 12.2.4, les moteurs asynchrones sont remplacés par leurs impédances Z_M calculées par l'équation (34) dans les systèmes direct et inverse.

- Z_M = (according to Equation (34))
 I_{rM} = sum of the rated currents of all motors in a group of motors (equivalent motor)
 I_{LR}/I_{rM} = 5
 R_M/X_M = 0.42, respectively $\kappa_M = 1.3$
 m = 0.05 MW if nothing definite is known

For a short circuit at the busbar B in Figure 24, page 101, the partial short-circuit current of the low-voltage motor group M4 may be neglected, if the following condition holds:

$$I_{rM4} < 0.01 I''_{kM4} \quad (68)$$

I_{rM4} is the rated current of the equivalent motor M4. I''_{kM4} is the initial symmetrical short-circuit current at the short-circuit location B without supplement of the equivalent motor M4.

In the case of a short circuit on the high-voltage side (e. g. short-circuit locations Q or A in Figure 24) it is possible to simplify the calculation of Z_M according to Equation (34) with the rated current of the transformer T3 ($I_{rT3, LV}$) in Figure 24 instead of the rated current I_{rM4} of the equivalent motor M4.

13.2.2 Terminal short circuit of asynchronous motors

In the case of balanced and line-to-line short circuits at the terminals of asynchronous motors the currents I''_k , i_p , I_b and I_k are evaluated as shown in Table II. For solid grounded systems the influence of motors on the line-to-earth short-circuit current cannot be neglected.

13.2.3 Short circuit beyond an impedance

For the calculation of the initial short-circuit currents according to Sub-clauses 12.2.3 and 12.2.4, asynchronous motors are substituted by their impedances Z_M according to Equation (34) in the positive-sequence and negative-sequence system.

TABLEAU II

Calcul des courants relatifs à des courts-circuits aux bornes de moteurs asynchrones

| Court-circuit | Court-circuit symétrique | Court-circuit entre phases |
|---|--|---|
| Courant de court-circuit symétrique initial | $I''_{k3M} = \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_M}$ (69) | $I''_{k2M} = \frac{\sqrt{3}}{2} I''_{k3M}$ (73) |
| Crête du courant de court-circuit | $i_{p3M} = \kappa_M \sqrt{2} I''_{k3M}$ (70) | $i_{p2M} = \frac{\sqrt{3}}{2} i_{p3M}$ (74) |
| | Moteurs haute tension: $\kappa_M = 1,65$ (correspondant à $R_M/X_M = 0,15$) pour des puissances par paire de pôles < 1 MW $\kappa_M = 1,75$ (correspondant à $R_M/X_M = 0,10$) pour des puissances par paire de pôles ≥ 1 MW Groupes de moteurs basse tension reliés par câbles $\kappa_M = 1,3$ (correspondant à $R_M/X_M = 0,42$) | |
| Courant de court-circuit symétrique coupé | $I_{b3M} = \mu q I''_{k3M}$ (71) | $I_{b2M} \approx \frac{\sqrt{3}}{2} I''_{k3M}$ (75) |
| | μ d'après l'équation (47) ou la figure 16, page 78, avec I''_{kM}/I_{TM} q d'après l'équation (67) ou la figure 25, page 102 | |
| Courant de court-circuit permanent | $I_{k3M} = 0$ (72) | $I_{k2M} \approx \frac{1}{2} I''_{k3M}$ (76) |

13.3 Moteurs à convertisseur statique

Les moteurs à convertisseur statique (tels que les moteurs de laminoir par exemple) ne sont pris en compte que pour les courts-circuits triphasés et si les masses tournantes des moteurs et l'équipement statique contribuent au freinage par récupération d'énergie (fonctionnement transitoire inversé) au moment du court-circuit. Ils ne contribuent qu'au courant de court-circuit symétrique initial I''_k et au courant de crête i_p . Ils ne contribuent pas au courant symétrique coupé I_b .

Pour déterminer l'impédance du moteur équivalent, appliquer le paragraphe 11.5.3.5.

14. Considération des charges non tournantes et des capacités

Les méthodes de calcul développées aux paragraphes 12.2 et 12.3 autorisent à négliger, comme il est indiqué dans l'article 6, les capacités des lignes et les admittances en parallèle des charges non tournantes.

14.1 Capacités en parallèle

Dans le calcul des valeurs de crête des courants de court-circuit, on peut négliger le courant de décharge des capacités, quel que soit l'instant d'apparition des courts-circuits.

14.2 Capacités en série

De même, on peut négliger l'effet des capacités en série, dès lors qu'elles sont pourvues en parallèle de dispositifs limiteurs de tension qui fonctionnent en cas de court-circuit.

TABLE II

Calculation of short-circuit currents of asynchronous motors
in the case of a short circuit at the terminals

| Short circuit | Balanced short circuit | Line-to-line short circuit |
|--|--|---|
| Initial symmetrical short-circuit current | $I''_{k3M} = \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_M}$ (69) | $I''_{k2M} = \frac{\sqrt{3}}{2} I''_{k3M}$ (73) |
| Peak short-circuit current | $i_{p3M} = \kappa_M \sqrt{2} I''_{k3M}$ (70) High-voltage motors: $\kappa_M = 1.65$ (corresponding to $R_M/X_M = 0.15$) for motor powers per pair of poles < 1 MW $\kappa_M = 1.75$ (corresponding to $R_M/X_M = 0.10$) for motor powers per pair of poles ≥ 1 MW Low-voltage motor groups with connection cables $\kappa_M = 1.3$ (corresponding to $R_M/X_M = 0.42$) | $i_{p2M} = \frac{\sqrt{3}}{2} i_{p3M}$ (74) |
| Symmetrical short-circuit breaking current | $I_{b3M} = \mu q I''_{k3M}$ (71) μ according to equation (47) or Figure 16, page 79, with I''_{kM}/I_{M} q according to equation (67) or Figure 25, page 103 | $I_{b2M} \approx \frac{\sqrt{3}}{2} I''_{k3M}$ (75) |
| Steady-state short-circuit current | $I_{k3M} = 0$ (72) | $I_{k2M} \approx \frac{1}{2} I''_{k3M}$ (76) |

13.3 Static converter fed drives

Static converter fed drives (e. g. as in rolling mill drives) are considered for three-phase short circuits only, if the rotational masses of the motors and the static equipment provide reverse transfer of energy for deceleration (a transient inverter operation) at the time of short circuit. Then they contribute only to the initial symmetrical short-circuit current I''_k and to the peak short-circuit current i_p . They do not contribute to the symmetrical short-circuit breaking current I_b .

Apply Sub-clause 11.5.3.5 for the equivalent motor of the static converter fed drive.

14. Consideration of non-rotating loads and capacitors

Calculation methods are given in Sub-clauses 12.2 and 12.3 which allow, as stated in Clause 6, line capacitances and parallel admittances of non-rotating loads to be neglected.

14.1 Parallel capacitors

Regardless of the time of short-circuit occurrence, the discharge current of the capacitors may be neglected for the calculation of the peak short-circuit currents.

14.2 Series capacitors

The effect of capacitors in series can be neglected in the calculation of short-circuit currents, if they are equipped with voltage-limiting devices in parallel, acting if a short circuit occurs.

ANNEXE A

CALCUL DES COURANTS DE COURT-CIRCUIT

A1. Exemple 1: Calcul des courants de court-circuit dans un réseau basse tension

A.1.1 Problème

Soit un réseau basse tension de fréquence 50 Hz, de tension nominale $U_n = 380\text{ V}$, tel qu'il est représenté à la figure A1. On doit déterminer les courants de court-circuit I_k' et i_p pour les points de défaut F1 à F3, conformément à la section un (réseaux dans lesquels les courants de court-circuit n'ont pas de composante alternative décroissante). Les données relatives aux matériels, dans les systèmes direct, inverse et homopolaire figurent au tableau A1.

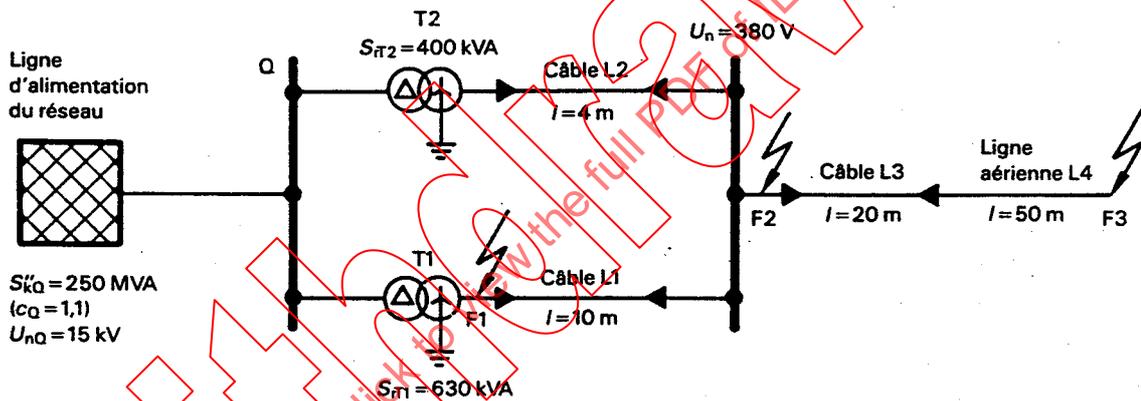


FIG. A1. - Réseau basse tension affecté d'un défaut en F1, F2 et F3. Exemple 1.

A1.2 Détermination des impédances dans le système direct

A1.2.1 Réseau d'alimentation

D'après l'équation (5b) et avec $c_Q = 1,1$ (voir tableau I), on a:

$$Z_{Qt} = \frac{c_Q U_{nQ}^2}{S'_{kQ}} \cdot \frac{1}{r_r^2} = \frac{1,1 \cdot (15\text{ kV})^2}{250\text{ MVA}} \cdot \frac{1}{(15\text{ kV}/0,4\text{ kV})^2} = 0,704\text{ m}\Omega$$

$$\left. \begin{aligned} X_{Qt} &= 0,995 Z_{Qt} = 0,700\text{ m}\Omega \\ R_{Qt} &= 0,1 X_{Qt} = 0,070\text{ m}\Omega \end{aligned} \right\} Z_{Qt} = (0,070 + j 0,700)\text{ m}\Omega$$

APPENDIX A

CALCULATION OF SHORT-CIRCUIT CURRENTS

A1. Example 1: Calculation of short-circuit currents in a low-voltage system

A.1.1 Problem

A low-voltage system with $U_n = 380$ V and $f = 50$ Hz is given in Figure A1. The short-circuit currents I''_k and i_p shall be determined at the short-circuit locations F1 to F3 according to Section One (Systems with short-circuit currents having no a.c. component decay). The equipment data for the positive-sequence, negative-sequence and zero-sequence systems are given in Table A1.

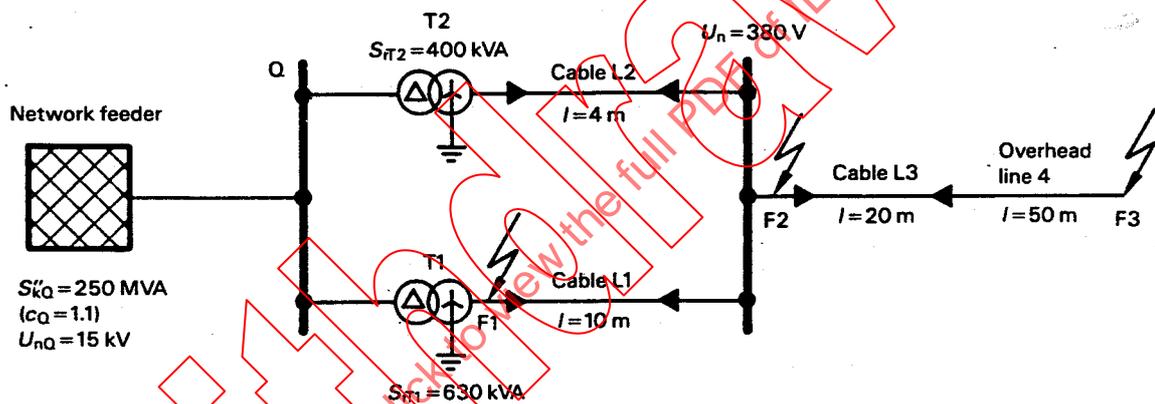


FIG. A1. — Low-voltage system with short-circuit locations F1, F2 and F3.
Example 1.

A1.2 Determination of the positive-sequence impedances

A1.2.1 Network feeder

According to Equation (5b) with $c_Q = 1.1$ (see Table I) it follows that:

$$Z_{Qt} = \frac{c_Q U_{nQ}^2}{S''_{kQ}} \cdot \frac{1}{I_r^2} = \frac{1.1 \cdot (15 \text{ kV})^2}{250 \text{ MVA}} \cdot \frac{1}{(15 \text{ kV} / 0.4 \text{ kV})^2} = 0.704 \text{ m}\Omega$$

$$\left. \begin{array}{l} X_{Qt} = 0.995 Z_{Qt} = 0.700 \text{ m}\Omega \\ R_{Qt} = 0.1 X_{Qt} = 0.070 \text{ m}\Omega \end{array} \right\} Z_{Qt} = (0.070 + j 0.700) \text{ m}\Omega$$

A1.2.2 Transformateurs

On obtient, d'après les équations (6), (7) et (8):

Transformateur T1:

$$Z_{T1} = \frac{u_{krT1}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT1}^2}{S_{rT1}} = \frac{4\%}{100\%} \cdot \frac{(400 \text{ V})^2}{630 \text{ kVA}} = 10,16 \text{ m}\Omega$$

$$R_{T1} = \frac{P_{krT1}}{3 I_{rT1}^2} = \frac{P_{krT1} U_{rT1}^2}{S_{rT1}^2} = \frac{6,5 \text{ kW} \cdot (400 \text{ V})^2}{(630 \text{ kVA})^2} = 2,62 \text{ m}\Omega$$

$$X_{T1} = \sqrt{Z_{T1}^2 - R_{T1}^2} = 9,82 \text{ m}\Omega$$

$$\underline{Z}_{T1} = (2,62 + j 9,82) \text{ m}\Omega$$

Transformateur T2:

Le calcul s'effectue comme pour le transformateur T1, soit:

$$S_{rT2} = 400 \text{ kVA}, U_{rT2} = 400 \text{ V}, u_{krT2} = 4\% \text{ et } P_{krT2} = 4,6 \text{ kW}:$$

$$\underline{Z}_{T2} = (4,60 + j 15,32) \text{ m}\Omega$$

A1.2.3 Lignes (câbles et lignes aériennes)

Impédance de ligne: $\underline{Z}_L = \underline{Z}'_L l$

Ligne L1 (deux câbles en parallèle):

$$\underline{Z}'_{L1} = \frac{1}{2} (0,077 + j 0,079) \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot 10 \text{ m} = (0,385 + j 0,395) \text{ m}\Omega$$

Ligne L2 (deux câbles en parallèle):

$$\underline{Z}'_{L2} = \frac{1}{2} (0,208 + j 0,068) \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot 4 \text{ m} = (0,416 + j 0,136) \text{ m}\Omega$$

Ligne L3 (câble):

$$\underline{Z}'_{L3} = (0,271 + j 0,087) \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot 20 \text{ m} = (5,420 + j 1,740) \text{ m}\Omega$$

Ligne L4 (ligne aérienne):

$$R'_{L4} = \frac{\rho}{q_n} = \frac{\Omega \text{ mm}^2}{54 \text{ m} \cdot 50 \text{ mm}^2} = 0,3704 \frac{\Omega}{\text{km}} ; r = 1,14 \sqrt{q_n/\pi} = 4,55 \text{ mm}$$

$$X'_{L4} = 2\pi f \frac{\mu_0}{2\pi} \left(0,25 + \ln \frac{d}{r} \right) = 2\pi 50 \text{ s}^{-1} \frac{4\pi \cdot 10^{-4} \text{ Vs}}{2\pi \text{ Akm}} \left(0,25 + \ln \frac{0,4 \text{ m}}{0,455 \cdot 10^{-2} \text{ m}} \right) = 0,297 \frac{\Omega}{\text{km}}$$

$$\underline{Z}'_{L4} = (R'_{L4} + j X'_{L4}) l = (0,3704 + j 0,297) \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot 50 \text{ m} = (18,52 + j 14,85) \text{ m}\Omega$$

A1.2.2 Transformers

According to equation (6), (7) and (8) it follows that:

Transformer T1:

$$Z_{T1} = \frac{u_{krT1}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT1}^2}{S_{rT1}} = \frac{4\%}{100\%} \cdot \frac{(400 \text{ V})^2}{630 \text{ kVA}} = 10.16 \text{ m}\Omega$$

$$R_{T1} = \frac{P_{krT1}}{3 I_{rT1}^2} = \frac{P_{krT1} U_{rT1}^2}{S_{rT1}^2} = \frac{6.5 \text{ kW} \cdot (400 \text{ V})^2}{(630 \text{ kVA})^2} = 2.62 \text{ m}\Omega$$

$$X_{T1} = \sqrt{Z_{T1}^2 - R_{T1}^2} = 9.82 \text{ m}\Omega$$

$$\underline{Z}_{T1} = (2.62 + j 9.82) \text{ m}\Omega$$

Transformer T2:

According to the calculation for transformer T1 it follows that:

$$S_{rT2} = 400 \text{ kVA}, U_{rT2} = 400 \text{ V}, u_{krT2} = 4\% \text{ and } P_{krT2} = 4.6 \text{ kW:}$$

$$\underline{Z}_{T2} = (4.60 + j 15.32) \text{ m}\Omega$$

A1.2.3 Lines (cables and overhead lines)

Line impedances: $\underline{Z}_L = \underline{Z}'_L l$

Line L1 (two parallel cables):

$$\underline{Z}_{L1} = \frac{1}{2} (0.077 + j 0.079) \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot 10 \text{ m} = (0.385 + j 0.395) \text{ m}\Omega$$

Line L2 (two parallel cables):

$$\underline{Z}_{L2} = \frac{1}{2} (0.208 + j 0.068) \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot 4 \text{ m} = (0.416 + j 0.136) \text{ m}\Omega$$

Line L3 (cable):

$$\underline{Z}_{L3} = (0.271 + j 0.087) \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot 20 \text{ m} = (5.420 + j 1.740) \text{ m}\Omega$$

Line L4 (overhead line):

$$R'_{L4} = \frac{\rho}{q_n} = \frac{\Omega \text{ mm}^2}{54 \text{ m} \cdot 50 \text{ mm}^2} = 0.3704 \frac{\Omega}{\text{km}}; r = 1.14 \sqrt{q_n/\pi} = 4.55 \text{ mm}$$

$$X'_{L4} = 2\pi f \frac{\mu_0}{2\pi} \left(0.25 + \ln \frac{d}{r} \right) = 2\pi \cdot 50 \text{ s}^{-1} \frac{4\pi \cdot 10^{-4} \text{ Vs}}{2\pi \text{ Akm}} \left(0.25 + \ln \frac{0.4 \text{ m}}{0.455 \cdot 10^{-2} \text{ m}} \right) = 0.297 \frac{\Omega}{\text{km}}$$

$$\underline{Z}_{L4} = (R'_{L4} + j X'_{L4}) l = (0.3704 + j 0.297) \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot 50 \text{ m} = (18.52 + j 14.85) \text{ m}\Omega$$

TABLEAU AI

Données relatives aux matériels pour l'exemple 1 et impédances de court-circuit dans les systèmes direct, inverse et homopolaire

| Matériels | Données relatives aux matériels | Données et équations pour le calcul de $\underline{Z}_{(1)}$ et $\underline{Z}_{(0)}$ | $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$ (mΩ) | $\underline{Z}_{(0)}$ (mΩ) |
|----------------------------------|---|--|---|---|
| Ligne d'alimentation du réseau Q | $U_{nQ} = 15 \text{ kV}; c_Q = 1,1; S_{kQ}^* = 250 \text{ MVA}$ $R_Q = 0,1 \cdot X_Q$ avec $X_Q = 0,995 Z_Q$ | (5b) | $\underline{Z}_{Q1} = 0,070 + j 0,700$ | |
| Transformateurs T1 | $S_{rT} = 630 \text{ kVA}; U_{rTHV} = 15 \text{ kV}; U_{rTLV} = 0,4 \text{ kV}$ $u_{kr} = 4\%; P_{krT} = 6,5 \text{ kW}; \text{Dy } 5$ | (6) à (8) | $\underline{Z}_{T1} = 2,62 + j 9,82$ | $\underline{Z}_{(0)T1} = 2,62 + j 9,33$ |
| T2 | $S_{rT} = 400 \text{ kVA}; U_{rTHV} = 15 \text{ kV}; U_{rTLV} = 0,4 \text{ kV}$ $u_{kr} = 4\%; P_{krT} = 4,6 \text{ kW}; \text{Dy } 5$ | (6) à (8) | $\underline{Z}_{T2} = 4,60 + j 15,32$ | $\underline{Z}_{(0)T2} = 4,60 + j 14,55$ |
| Lignes L1 | Deux câbles à quatre conducteurs, en parallèle $l = 10 \text{ m}; 4 \times 240 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$ $\underline{Z}'_L = (0,077 + j 0,079) \frac{\Omega}{\text{km}}$ | Données et rapports $\frac{R_{(0)l}}{R_L}; \frac{X_{(0)l}}{X_L}$ fournis par le constructeur | $\underline{Z}_{L1} = 0,385 + j 0,395$ | $\underline{Z}_{(0)L1} = 1,425 + j 0,715$ |
| L2 | Deux câbles à trois conducteurs, en parallèle $l = 4 \text{ m}; 3 \times 150 \text{ mm}^2 \text{ Al}$ $\underline{Z}'_L = (0,208 + j 0,068) \frac{\Omega}{\text{km}}$ | | $\underline{Z}_{L2} = 0,416 + j 0,136$ | $\underline{Z}_{(0)L2} = 1,760 + j 0,165$ |
| L3 | Câble à quatre conducteurs $l = 20 \text{ m}; 4 \times 70 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$ $\underline{Z}'_L = (0,271 + j 0,087) \frac{\Omega}{\text{km}}$ | | $\underline{Z}_{L3} = 5,420 + j 1,740$ | $\underline{Z}_{(0)L3} = 16,26 + j 7,76$ |
| L4 | Ligne aérienne $l = 50 \text{ m}; q_n = 50 \text{ mm}^2 \text{ Cu}; d = 0,4 \text{ m}$ $\underline{Z}'_L = (0,3704 + j 0,297) \frac{\Omega}{\text{km}}$ | | (11), (12a) | $\underline{Z}_{L4} = 18,52 + j 14,85$ |

A1.3 Détermination des impédances homopolaires

A1.3.1 Transformateurs

Pour les transformateurs T1 et T2 de couplage Dy5, les relations suivantes ont pu être fournies par le constructeur:

$$R_{(0)T} = R_T; X_{(0)T} = 0,95 X_T$$

Transformateur T1:

$$\underline{Z}_{(0)T1} = R_{(0)T1} + jX_{(0)T1} = (2,62 + j 9,33) \text{ m}\Omega$$

Transformateur T2:

$$\underline{Z}_{(0)T2} = R_{(0)T2} + jX_{(0)T2} = (4,60 + j 14,55) \text{ m}\Omega$$

TABLE AI

Data of equipment for Example 1 and positive-sequence, negative-sequence and zero-sequence short-circuit impedances

| Equipment | Data of equipment | Data and equations for the calculation of $\underline{Z}_{(1)}$ and $\underline{Z}_{(0)}$ | $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$ (mΩ) | $\underline{Z}_{(0)}$ (mΩ) |
|---------------------|--|--|---|---|
| Network feeder Q | $U_{nQ} = 15 \text{ kV}$; $c_Q = 1.1$; $S_{kQ}^n = 250 \text{ MVA}$ $R_Q = 0.1 \cdot X_Q$ with $X_Q = 0.995 Z_Q$ | (5b) | $\underline{Z}_{Q1} = 0.070 + j 0.700$ | |
| Transformers T1 | $S_{rT} = 630 \text{ kVA}$; $U_{rTHV} = 15 \text{ kV}$; $U_{rTLV} = 0.4 \text{ kV}$ $u_{kr} = 4\%$; $P_{krT} = 6.5 \text{ kW}$; Dy 5 | (6) to (8) | $\underline{Z}_{T1} = 2.62 + j 9.82$ | $\underline{Z}_{(0)T1} = 2.62 + j 9.33$ |
| T2 | $S_{rT} = 400 \text{ kVA}$; $U_{rTHV} = 15 \text{ kV}$; $U_{rTLV} = 0.4 \text{ kV}$ $u_{kr} = 4\%$; $P_{krT} = 4.6 \text{ kW}$; Dy 5 | (6) to (8) | $\underline{Z}_{T2} = 4.60 + j 15.32$ | $\underline{Z}_{(0)T2} = 4.60 + j 14.55$ |
| Lines L1 | Two parallel four-core cables $l = 10 \text{ m}$; $4 \times 240 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$ $\underline{Z}'_L = (0.077 + j 0.079) \frac{\Omega}{\text{km}}$ | Data and ratios $\frac{R_{(0)L}}{R_L} \cdot \frac{X_{(0)L}}{X_L}$ given by the manufacturer | $\underline{Z}_{L1} = 0.385 + j 0.395$ | $\underline{Z}_{(0)L1} = 1.425 + j 0.715$ |
| L2 | Two parallel three-core cables $l = 4 \text{ m}$; $3 \times 150 \text{ mm}^2 \text{ Al}$ $\underline{Z}'_L = (0.208 + j 0.068) \frac{\Omega}{\text{km}}$ | | $\underline{Z}_{L2} = 0.416 + j 0.136$ | $\underline{Z}_{(0)L2} = 1.760 + j 0.165$ |
| L3 | Four-core cable $l = 20 \text{ m}$; $4 \times 70 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$ $\underline{Z}'_L = (0.271 + j 0.087) \frac{\Omega}{\text{km}}$ | | $\underline{Z}_{L3} = 5.420 + j 1.740$ | $\underline{Z}_{(0)L3} = 16.26 + j 7.76$ |
| L4 | Overhead line $l = 50 \text{ m}$; $q_n = 50 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$; $d = 0.4 \text{ m}$ $\underline{Z}'_L = (0.3704 + j 0.297) \frac{\Omega}{\text{km}}$ | (11), (12a) | $\underline{Z}_{L4} = 18.52 + j 14.85$ | $\underline{Z}_{(0)L4} = 37.04 + j 44.55$ |

A1.3 Determination of the zero-sequence impedances

A1.3.1 Transformers

For the transformers T1 and T2 with the vector group Dy5 the following relations are given by the manufacturer:

$$R_{(0)T} = R_T; X_{(0)T} = 0.95 X_T$$

Transformer T1:

$$\underline{Z}_{(0)T1} = R_{(0)T1} + jX_{(0)T1} = (2.62 + j 9.33) \text{ m}\Omega$$

Transformer T2:

$$\underline{Z}_{(0)T2} = R_{(0)T2} + jX_{(0)T2} = (4.60 + j 14.55) \text{ m}\Omega$$

A1.3.2 Lignes (câbles et lignes aériennes)

Les impédances homopolaires se calculent à partir des relations $R_{(0)L}/R_L$ et $X_{(0)L}/X_L$ fournies par le constructeur.

- Ligne L1: $R_{(0)L} = 3,7 R_L$; $X_{(0)L} = 1,81 X_L$, avec retour par le quatrième conducteur (neutre) et le conducteur périphérique:

$$\underline{Z}_{(0)L1} = (3,7 R_{L1} + j 1,81 X_{L1}) = (1,425 + j 0,715) \text{ m}\Omega$$

- Ligne L2: $R_{(0)L} = 4,23 R_L$; $X_{(0)L} = 1,21 X_L$, avec retour par le circuit de gaine:

$$\underline{Z}_{(0)L2} = (4,23 R_{L2} + j 1,21 X_{L2}) = (1,76 + j 0,165) \text{ m}\Omega$$

- Ligne L3: $R_{(0)L} = 3 R_L$; $X_{(0)L} = 4,46 X_L$, avec retour par le quatrième conducteur, la gaine et la terre:

$$\underline{Z}_{(0)L3} = (3 R_{L3} + j 4,46 X_{L3}) = (16,26 + j 7,76) \text{ m}\Omega$$

- Ligne L4: Ligne aérienne avec $R_{(0)L} = 2 R_L$; $X_{(0)L} = 3 X_L$, pour le calcul des valeurs maximales de courants de court-circuit:

$$\underline{Z}_{(0)L4} = (2 R_{L4} + j 3 X_{L4}) = (37,04 + j 44,55) \text{ m}\Omega$$

A1.4 Calcul des courants de court-circuit I'_k et i_p en cas de court-circuit symétrique (triphasé) aux points de défaut F1, F2 et F3

A1.4.1 Défaut en F1

L'impédance de court-circuit au point de défaut F1 vaut, d'après la figure A2:

$$\underline{Z}_k = \underline{Z}_{Q1} + \frac{\underline{Z}_{T1} (\underline{Z}_{T2} + \underline{Z}_{L1} + \underline{Z}_{L2})}{\underline{Z}_{T1} + \underline{Z}_{T2} + \underline{Z}_{L1} + \underline{Z}_{L2}} = (1,857 + j 6,771) \text{ m}\Omega$$

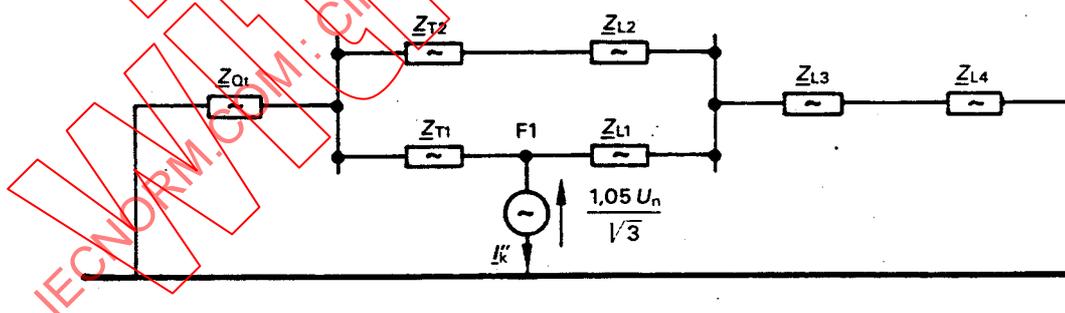


FIG. A2. - Système direct (conformément à la figure A1, page 108) pour le calcul de I'_k et i_p au point de défaut F1.

Le courant de court-circuit symétrique initial vaut, d'après l'équation (20), pour $c = 1,05$ (voir tableau I):

$$I'_k = \frac{c U_n}{\sqrt{3} Z_k} = \frac{1,05 \cdot 380 \text{ V}}{\sqrt{3} 7,021 \text{ m}\Omega} = 32,81 \text{ kA}$$

A1.3.2 Lines (cables and overhead lines)

The zero-sequence impedances are to be calculated with the relations $R_{(0)L}/R_L$ and $X_{(0)L}/X_L$ obtained from the manufacturer.

- Line L1: $R_{(0)L} = 3.7 R_L$; $X_{(0)L} = 1.81 X_L$ with return circuit by the fourth conductor and surrounding conductor:

$$\underline{Z}_{(0)L1} = (3.7 R_{L1} + j 1.81 X_{L1}) = (1.425 + j 0.715) \text{ m}\Omega$$

- Line L2: $R_{(0)L} = 4.23 R_L$; $X_{(0)L} = 1.21 X_L$ with return circuit by sheath:

$$\underline{Z}_{(0)L2} = (4.23 R_{L2} + j 1.21 X_{L2}) = (1.76 + j 0.165) \text{ m}\Omega$$

- Line L3: $R_{(0)L} = 3 R_L$; $X_{(0)L} = 4.46 X_L$ with return circuit by the fourth conductor, sheath and earth:

$$\underline{Z}_{(0)L3} = (3 R_{L3} + j 4.46 X_{L3}) = (16.26 + j 7.76) \text{ m}\Omega$$

- Line L4: Overhead line with $R_{(0)L} = 2 R_L$; $X_{(0)L} = 3 X_L$, when calculating the maximum short-circuit currents:

$$\underline{Z}_{(0)L4} = (2 R_{L4} + j 3 X_{L4}) = (37.04 + j 44.55) \text{ m}\Omega$$

A1.4 Calculation of the short-circuit currents I'_k and i_p for balanced short circuits at the short-circuit locations F1, F2 and F3

A1.4.1 Short-circuit location F1

Short-circuit impedance at the short-circuit location F1 according to Figure A2:

$$\underline{Z}_k = \underline{Z}_{01} + \frac{\underline{Z}_{T1} (\underline{Z}_{T2} + \underline{Z}_{L1} + \underline{Z}_{L2})}{\underline{Z}_{T1} + \underline{Z}_{T2} + \underline{Z}_{L1} + \underline{Z}_{L2}} = (1.857 + j 6.771) \text{ m}\Omega$$

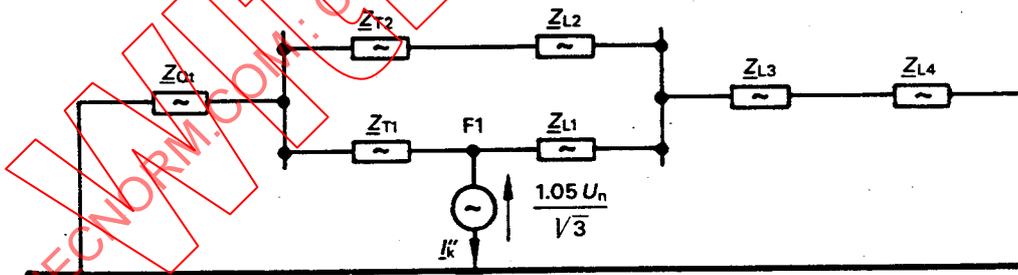


FIG. A2. – Positive-sequence system (according to Figure A1, page 109) for the calculation of I'_k and i_p at the short-circuit location F1.

Maximum initial symmetrical short-circuit current according to Equation (20) with $c = 1.05$ (see Table I):

$$I'_k = \frac{c U_n}{\sqrt{3} Z_k} = \frac{1.05 \cdot 380 \text{ V}}{\sqrt{3} 7.021 \text{ m}\Omega} = 32.81 \text{ kA}$$

Le courant de crête i_p se calcule comme il est indiqué au paragraphe 9.1.3.2. La valeur de \underline{Z}_k étant obtenue en valeur complexe, il suffit de retenir le méthode B, qui donne une valeur par excès, ou, pour plus de précision, la méthode C du paragraphe 9.1.3.2.

Méthode B (rapport d'impédance au point de défaut, équation (21)):

De l'impédance de court-circuit $\underline{Z}_k = R_k + j X_k$, on déduit le rapport $R_k/X_k = 1,857 \text{ m}\Omega/6,771 \text{ m}\Omega = 0,274$ et, par l'équation de κ au paragraphe 9.1.1.2:

$$\kappa_b = 1,02 + 0,98 e^{-3 \cdot 0,274} = 1,45$$

$$i_{p,b} = 1,15 \cdot \kappa_b \sqrt{2} I'_k = 1,15 \cdot 1,45 \sqrt{2} \cdot 32,81 \text{ kA} = 77,37 \text{ kA}$$

Méthode C (fréquence équivalente f_c , équation (16) avec R/X donné par l'équation (22a)):

L'impédance $\underline{Z}_c = R_c + j X_c$ se calcule d'après les indications de la méthode C du paragraphe 9.1.3.2, avec une source de tension équivalente de fréquence $f_c = 20 \text{ Hz}$ ($f_n = 50 \text{ Hz}$). La procédure de calcul est la même que pour le calcul de \underline{Z}_k , mais en prenant les valeurs suivantes:

$$\underline{Z}_{O1,c} = (0,070 + j 0,280) \text{ m}\Omega$$

$$\underline{Z}_{T1,c} = (2,62 + j 3,928) \text{ m}\Omega; \underline{Z}_{T2,c} = (4,60 + j 6,128) \text{ m}\Omega$$

$$\underline{Z}_{L1,c} = (0,385 + j 0,158) \text{ m}\Omega; \underline{Z}_{L2,c} = (0,416 + j 0,0544) \text{ m}\Omega$$

$$\underline{Z}_c = \underline{Z}_{O1,c} + \frac{\underline{Z}_{T1,c} (\underline{Z}_{T2,c} + \underline{Z}_{L1,c} + \underline{Z}_{L2,c})}{\underline{Z}_{T1,c} + \underline{Z}_{T2,c} + \underline{Z}_{L1,c} + \underline{Z}_{L2,c}} = (1,85 + j 2,718) \text{ m}\Omega$$

$$\frac{R}{X} = \frac{R_c}{X_c} \cdot \frac{f_c}{f_n} = \frac{1,85 \text{ m}\Omega}{2,718 \text{ m}\Omega} \cdot \frac{20 \text{ Hz}}{50 \text{ Hz}} = 0,272$$

$$\kappa_c = 1,02 + 0,98 e^{-3 \cdot 0,272} = 1,453$$

$$i_{p,c} = \kappa_c \sqrt{2} I'_k = 1,453 \sqrt{2} \cdot 32,81 \text{ kA} = 67,42 \text{ kA}$$

Pour interpréter ce résultat, il y a lieu de considérer le rapport R/X des branches en parallèle \underline{Z}_{T1} et $\underline{Z}_{T2} + \underline{Z}_{L1} + \underline{Z}_{L2}$. Cela donne:

$$\frac{R_{T1}}{X_{T1}} = 0,27$$

$$\frac{R_{T2} + R_{L1} + R_{L2}}{X_{T2} + X_{L1} + X_{L2}} = 0,34$$

De plus, les deux tiers du courant de court-circuit transitent par le transformateur T1.

Le courant coupé I_b et le courant de court-circuit permanent I_k aux trois points de défaut n'ont pas besoin d'être calculés, car ils sont égaux au courant de court-circuit symétrique initial I'_k correspondant à chacun de ces points (voir équation (15)).

Peak short-circuit current i_p according to Sub-clause 9.1.3.2. Because the calculation of Z_k is carried out with complex values, it is sufficient to choose the conservative Method B or for higher accuracy Method C of Sub-clause 9.1.3.2.

Method B (impedance ratio at the short-circuit location, Equation (21)):

From the short-circuit impedance $Z_k = R_k + j X_k$ the ratio $R_k/X_k = 1.857 \text{ m}\Omega/6.771 \text{ m}\Omega = 0.274$ can be found and with the equation for κ in Sub-clause 9.1.1.2 it follows that:

$$\kappa_b = 1.02 + 0.98 e^{-3 \cdot 0.274} = 1.45$$

$$i_{p,b} = 1.15 \cdot \kappa_b \sqrt{2} I_k'' = 1.15 \cdot 1.45 \sqrt{2} \cdot 32.81 \text{ kA} = 77.37 \text{ kA}$$

Method C (equivalent frequency f_c , Equation (16) with R/X according to Equation (22a)):

The impedance $Z_c = R_c + j X_c$ is calculated according to the comments of Method C of Sub-clause 9.1.3.2 with an equivalent source voltage of the frequency $f_c = 20 \text{ Hz}$ ($f_n = 50 \text{ Hz}$). The calculation procedure is similar to the calculation of Z_k , but taking the following values:

$$Z_{O1,c} = (0.070 + j 0.280) \text{ m}\Omega$$

$$Z_{T1,c} = (2.62 + j 3.928) \text{ m}\Omega; Z_{T2,c} = (4.60 + j 6.128) \text{ m}\Omega$$

$$Z_{L1,c} = (0.385 + j 0.158) \text{ m}\Omega; Z_{L2,c} = (0.416 + j 0.0544) \text{ m}\Omega$$

$$Z_c = Z_{O1,c} + \frac{Z_{T1,c} (Z_{T2,c} + Z_{L1,c} + Z_{L2,c})}{Z_{T1,c} + Z_{T2,c} + Z_{L1,c} + Z_{L2,c}} = (1.85 + j 2.718) \text{ m}\Omega$$

$$\frac{R}{X} = \frac{R_c}{X_c} \cdot \frac{f_c}{f_n} = \frac{1.85 \text{ m}\Omega}{2.718 \text{ m}\Omega} \cdot \frac{20 \text{ Hz}}{50 \text{ Hz}} = 0.272$$

$$\kappa_c = 1.02 + 0.98 e^{-3 \cdot 0.272} = 1.453$$

$$i_{p,c} = \kappa_c \sqrt{2} I_k'' = 1.453 \sqrt{2} \cdot 32.81 \text{ kA} = 67.42 \text{ kA}$$

In order to interpret this result, the ratios R/X of the parallel branches Z_{T1} and $Z_{T2} + Z_{L1} + Z_{L2}$ are to be considered. These can be calculated as:

$$\frac{R_{T1}}{X_{T1}} = 0.27$$

$$\frac{R_{T2} + R_{L1} + R_{L2}}{X_{T2} + X_{L1} + X_{L2}} = 0.34$$

Additionally, two-thirds of the short-circuit current are taken by the transformer T1.

The breaking current I_b and the steady state short-circuit current I_k at all three short-circuit locations need not be calculated since they are equal to the corresponding initial symmetrical short-circuit current I_k'' (see Equation (15)).

A1.4.2 Défaut en F2

$$\underline{Z}_k = \underline{Z}_{O1} + \frac{(\underline{Z}_{T1} + \underline{Z}_{L1})(\underline{Z}_{T2} + \underline{Z}_{L2})}{\underline{Z}_{T1} + \underline{Z}_{T2} + \underline{Z}_{L1} + \underline{Z}_{L2}} = (1,953 + j 6,852) \text{ m}\Omega$$

$$I_k'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_k} = \frac{1,05 \cdot 380 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 7,125 \text{ m}\Omega} = 32,33 \text{ kA}$$

Le courant de crête se calcule d'après le paragraphe 9.1.3.2:

$$\underline{Z}_c = (1,951 + j 2,742) \text{ m}\Omega$$

Cela conduit au rapport R/X :

$$R/X = 0,2847$$

On trouve d'après l'équation de κ au paragraphe 9.1.1.2:

$$\kappa_c = 1,44$$

d'où:

$$i_{p,c} = \kappa_c \sqrt{2} I_k'' = 1,44 \sqrt{2} \cdot 32,33 \text{ kA} = 65,84 \text{ kA}$$

La valeur correspondante du rapport R/X est, pour l'essentiel, déterminée par l'une des branches $\underline{Z}_{T1} + \underline{Z}_{L1}$ ou $\underline{Z}_{T2} + \underline{Z}_{L2}$ avec $(R_{T1} + R_{L1})/(X_{T1} + X_{L1}) = 0,29$ et $(R_{T2} + R_{L2})/(X_{T2} + X_{L2}) = 0,32$. De plus, ces deux relations sont identiques à $R_k/X_k = 1,953 \text{ }\Omega/6,852 \text{ }\Omega = 0,29 \rightarrow \kappa_b = 1,43$.

A1.4.3 Défaut en F3

$$\underline{Z}_k = \underline{Z}_{O1} + \frac{(\underline{Z}_{T1} + \underline{Z}_{L1})(\underline{Z}_{T2} + \underline{Z}_{L2})}{\underline{Z}_{T1} + \underline{Z}_{T2} + \underline{Z}_{L1} + \underline{Z}_{L2}} + \underline{Z}_{L3} + \underline{Z}_{L4} = (25,893 + j 23,442) \text{ m}\Omega$$

$$I_k'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_k} = \frac{1,05 \cdot 380 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 34,93 \text{ m}\Omega} = 6,6 \text{ kA}$$

$$i_{p,c} = \kappa_c \sqrt{2} I_k'' = 1,05 \sqrt{2} \cdot 6,6 \text{ kA} = 9,89 \text{ kA}$$

avec:

$$\underline{Z}_c = R_c + j X_c = \underline{Z}_{F2,c} + \underline{Z}_{L3,c} + \underline{Z}_{L4,c} = (1,951 + j 2,742) \text{ m}\Omega + (23,94 + j 6,636) \text{ m}\Omega = (25,89 + j 9,38) \text{ m}\Omega$$

$$\frac{R}{X} = \frac{R_c}{X_c} \cdot \frac{f_c}{f_n} = \frac{25,89 \text{ m}\Omega}{9,38 \text{ m}\Omega} \cdot \frac{20 \text{ Hz}}{50 \text{ Hz}} = 1,104$$

Calculé par l'équation (21) de la méthode B (voir paragraphe 9.1.3.2), on obtient:

$$\frac{R_k}{X_k} = \frac{25,893 \text{ m}\Omega}{23,442 \text{ m}\Omega} = 1,1043$$

soit:

$$\kappa_c = 1,05 \approx \kappa_b$$

A1.4.2 Short-circuit location F2

$$\underline{Z}_k = \underline{Z}_{O1} + \frac{(\underline{Z}_{T1} + \underline{Z}_{L1})(\underline{Z}_{T2} + \underline{Z}_{L2})}{\underline{Z}_{T1} + \underline{Z}_{T2} + \underline{Z}_{L1} + \underline{Z}_{L2}} = (1.953 + j 6.852) \text{ m}\Omega$$

$$I_k'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_k} = \frac{1.05 \cdot 380 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 7.125 \text{ m}\Omega} = 32.33 \text{ kA}$$

The peak short-circuit current can be calculated from Sub-clause 9.1.3.2:

$$\underline{Z}_c = (1.951 + j 2.742) \text{ m}\Omega$$

This leads to R/X ratio of:

$$R/X = 0.2847$$

Using the equation for κ in Sub-clause 9.1.1.2:

$$\kappa_c = 1.44$$

thus:

$$i_{p,c} = \kappa_c \sqrt{2} I_k'' = 1.44 \sqrt{2} \cdot 32.33 \text{ kA} = 65.84 \text{ kA}$$

The decisive ratio R/X is mostly determined by those of the branches $\underline{Z}_{T1} + \underline{Z}_{L1}$ and $\underline{Z}_{T2} + \underline{Z}_{L2}$ with $(R_{T1} + R_{L1})/(X_{T1} + X_{L1}) = 0.29$ and $(R_{T2} + R_{L2})/(X_{T2} + X_{L2}) = 0.32$. Moreover, these two relations are similar to $R_k/X_k = 1.953 \text{ }\Omega/6.852 \text{ }\Omega = 0.29 \rightarrow \kappa_b = 1.43$.

A1.4.3 Short-circuit location F3

$$\underline{Z}_k = \underline{Z}_{O1} + \frac{(\underline{Z}_{T1} + \underline{Z}_{L1})(\underline{Z}_{T2} + \underline{Z}_{L2})}{\underline{Z}_{T1} + \underline{Z}_{T2} + \underline{Z}_{L1} + \underline{Z}_{L2}} + \underline{Z}_{L3} + \underline{Z}_{L4} = (25.893 + j 23.442) \text{ m}\Omega$$

$$I_k'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_k} = \frac{1.05 \cdot 380 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 34.93 \text{ m}\Omega} = 6.6 \text{ kA}$$

$$i_{p,c} = \kappa_c \sqrt{2} I_k'' = 1.05 \sqrt{2} \cdot 6.6 \text{ kA} = 9.89 \text{ kA}$$

with:

$$\underline{Z}_c = R_c + j X_c = \underline{Z}_{F2,c} + \underline{Z}_{L3,c} + \underline{Z}_{L4,c} = (1.951 + j 2.742) \text{ m}\Omega + (23.94 + j 6.636) \text{ m}\Omega = (25.89 + j 9.38) \text{ m}\Omega$$

$$\frac{R}{X} = \frac{R_c}{X_c} \cdot \frac{f_c}{f_n} = \frac{25.89 \text{ m}\Omega}{9.38 \text{ m}\Omega} \cdot \frac{20 \text{ Hz}}{50 \text{ Hz}} = 1.104$$

Calculated according to Equation (21) of Method B (see Sub-clause 9.1.3.2):

$$\frac{R_k}{X_k} = \frac{25.893 \text{ m}\Omega}{23.442 \text{ m}\Omega} = 1.1043$$

therefore:

$$\kappa_c = 1.05 \approx \kappa_b$$

A1.5 Calcul des courants de court-circuit I''_{k1} et i_{p1} lors de courts-circuits phase-terre aux points de défaut F1, F2 et F3

A1.5.1 Défaut en F1

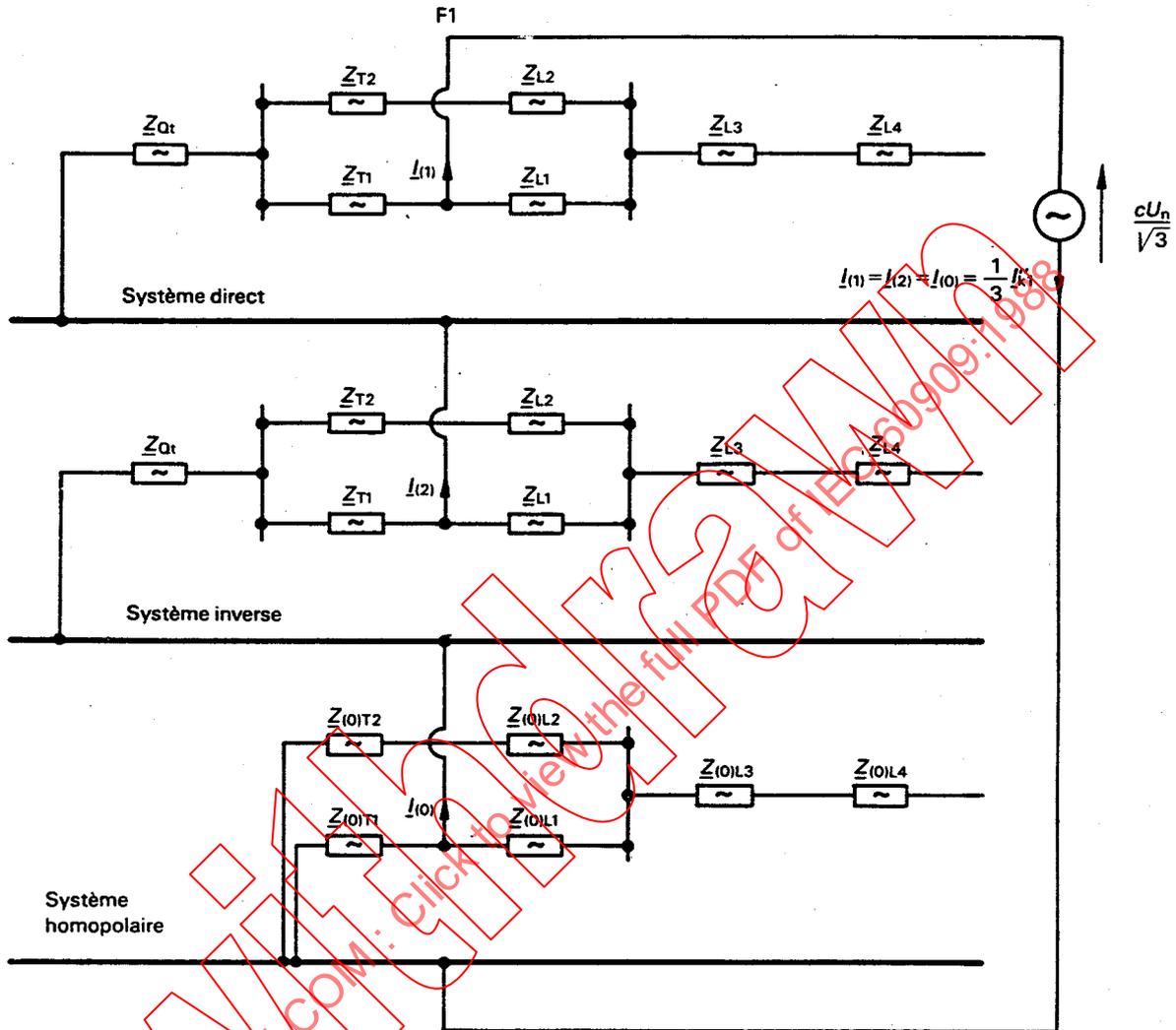


FIG. A3. — Systèmes direct, inverse et homopolaire et liaisons correspondant au point de défaut F1 en vue du calcul de I''_{k1} en cas de court-circuit phase-terre.

Impédances de court-circuit:

$$\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_k = (1,857 + j 6,771) \text{ m}\Omega$$

$$\underline{Z}_{(0)} = \frac{\underline{Z}_{(0)T1} (\underline{Z}_{(0)T2} + \underline{Z}_{(0)L1} + \underline{Z}_{(0)L2})}{\underline{Z}_{(0)T1} + \underline{Z}_{(0)T2} + \underline{Z}_{(0)L1} + \underline{Z}_{(0)L2}} = (2,099 + j 5,872) \text{ m}\Omega$$

$$\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(0)} = 2\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)} = (5,813 + j 19,414) \text{ m}\Omega$$

A1.5 Calculation of the short-circuit currents I'_{k1} and i_{p1} for line-to-earth short circuits at the short-circuit locations F1, F2 and F3

A1.5.1 Short-circuit location F1

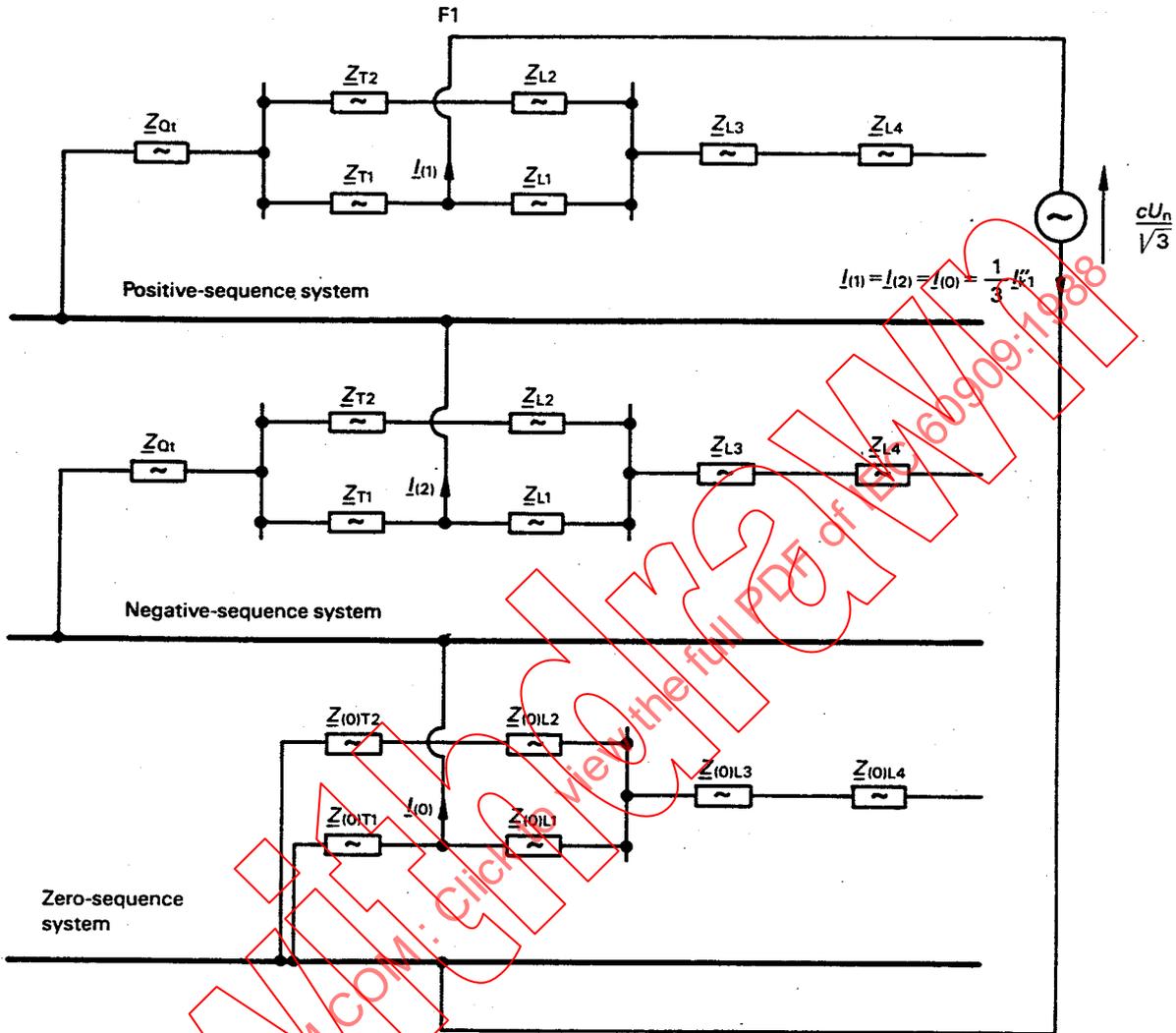


FIG. A3. - Positive-sequence, negative-sequence and zero-sequence systems with connections at the short-circuit location F1 for the calculation I'_{k1} at a line-to-earth short circuit.

Short-circuit impedances:

$$\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_k = (1.857 + j 6.771) \text{ m}\Omega$$

$$\underline{Z}_{(0)} = \frac{\underline{Z}_{(0)T1} (\underline{Z}_{(0)T2} + \underline{Z}_{(0)L1} + \underline{Z}_{(0)L2})}{\underline{Z}_{(0)T1} + \underline{Z}_{(0)T2} + \underline{Z}_{(0)L1} + \underline{Z}_{(0)L2}} = (2.099 + j 5.872) \text{ m}\Omega$$

$$\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(0)} = 2\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)} = (5.813 + j 19.414) \text{ m}\Omega$$

Le courant de court-circuit initial relatif à un court-circuit phase-terre est, d'après l'équation (29) du paragraphe 9.2.3.1:

$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3} cU_n}{|2\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)}|} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1,05 \cdot 380 \text{ V}}{20,266 \text{ m}\Omega} = 34,10 \text{ kA}, (I''_{k1}/I''_k = 1,04)$$

La valeur de crête i_{p1} de ce courant, d'après l'équation (31), du paragraphe 9.2.3.2, est calculée avec la même valeur de κ_c que dans le cas d'un court-circuit triphasé symétrique (voir paragraphe 9.1.3.2 pour κ_c):

$$i_{p1} = \kappa_c \sqrt{2} I''_{k1} = 1,453 \cdot \sqrt{2} \cdot 34,10 \text{ kA} = 70,07 \text{ kA}$$

A1.5.2 Défaut en F2

$$\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_k = (1,953 + j 6,852) \text{ m}\Omega$$

$$\underline{Z}_{(0)} = \frac{(\underline{Z}_{(0)T1} + \underline{Z}_{(0)L1})(\underline{Z}_{(0)T2} + \underline{Z}_{(0)L2})}{\underline{Z}_{(0)T1} + \underline{Z}_{(0)T2} + \underline{Z}_{(0)L1} + \underline{Z}_{(0)L2}} = (2,475 + j 5,970) \text{ m}\Omega$$

$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3} cU_n}{|2\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)}|} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1,05 \cdot 380 \text{ V}}{20,684 \text{ m}\Omega} = 33,41 \text{ kA}, (I''_{k1}/I''_k = 1,03)$$

$$i_{p1} = \kappa_c \sqrt{2} I''_{k1} = 1,44 \sqrt{2} \cdot 33,41 \text{ kA} = 68,04 \text{ kA}$$

A1.5.3 Défaut en F3

$$\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_k = (25,893 + j 23,442) \text{ m}\Omega$$

$$\underline{Z}_{(0)} = \frac{(\underline{Z}_{(0)T1} + \underline{Z}_{(0)L1})(\underline{Z}_{(0)T2} + \underline{Z}_{(0)L2})}{\underline{Z}_{(0)T1} + \underline{Z}_{(0)T2} + \underline{Z}_{(0)L1} + \underline{Z}_{(0)L2}} + \underline{Z}_{(0)L3} + \underline{Z}_{(0)L4} = (55,775 + j 58,280) \text{ m}\Omega$$

$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3} cU_n}{|2\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)}|} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1,05 \cdot 380 \text{ V}}{150,43 \text{ m}\Omega} = 4,59 \text{ kA}, (I''_{k1}/I''_k = 0,70)$$

$$i_{p1} = \kappa_c \sqrt{2} I''_{k1} = 1,05 \sqrt{2} \cdot 4,59 \text{ kA} = 6,82 \text{ kA}$$

A1.6 Récapitulation des résultats

TABLEAU AII

Récapitulation des résultats relatifs à l'exemple 1 ($U_n = 380 \text{ V}$)

| Position du défaut | $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_k$ | $\underline{Z}_{(0)}$ | $I''_k^{1)}$ | $i_{p.c}$ | I''_{k1} | $i_{p1.c}$ | I''_{k1}/I''_k |
|--------------------|---|-----------------------|--------------|-----------|------------|------------|------------------|
| | (mΩ) | (mΩ) | (kA) | (kA) | (kA) | (kA) | - |
| F1 | 7,021 | 6,24 | 32,81 | 67,42 | 34,10 | 70,07 | 1,04 |
| F2 | 7,125 | 6,46 | 32,33 | 65,84 | 33,41 | 68,04 | 1,03 |
| F3 | 34,93 | 80,67 | 6,60 | 9,89 | 4,59 | 6,82 | 0,70 |

¹⁾ Dans tous les cas, $I''_k = I_b = I_k$ (court-circuit éloigné des alternateurs).

Initial short-circuit current for a line-to-earth short circuit according to Equation (29) (see Sub-clause 9.2.3.1):

$$I'_{k1} = \frac{\sqrt{3} c U_n}{|2\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)}|} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1.05 \cdot 380 \text{ V}}{20.266 \text{ m}\Omega} = 34.10 \text{ kA}, (I'_{k1}/I'_k = 1.04)$$

Peak short-circuit current i_{p1} according to Equation (31) of Sub-clause 9.2.3.2, calculated with the same value for κ_c as in the case of a balanced three-phase short circuit (see Sub-clause 9.1.3.2 for κ_c):

$$i_{p1} = \kappa_c \sqrt{2} I'_{k1} = 1.453 \cdot \sqrt{2} \cdot 34.10 \text{ kA} = 70.07 \text{ kA}$$

A1.5.2 Short-circuit location F2

$$\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_k = (1.953 + j 6.852) \text{ m}\Omega$$

$$\underline{Z}_{(0)} = \frac{(\underline{Z}_{(0)T1} + \underline{Z}_{(0)L1})(\underline{Z}_{(0)T2} + \underline{Z}_{(0)L2})}{\underline{Z}_{(0)T1} + \underline{Z}_{(0)T2} + \underline{Z}_{(0)L1} + \underline{Z}_{(0)L2}} = (2.475 + j 5.970) \text{ m}\Omega$$

$$I'_{k1} = \frac{\sqrt{3} c U_n}{|2\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)}|} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1.05 \cdot 380 \text{ V}}{20.684 \text{ m}\Omega} = 33.41 \text{ kA}, (I'_{k1}/I'_k = 1.03)$$

$$i_{p1} = \kappa_c \sqrt{2} I'_{k1} = 1.44 \sqrt{2} \cdot 33.41 \text{ kA} = 68.04 \text{ kA}$$

A1.5.3 Short-circuit location F3

$$\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_k = (25.893 + j 23.442) \text{ m}\Omega$$

$$\underline{Z}_{(0)} = \frac{(\underline{Z}_{(0)T1} + \underline{Z}_{(0)L1})(\underline{Z}_{(0)T2} + \underline{Z}_{(0)L2})}{\underline{Z}_{(0)T1} + \underline{Z}_{(0)T2} + \underline{Z}_{(0)L1} + \underline{Z}_{(0)L2}} + \underline{Z}_{(0)L3} + \underline{Z}_{(0)L4} = (55.775 + j 58.280) \text{ m}\Omega$$

$$I'_{k1} = \frac{\sqrt{3} c U_n}{|2\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)}|} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1.05 \cdot 380 \text{ V}}{150.43 \text{ m}\Omega} = 4.59 \text{ kA}, (I'_{k1}/I'_k = 0.70)$$

$$i_{p1} = \kappa_c \sqrt{2} I'_{k1} = 1.05 \sqrt{2} \cdot 4.59 \text{ kA} = 6.82 \text{ kA}$$

A1.6 Collection of results

TABLE AII

Collection of results for Example 1 ($U_n = 380 \text{ V}$)

| Short-circuit location | $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_k$ | $\underline{Z}_{(0)}$ | $I'_k{}^{1)}$ | $i_{p.c}$ | I'_{k1} | $i_{p1.c}$ | I'_{k1}/I'_k |
|------------------------|---|-----------------------|---------------|-----------|-----------|------------|----------------|
| | (mΩ) | (mΩ) | (kA) | (kA) | (kA) | (kA) | — |
| F1 | 7.021 | 6.24 | 32.81 | 67.42 | 34.10 | 70.07 | 1.04 |
| F2 | 7.125 | 6.46 | 32.33 | 65.84 | 33.41 | 68.04 | 1.03 |
| F3 | 34.93 | 80.67 | 6.60 | 9.89 | 4.59 | 6.82 | 0.70 |

¹⁾ In all cases $I'_k = I_b = I_k$ (far-from-generator short circuit).

A2. Exemple 2: Calcul des courts-circuits symétriques dans un réseau moyenne tension, contribution de moteurs

A2.1 Problème

Soit le réseau moyenne tension 33 kV/6 kV (50 Hz) indiqué à la figure A4, page 126. Les calculs seront effectués sans contribution de moteurs asynchrones conformément au paragraphe 9.1 de la section un et avec contribution de moteurs asynchrones, comme il est indiqué au paragraphe 13.2 de la section deux.

Le poste 33 kV/6 kV comprenant deux transformateurs de puissance unitaire $S_{T} = 15$ MVA est alimenté par l'intermédiaire de deux câbles tripolaires du type à imprégnation visqueuse par une ligne d'alimentation du réseau de tension nominale $U_{nQ} = 33$ kV et de puissance de court-circuit $S''_{kQ} = 750$ MVA.

La résistance de court-circuit étant petite par rapport à la réactance de court-circuit ($R_k < 0,3 X_k$; voir paragraphe 9.1.1.1), on peut se contenter de ne calculer que les réactances des matériels électriques et la réactance de court-circuit X_k au point de défaut F de la figure A4.

Afin de montrer la différence d'approche, le calcul du courant de court-circuit I'_k sera effectué à partir des grandeurs réelles et des grandeurs réduites (voir paragraphe A2.3 pour le calcul en valeurs réduites). De même, pour montrer la différence avec le calcul à partir des grandeurs complexes et pour obtenir la composante aperiodique décroissante du courant de court-circuit, des calculs complémentaires sont présentés au paragraphe A2.4.

A2.2 Calcul à partir des grandeurs réelles

Le tableau AIII donne le calcul de la réactance de court-circuit X_k au point de défaut F de la figure A4, lorsque les disjoncteurs CB1 et CB2 sont ouverts (pas de contribution des moteurs asynchrones M1 et M2).

Le courant de court-circuit symétrique initial, sans contribution des moteurs asynchrones M1 et M2 vaut, avec $c = 1,1$ (d'après le tableau I pour les valeurs maximales de courants de court-circuit):

$$I'_{k \text{ (sans M1, M2)}} = \frac{c U_n}{\sqrt{3} X_k} = \frac{1,1 \cdot 6 \text{ kV}}{\sqrt{3} \cdot 0,2655 \Omega} = 14,35 \text{ kA}$$

X_k est pris dans le tableau AIII

A2. Example 2: Calculation of balanced short-circuit currents in a medium-voltage system, influence of motors

A2.1 Problem

A medium-voltage system 33 kV/6 kV (50 Hz) is given in Figure A4, page 127. The calculations are to be carried out without asynchronous motors according to Sub-clause 9.1 of Section One and with the influence of asynchronous motors according to Sub-clause 13.2 of Section Two.

The 33-kV-/6-kV-sub-station with two transformers each of $S_{rT} = 15$ MVA is fed through two three-core solid type 33-kV-cables from a network feeder with $S''_{kQ} = 750$ MVA and $U_{nQ} = 33$ kV.

As the short-circuit resistance is small in comparison with the short-circuit reactance ($R_k < 0.3 X_k$, see Sub-clause 9.1.1.1) it is sufficiently accurate to calculate only the short-circuit reactances of the electrical equipment and the short-circuit reactance X_k at the short-circuit location F in Figure A4.

To demonstrate the difference, when calculating the short-circuit current I'_k with absolute quantities or with quantities of a per unit system, both calculations are carried out (see Sub-clause A2.3 for the calculation with per unit quantities). To show the difference between a real and a complex calculation and to demonstrate the decaying of the aperiodic component of the short-circuit current an additional calculation is given in Sub-clause A2.4.

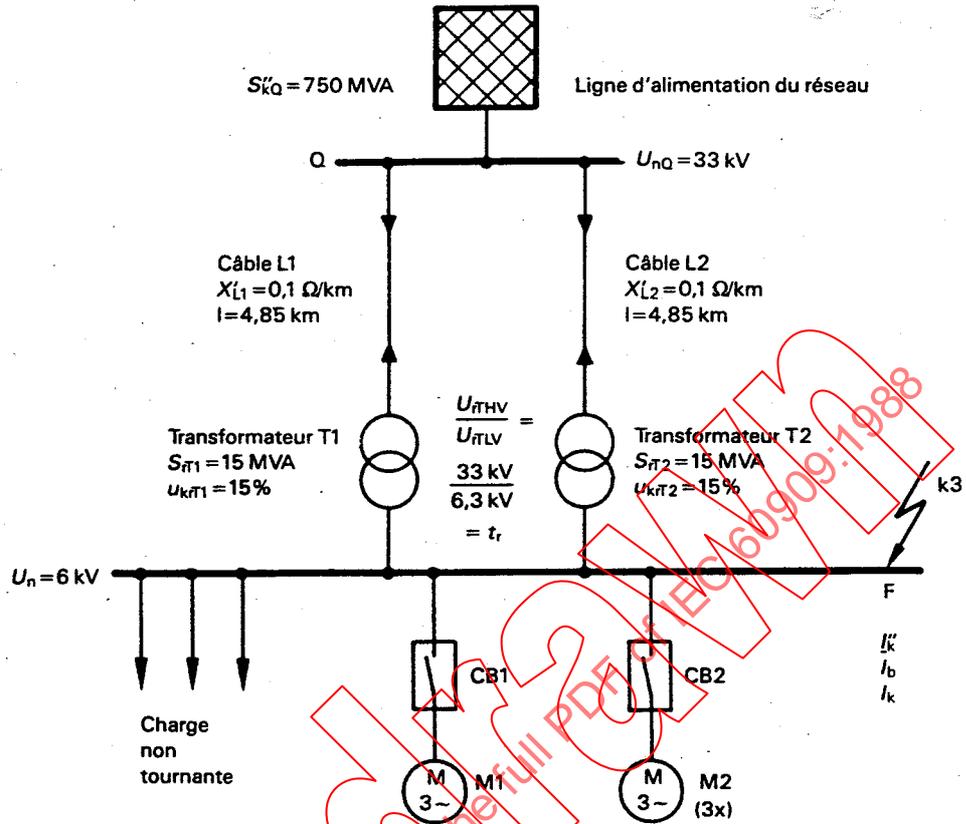
A2.2 Calculation with absolute quantities

Table AIII demonstrates the calculation of the short-circuit reactance X_k at the short-circuit location F in Figure A4 if the circuit breakers CB1 and CB2 are open (without influence of the asynchronous motors M1 and M2).

The initial symmetrical short-circuit current without the influence of the asynchronous motors M1 and M2 becomes with $c = 1.1$ (according to Table I for the maximum short-circuit currents):

$$I'_{k \text{ (without M1, M2)}} = \frac{cU_n}{\sqrt{3} X_k} = \frac{1.1 \cdot 6 \text{ kV}}{\sqrt{3} \cdot 0.2655 \Omega} = 14.35 \text{ kA}$$

X_k is taken from Table AIII.



Moteur asynchrone M1
 $P_{TM} = 5 \text{ MW}$; $U_{TM} = 6 \text{ kV}$
 $\cos \varphi_r = 0,86$; $\eta_r = 0,97$
 $I_{LR}/I_{TM} = 4$
 paires de pôles: 2

Trois moteurs asynchrones, traités comme un moteur unique équivalent M2, chaque moteur ayant les caractéristiques suivantes:
 $P_{TM} = 1 \text{ MW}$; $U_{TM} = 6 \text{ kV}$
 $\cos \varphi_r = 0,83$; $\eta_r = 0,94$
 $I_{LR}/I_{TM} = 5,5$
 paire de pôles: 1

FIG. A4. - Réseau à moyenne tension 33 kV/6 kV comportant des moteurs asynchrones.
 Exemple 2.

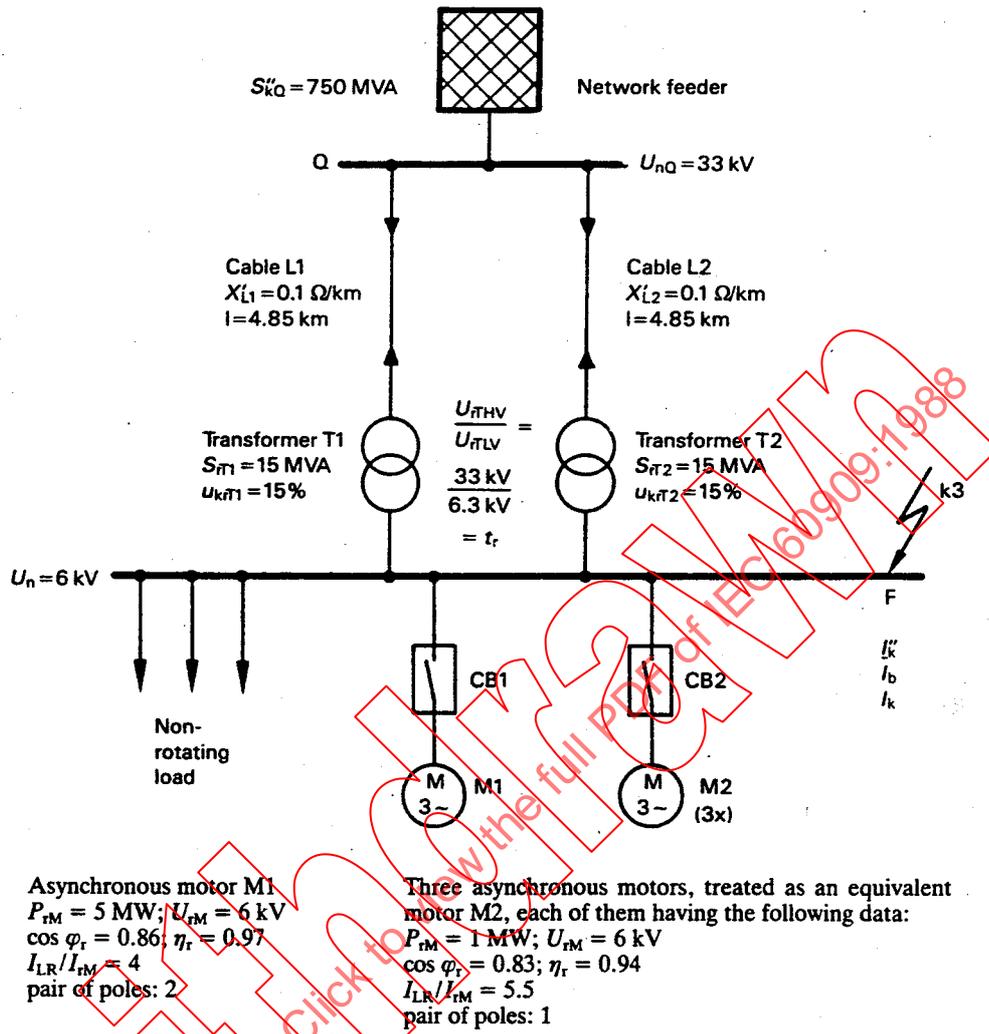


FIG. A4. - Medium voltage 33 kV/6 kV system with asynchronous motors. Example 2.

TABLEAU AIII

Calcul de X_k (Ω) dans l'exemple 2, sans contribution des moteurs asynchrones M1 et M2 (CB1 et CB2 ouverts)

| No | Matériels | Equations et calculs | Réactance (Ω) |
|----|----------------------------------|--|------------------------|
| 1 | Ligne d'alimentation du réseau | Equation (5b): $X_{Q1} = \frac{cU_{nQ}^2}{S_{kQ}^*} \cdot \frac{1}{r_r^2} = \frac{1,1 \cdot (33 \text{ kV})^2}{750 \text{ MVA}} \cdot \frac{1}{(33 \text{ kV}/6,3 \text{ kV})^2}$ | 0,0582 |
| 2 | Câble L1 | $X_{L1t} = X'_{L1} \cdot l \cdot \frac{1}{r_r^2} = 0,1 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot 4,85 \text{ km} \cdot \frac{1}{(33 \text{ kV}/6,3 \text{ kV})^2}$ | 0,0177 |
| 3 | Transformateur T1 | Equation (6) ($X_T \approx Z_T$) $X_{T1} = \frac{u_{krT1}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT1LV}^2}{S_{rT1}} = \frac{15\%}{100\%} \cdot \frac{(6,3 \text{ kV})^2}{15 \text{ MVA}}$ | 0,3969 |
| 4 | L1 + T1 | $X_{L1t} + X_{T1} = X_{L2t} + X_{T2}$ | 0,4146 |
| 5 | (L1 + T1) (L2 + T2) en parallèle | Deux branches égales en parallèle $\frac{1}{2} (X_{L1t} + X_{T1})$ | 0,2073 |
| 6 | Réactance de court-circuit X_k | $X_k = X_{Q1} + \frac{1}{2} (X_{L1t} + X_{T1})$ | 0,2655 |

Le courant de court-circuit symétrique initial, sans contribution des moteurs, au point de défaut indiqué (voir figure A4) vaut:

$$I''_{k \text{ (sans M1, M2)}} = \frac{cU_n}{\sqrt{3} \cdot X_k} = \frac{1,1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{6 \text{ kV}}{0,2655 \Omega} = 14,35 \text{ kA}$$

D'après le paragraphe 12.2.3 (court-circuit triphasé alimenté par des sources indépendantes et l'équation (55)), on peut ajouter les courants de court-circuit symétriques partiels au point de défaut (voir figure A4, page 126):

$$I''_k = I''_{k \text{ (sans M1, M2)}} + I''_{kM1} + I''_{kM2}$$

Les courants de court-circuit partiels I''_{kM1} et I''_{kM2} (CB1 et CB2 étant fermés) se calculent par l'équation (69) du tableau II, et à partir de l'équation (34) du paragraphe 11.5.3.5, qui fournit l'impédance de court-circuit des moteurs asynchrones.

Moteur M1:

$$Z_{M1} = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} = \frac{1}{4} \cdot \frac{(6 \text{ kV})^2}{6 \text{ MVA}} = 1,5 \Omega$$

où:

$$S_{rM} = \frac{P_{rM}}{\cos \varphi_r \eta_r} = \frac{5 \text{ MW}}{0,86 \cdot 0,97} = 6 \text{ MVA}$$

Moteur M2 (trois moteurs de mêmes caractéristiques → moteur équivalent):

$$Z_{M2} = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{5,5} \cdot \frac{(6 \text{ kV})^2}{1,28 \text{ MVA}} = 1,705 \Omega$$

où:

$$S_{rM} = \frac{P_{rM}}{\cos \varphi_r \eta_r} = \frac{1 \text{ MW}}{0,83 \cdot 0,94} = 1,28 \text{ MVA}$$

TABLE AIII

Calculation of X_k (Ω) for Example 2, without the influence of asynchronous motors M1 and M2 (CB1 and CB2 are open)

| No. | Equipment | Equations and calculations | Reactance (Ω) |
|-----|------------------------------------|--|------------------------|
| 1 | Network feeder | Equation (5b): $X_{Qr} = \frac{cU_{nQ}^2}{S_{kQ}} \cdot \frac{1}{r_r^2} = \frac{1.1 \cdot (33 \text{ kV})^2}{750 \text{ MVA}} \cdot \frac{1}{(33 \text{ kV}/6.3 \text{ kV})^2}$ | 0.0582 |
| 2 | Cable L1 | $X_{L1r} = X'_{L1} \cdot l \cdot \frac{1}{r_r^2} = 0.1 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot 4.85 \text{ km} \cdot \frac{1}{(33 \text{ kV}/6.3 \text{ kV})^2}$ | 0.0177 |
| 3 | Transformer T1 | Equation (6) ($X_T \approx Z_T$) $X_{T1} = \frac{u_{krT1}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT1LV}^2}{S_{rT1}} = \frac{15\%}{100\%} \cdot \frac{(6.3 \text{ kV})^2}{15 \text{ MVA}}$ | 0.3969 |
| 4 | L1 + T1 | $X_{L1r} + X_{T1} = X_{L2r} + X_{T2}$ | 0.4146 |
| 5 | (L1 + T1) (L2 + T2) in parallel | Two equal branches in parallel $\frac{1}{2} (X_{L1r} + X_{T1})$ | 0.2073 |
| 6 | Short-circuit reactance X_k | $X_k = X_{Qr} + \frac{1}{2} (X_{L1r} + X_{T1})$ | 0.2655 |

The initial symmetrical short-circuit current, without the influence of motors, at the short-circuit location (see Figure A4) is:

$$I''_{k \text{ (without M1, M2)}} = \frac{cU_n}{\sqrt{3} \cdot X_k} = \frac{1.1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{6 \text{ kV}}{0.2655 \Omega} = 14.35 \text{ kA}$$

According to Sub-clause 12.2.3 (three-phase short circuit fed from non-meshed sources and Equation (55) it is possible to add the partial symmetrical short-circuit current at the short-circuit location (see Figure A4, page 127):

$$I''_k = I''_{k \text{ (without M1, M2)}} + I''_{kM1} + I''_{kM2}$$

The partial short-circuit currents I''_{kM1} and I''_{kM2} (CB1 and CB2 are closed) are calculated from Equation (69) in Table II and Equation (34) in Sub-clause 11.5.3.5 for the short-circuit impedances of asynchronous motors.

Motor M1:

$$Z_{M1} = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} = \frac{1}{4} \cdot \frac{(6 \text{ kV})^2}{6 \text{ MVA}} = 1.5 \Omega$$

where:

$$S_{rM} = \frac{P_{rM}}{\cos \varphi_r \eta_r} = \frac{5 \text{ MW}}{0.86 \cdot 0.97} = 6 \text{ MVA}$$

Motor M2 (three motors with equal data → equivalent motor):

$$Z_{M2} = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{5.5} \cdot \frac{(6 \text{ kV})^2}{1.28 \text{ MVA}} = 1.705 \Omega$$

where:

$$S_{rM} = \frac{P_{rM}}{\cos \varphi_r \eta_r} = \frac{1 \text{ MW}}{0.83 \cdot 0.94} = 1.28 \text{ MVA}$$

Courants de court-circuit partiels, d'après l'équation (69):

$$I''_{kM1} = \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_{M1}} = \frac{1,1 \cdot 6 \text{ kV}}{\sqrt{3} \cdot 1,5 \Omega} = 2,54 \text{ kA}$$

$$I''_{kM2} = \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_{M2}} = \frac{1,1 \cdot 6 \text{ kV}}{\sqrt{3} \cdot 1,705 \Omega} = 2,23 \text{ kA}$$

Courant de court-circuit au point de défaut F (voir figure A4, page 126), y compris la contribution des moteurs M1 et M2:

$$I''_k = I''_{k(\text{sans M1, M2})} + I''_{kM1} + I''_{kM2} = (14,35 + 2,54 + 2,23) \text{ kA}$$

$$I''_k = 19,12 \text{ kA}$$

La contribution des moteurs asynchrones augmente dans le rapport 1,3 le courant de court-circuit calculé sans cette contribution.

$$S''_k = \sqrt{3} U_n I''_k = \sqrt{3} \cdot 6 \text{ kV} \cdot 19,12 \text{ kA} = 198,7 \text{ MVA} \approx 200 \text{ MVA}$$

Pour calculer le courant de court-circuit partiel fourni par le réseau, on applique le paragraphe 12.2.3.3:

$$I_{k(\text{sans M1, M2})} = I_{b(\text{sans M1, M2})} = I''_{k(\text{sans M1, M2})}$$

Pour le calcul de I_{b3M} , on doit déterminer μ par l'équation (47) et q par l'équation (67), avec $t_{\min} = 0,1 \text{ s}$. Pour $I''_{kM1}/I_{TM1} = 4,40$ et $I''_{kM2}/I_{TM2} = 6,05$, on trouve $\mu_{M1} = 0,80$ et $\mu_{M2} = 0,72$. Pour la puissance active par paire de pôles, $m_{M1} = 2,5 \text{ MW}$ et $m_{M2} = 1 \text{ MW}$, on calcule $q_{M1} = 0,68$ et $q_{M2} = 0,57$.

D'après l'équation (71), les courants partiels coupés valent:

$$I_{b3M1} = \mu_{M1} q_{M1} I''_{kM1} = 0,80 \cdot 0,68 \cdot 2,54 \text{ kA} = 1,38 \text{ kA}$$

$$I_{b3M2} = \mu_{M2} q_{M2} I''_{kM2} = 0,72 \cdot 0,57 \cdot 2,23 \text{ kA} = 0,92 \text{ kA}$$

Le courant de court-circuit symétrique coupé devient:

$$I_b = I_{b(\text{sans M1, M2})} + I_{b3M1} + I_{b3M2} = (14,35 + 1,38 + 0,92) \text{ kA} = 16,65 \text{ kA}$$

Enfin, d'après l'équation (72), il n'y a pas de contribution des moteurs asynchrones au courant de court-circuit permanent I_k :

$$I_k = I''_{k(\text{sans M1, M2})} = 14,35 \text{ kA}$$

A2.3 Calcul à partir des grandeurs réduites

Pour le calcul en valeurs réduites (par unité [p. u.]), il y a lieu de choisir deux grandeurs de référence (indice R). Dans l'exemple 2, ces grandeurs doivent être:

$$U_R = U_n = 6 \text{ kV ou } 33 \text{ kV et } S_R = 100 \text{ MVA}$$

Partial short-circuit currents according to Equation (69):

$$I''_{kM1} = \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_{M1}} = \frac{1.1 \cdot 6 \text{ kV}}{\sqrt{3} \cdot 1.5 \Omega} = 2.54 \text{ kA}$$

$$I''_{kM2} = \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_{M2}} = \frac{1.1 \cdot 6 \text{ kV}}{\sqrt{3} \cdot 1.705 \Omega} = 2.23 \text{ kA}$$

Short-circuit current at the short-circuit location F in Figure A4, page 127, including the influence of the motors M1 and M2:

$$I''_k = I''_{k(\text{without M1, M2})} + I''_{kM1} + I''_{kM2} = (14.35 + 2.54 + 2.23) \text{ kA}$$

$$I''_k = 19.12 \text{ kA}$$

The influence of the asynchronous motors raises the short-circuit current to 1.3 of the value without motors.

$$S''_k = \sqrt{3} U_n I''_k = \sqrt{3} \cdot 6 \text{ kV} \cdot 19.12 \text{ kA} = 198.7 \text{ MVA} \approx 200 \text{ MVA}$$

When calculating the partial short-circuit current fed from the network, Sub-clause 12.2.3.3 is used:

$$I_{k(\text{without M1, M2})} = I_{b(\text{without M1, M2})} = I''_{k(\text{without M1, M2})}$$

For the calculation of I_{b3M} the factor μ has to be determined according to Equation (47) and q according to Equation (67) with $t_{\min} = 0.1 \text{ s}$. With $I''_{kM1}/I_{rM1} = 4.40$ and $I''_{kM2}/I_{rM2} = 6.05$ the values $\mu_{M1} = 0.80$ and $\mu_{M2} = 0.72$ are calculated. With active power per pair of poles $m_{M1} = 2.5 \text{ MW}$ and $m_{M2} = 1 \text{ MW}$ the values $q_{M1} = 0.68$ and $q_{M2} = 0.57$ are found.

According to Equation (71) the partial breaking currents are:

$$I_{b3M1} = \mu_{M1} q_{M1} I''_{kM1} = 0.80 \cdot 0.68 \cdot 2.54 \text{ kA} = 1.38 \text{ kA}$$

$$I_{b3M2} = \mu_{M2} q_{M2} I''_{kM2} = 0.72 \cdot 0.57 \cdot 2.23 \text{ kA} = 0.92 \text{ kA}$$

The symmetrical short-circuit breaking current becomes:

$$I_b = I_{b(\text{without M1, M2})} + I_{b3M1} + I_{b3M2} = (14.35 + 1.38 + 0.92) \text{ kA} = 16.65 \text{ kA}$$

According to Equation (72) there is no contribution of the asynchronous motors to I_k :

$$I_k = I''_{k(\text{without M1, M2})} = 14.35 \text{ kA}$$

A2.3 Calculation with per unit quantities

For the calculation with per unit (p. u.) quantities two reference quantities (Index R) have to be chosen. For Example 2 those quantities shall be:

$$U_R = U_n = 6 \text{ kV or } 33 \text{ kV and } S_R = 100 \text{ MVA}$$

Les grandeurs réduites (avec astérisque [*] en indice supérieur) sont donc définies comme suit:

$$*U = \frac{U}{U_R} ; *I = \frac{IU_R}{S_R} ; *Z = \frac{ZS_R}{U_R^2} ; *S = \frac{S}{S_R}$$

Si le système n'est pas cohérent, comme il est indiqué au paragraphe 8.4, cela signifie que $U_{rTHV}/U_{rTLV} \neq U_{nHV}/U_{nLV}$, et donc que le rapport de transformation assigné rapporté aux tensions réduites devient:

$$*t_r = \frac{U_{rTHV}}{U_{rTLV}} \cdot \frac{U_{R,6kV}}{U_{R,33kV}} = \frac{33 \text{ kV}}{6,3 \text{ kV}} \cdot \frac{6 \text{ kV}}{33 \text{ kV}} = 0,9524$$

La procédure de calcul du courant de court-circuit symétrique initial, hors contribution des moteurs, est indiquée au tableau AIV de la même façon que dans le tableau AIII.

Le courant de court-circuit symétrique initial $*I''_{k \text{ (sans M1, M2)}}$, au point de défaut indiqué à la figure A4, page 126, vaut:

$$*I''_{k \text{ (sans M1, M2)}} = \frac{c * U_n}{\sqrt{3} * X_k} = \frac{1,1 \cdot 1 \text{ p. u.}}{\sqrt{3} \cdot 0,7375 \text{ p. u.}} = 0,8611 \text{ p. u.}$$

duquel on déduit le courant de court-circuit en kiloampères:

$$I''_{k \text{ (sans M1, M2)}} = *I''_{k \text{ (sans M1, M2)}} \frac{S_R}{U_{R,6kV}} = 0,8611 \text{ p. u.} \cdot \frac{100 \text{ MVA}}{6 \text{ kV}} = 14,35 \text{ kA}$$

TABLEAU AIV

Calcul de $*X_k$ (valeur réduite, par unité [p. u.] relatif à l'exemple 2, sans contribution des moteurs asynchrones M1 et M2 (CB1 et CB2 ouverts)

| No | Matériels | Equations et calculs | Réactance (p. M.) |
|----|-----------------------------------|--|-------------------|
| 1 | Ligne d'alimentation du réseau | Equation (5b): $*X_{Q1} = \frac{c * U_{n0}^2}{*S_{k0}} \cdot \frac{1}{*t_r^2} = \frac{1,1 \cdot (1 \text{ p. u.})^2}{7,5 \text{ p. u.}} \cdot \frac{1}{0,9524^2}$ | 0,1617 |
| 2 | Câble L1 | $*X_{L1} = *X'_{L1} \cdot l \frac{S_R}{U_{R,33kV}^2} \cdot \frac{1}{*t_r^2}$ $= 0,1 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot 4,85 \text{ km} \frac{100 \text{ MVA}}{(33 \text{ kV})^2} \cdot \frac{1}{0,9524^2}$ | 0,0491 |
| 3 | Transformateur T1 | Equation (6) ($X_T \approx Z_T$) $*X_{T1} = \frac{u_{krT1}}{100\%} \cdot \frac{U_{rTLV}^2}{S_{rT1}} \cdot \frac{S_R}{U_{R,6kV}^2}$ $= \frac{15\%}{100\%} \cdot \frac{(6,3 \text{ kV})^2}{15 \text{ MVA}} \cdot \frac{100 \text{ MVA}}{(6 \text{ kV})^2}$ | 1,1025 |
| 4 | L1 + T1 | $*X_{L1} + *X_{T1} = *X_{L21} + *X_{T2}$ | 1,1516 |
| 5 | (L1 + T1) (L2 + T2) en parallèle | Deux branches égales en parallèle $\frac{1}{2} (*X_{L1} + *X_{T1})$ | 0,5758 |
| 6 | Réactance de court-circuit $*X_k$ | $*X_k = *X_{Q1} + \frac{1}{2} (*X_{L1} + *X_{T1})$ | 0,7375 |

Per-unit (p. u.) quantities (with an asterisk [*] as a superscript) therefore are defined as follows:

$$*U = \frac{U}{U_R}; *I = \frac{IU_R}{S_R}; *Z = \frac{ZS_R}{U_R^2}; *S = \frac{S}{S_R}$$

If the system is not coherent as indicated in Sub-clause 8.4, that means $U_{rTHV}/U_{rTLV} \neq U_{nHV}/U_{nLV}$, then the rated transformation ratio related to p. u. voltages becomes:

$$*t_r = \frac{U_{rTHV}}{U_{rTLV}} \cdot \frac{U_{R,6kV}}{U_{R,33kV}} = \frac{33 \text{ kV}}{6.3 \text{ kV}} \cdot \frac{6 \text{ kV}}{33 \text{ kV}} = 0.9524$$

The procedure for the calculation of the initial symmetrical short-circuit current without the influence of the motors is given in Table AIV in a similar manner as in Table AIII.

The initial symmetrical short-circuit current $*I''_{k \text{ (without M1, M2)}}$ at the short-circuit location in Figure A4, page 127, is:

$$*I''_{k \text{ (without M1, M2)}} = \frac{c * U_n}{\sqrt{3} * X_k} = \frac{1.1 \cdot 1 \text{ p. u.}}{\sqrt{3} \cdot 0.7375 \text{ p. u.}} = 0.8611 \text{ p. u.}$$

From this the short-circuit current in kiloamperes is calculated:

$$I''_{k \text{ (without M1, M2)}} = *I''_{k \text{ (without M1, M2)}} \frac{S_R}{U_{R,6kV}} = 0.8611 \text{ p. u.} \cdot \frac{100 \text{ MVA}}{6 \text{ kV}} = 14.35 \text{ kA}$$

TABLE AIV

Calculation of $*X_k$ (per unit [p. u.]) for Example 2, without the influence of asynchronous motors M1 and M2 (CB1 and CB2 open)

| No. | Equipment | Equations and calculations | Reactance (p. M.) |
|-----|---------------------------------|--|-------------------|
| 1 | Network feeder | Equation (5b): $*X_{Qr} = \frac{c * U_{nQ}^2}{*S_{kQ}} \cdot \frac{1}{*t_r^2} = \frac{1.1 \cdot (1 \text{ p. u.})^2}{7.5 \text{ p. u.}} \cdot \frac{1}{0.9524^2}$ | 0.1617 |
| 2 | Cable L1 | $*X_{L1} = *X'_{L1} \cdot \frac{S_R}{U_{R,33kV}^2} \cdot \frac{1}{*t_r^2}$ $= 0.1 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot 4.85 \text{ km} \frac{100 \text{ MVA}}{(33 \text{ kV})^2} \cdot \frac{1}{0.9524^2}$ | 0.0491 |
| 3 | Transformer T1 | Equation (6) ($X_T \approx Z_T$) $*X_{T1} = \frac{u_{kT1}}{100\%} \cdot \frac{U_{rTLV}^2}{S_{T1}} \cdot \frac{S_R}{U_{R,6kV}^2}$ $= \frac{15\%}{100\%} \cdot \frac{(6.3 \text{ kV})^2}{15 \text{ MVA}} \cdot \frac{100 \text{ MVA}}{(6 \text{ kV})^2}$ | 1.1025 |
| 4 | L1 + T1 | $*X_{L1+T1} = *X_{L1} + *X_{T1}$ | 1.1516 |
| 5 | (L1 + T1) (L2 + T2) in parallel | Two equal branches in parallel $\frac{1}{2} (*X_{L1+T1} + *X_{T1})$ | 0.5758 |
| 6 | Short-circuit reactance $*X_k$ | $*X_k = *X_{Qr} + \frac{1}{2} (*X_{L1+T1} + *X_{T1})$ | 0.7375 |

Les valeurs réduites des impédances de court-circuit des moteurs asynchrones sont:

Moteur M1:

$$*Z_{M1} = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} \cdot \frac{S_R}{U_{R,6kV}^2} = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{S_R}{S_{rM}}$$

$$*Z_{M1} = \frac{1}{4} \cdot \frac{100 \text{ MVA}}{6 \text{ MVA}} = 4,167 \text{ p. u.}$$

Moteur M2:

$$*Z_{M2} = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} \cdot \frac{S_R}{U_{R,6kV}^2} = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{S_R}{S_{rM}}$$

$$*Z_{M2} = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{5,5} \cdot \frac{100 \text{ MVA}}{1,28 \text{ MVA}} = 4,735 \text{ p. u.}$$

Les courants de court-circuit partiels valent, d'après l'équation (69):

$$*I''_{kM1} = \frac{1,1 \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot *Z_{M1}} = \frac{1,1 \cdot 1 \text{ p. u.}}{\sqrt{3} \cdot 4,167 \text{ p. u.}} = 0,1524 \text{ p. u.} \rightarrow I''_{kM1} = 2,54 \text{ kA}$$

$$*I''_{kM2} = \frac{1,1 \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot *Z_{M2}} = \frac{1,1 \cdot 1 \text{ p. u.}}{\sqrt{3} \cdot 4,735 \text{ p. u.}} = 0,1341 \text{ p. u.} \rightarrow I''_{kM2} = 2,23 \text{ kA}$$

Ces résultats coïncident avec ceux du paragraphe A2.2.

A2.4 Calcul à partir des grandeurs complexes

Les calculs de court-circuit sont effectués dans le présent paragraphe à partir des grandeurs complexes du réseau moyenne tension conformément à la figure A4, page 126.

La figure A5 indique les valeurs complexes des impédances des matériels électriques, ainsi que les courants de court-circuit partiels et leur somme au point de défaut.

The short-circuit impedances in p. u. of the asynchronous motors are:

Motor M1:

$$*Z_{M1} = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} \cdot \frac{S_R}{U_{R,6kV}^2} = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{S_R}{S_{rM}}$$

$$*Z_{M1} = \frac{1}{4} \cdot \frac{100 \text{ MVA}}{6 \text{ MVA}} = 4.167 \text{ p. u.}$$

Motor M2:

$$*Z_{M2} = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} \cdot \frac{S_R}{U_{R,6kV}^2} = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{S_R}{S_{rM}}$$

$$*Z_{M2} = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{5.5} \cdot \frac{100 \text{ MVA}}{1.28 \text{ MVA}} = 4.735 \text{ p. u.}$$

Partial short-circuit currents according to Equation (69):

$$*I'_{kM1} = \frac{1.1 \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot *Z_{M1}} = \frac{1.1 \cdot 1 \text{ p. u.}}{\sqrt{3} \cdot 4.167 \text{ p. u.}} = 0.1524 \text{ p. u.} \rightarrow I'_{kM1} = 2.54 \text{ kA}$$

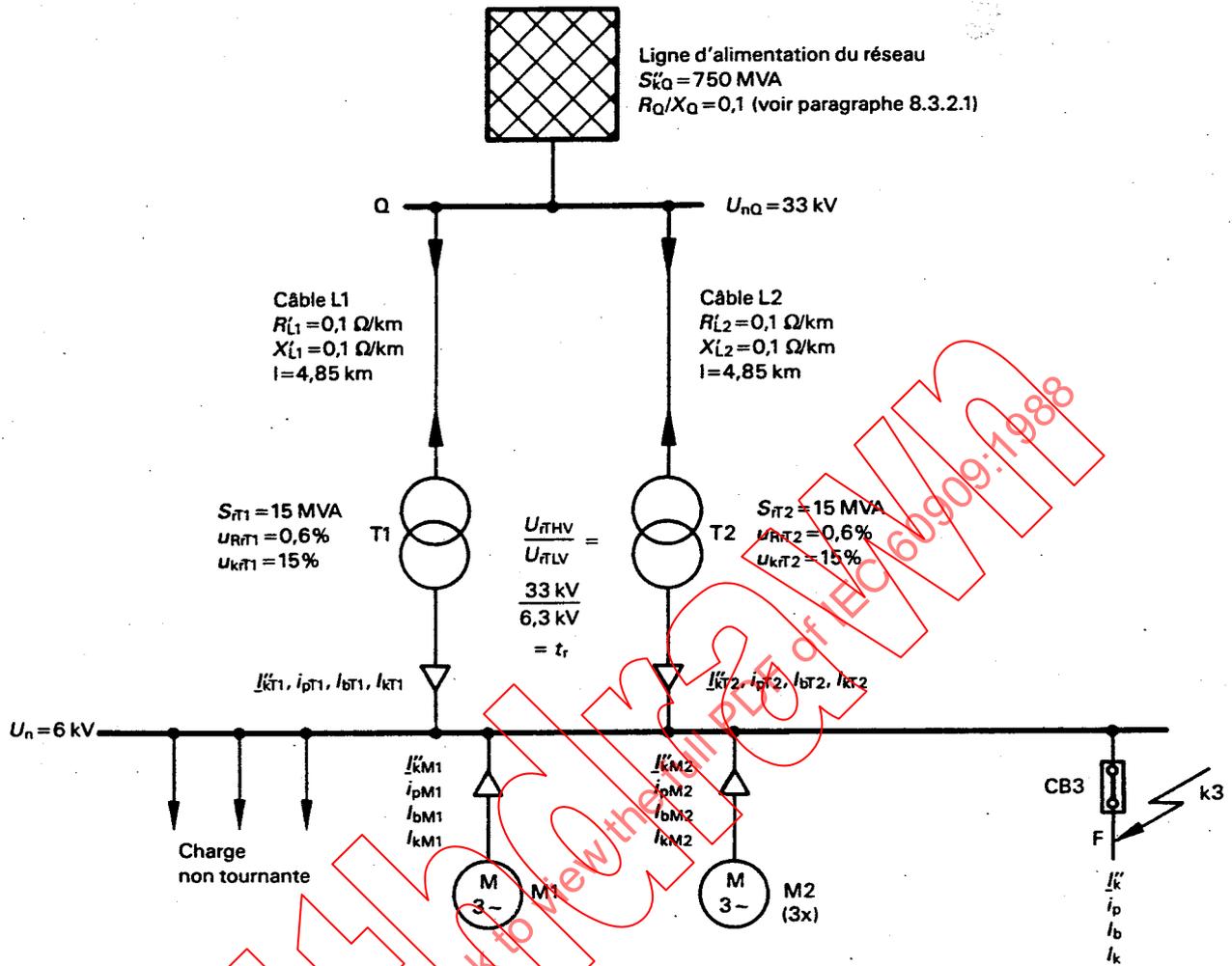
$$*I'_{kM2} = \frac{1.1 \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot *Z_{M2}} = \frac{1.1 \cdot 1 \text{ p. u.}}{\sqrt{3} \cdot 4.735 \text{ p. u.}} = 0.1341 \text{ p. u.} \rightarrow I'_{kM2} = 2.23 \text{ kA}$$

The results are the same as in Sub-clause A2.2.

A2.4 Calculation with complex quantities

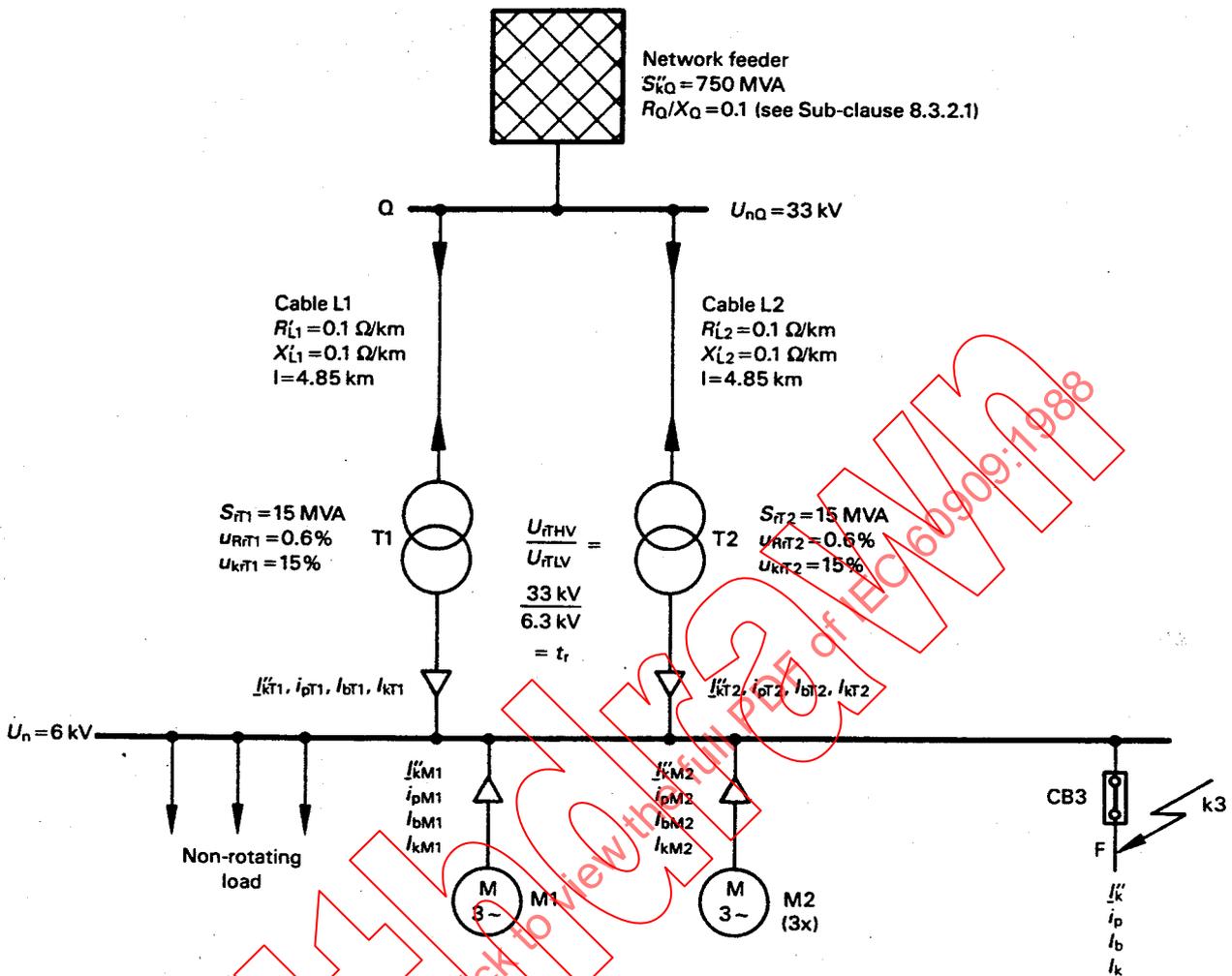
In this Sub-clause the short-circuit calculation is done with complex quantities for the medium voltage system according to Figure A4, page 127.

The complex impedances of electrical equipment are calculated from the data given in Figure A5. This figure indicates the partial short-circuit currents of the branches and their addition at the short-circuit location.



Les données relatives aux moteurs asynchrones M1 et M2 sont indiquées dans la figure A4

FIG. A5. — Réseau moyenne tension 33 kV/6 kV comportant des moteurs asynchrones (calcul avec grandeurs complexes relatif à l'exemple 2).



Data of asynchronous motors M1 and M2 given in Figure A4

FIG. A5. ← Medium voltage 33 kV/6 kV system with asynchronous motors (complex calculation for Example 2).

TABLEAU AV

Calcul de $Z_{k(T1, T2)}$ pour l'exemple 2,
avec contribution des moteurs asynchrones M1 et M2, selon la figure A5

| No | Matériels | Equations et calculs | Impédance (Ω) |
|----|----------------------------------|---|-------------------|
| 1 | Ligne d'alimentation du réseau | $Z_{Qr} = \frac{cU_{r0}^2}{S_{kQ}} \cdot \frac{1}{f_r} = 0,0582 \Omega \text{ (voir tableau AIII)}$ $\left. \begin{aligned} X_{Qr} &= 0,995 Z_{Qr} = 0,0579 \Omega \\ R_{Qr} &= 0,1 X_{Qr} = 0,0058 \Omega \end{aligned} \right\} \text{ Voir paragraphe 8.3.2.1}$ $\underline{Z}_{Qr} = R_{Qr} + jX_{Qr}$ | 0,0058 + j0,0579 |
| 2 | Câble L1 | $R_{L1r} = R_{L1l} l \frac{1}{f_r} = 0,1 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot 4,85 \text{ km} \cdot \frac{1}{\left(\frac{33 \text{ kV}}{6,3 \text{ kV}}\right)^2}$ $R_{L1r} = 0,0177 \Omega$ $X_{L1r} = X_{L1l} l \frac{1}{f_r} = 0,0177 \Omega \text{ (voir tableau AIII)}$ $\underline{Z}_{L1r} = R_{L1r} + jX_{L1r}$ | 0,0177 + j0,0177 |
| 3 | Transformateur T1 | $Z_{T1} = \frac{u_{krT1}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT1LV}^2}{S_{rT1}} = 0,3969 \Omega \text{ (voir tableau AIII)}$ <p>Equation (7):</p> $R_{T1} = \frac{u_{RrT1}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT1LV}^2}{S_{rT1}} = \frac{0,6\%}{100\%} \cdot \frac{(6,3 \text{ kV})^2}{15 \text{ MVA}}$ $R_{T1} = 0,01588 \Omega$ <p>Equation (8):</p> $X_{T1} = \sqrt{Z_{T1}^2 - R_{T1}^2} = 0,3966 \Omega$ $\underline{Z}_{T1} = R_{T1} + jX_{T1}$ | 0,01588 + j0,3966 |
| 4 | L1 + T1 | $\underline{Z}_{L1r} + \underline{Z}_{T1} = \underline{Z}_{L2r} + \underline{Z}_{T2}$ | 0,03358 + j0,4143 |
| 5 | (L1 + T1) (L2 + T2) en parallèle | $\frac{1}{2} (\underline{Z}_{L1r} + \underline{Z}_{T1})$ | 0,01679 + j0,2072 |
| 6 | Impédance de court-circuit | $\underline{Z}_{k(T1, T2)} = \underline{Z}_{Qr} + \frac{1}{2} (\underline{Z}_{L1r} + \underline{Z}_{T1})$ | 0,02259 + j0,2651 |

TABLE AV

Calculation of $Z_{k(T1, T2)}$ for Example 2,
with asynchronous motors M1 and M2 according to Figure A5

| No. | Equipment | Equations et calculations | Impedance (Ω) |
|-----|---------------------------------|--|-------------------|
| 1 | Network feeder | $Z_{Qt} = \frac{cU_{nQ}^2}{S'_{kQ}} \cdot \frac{1}{r_r^2} = 0.0582 \Omega \text{ (see Table AIII)}$ $\left. \begin{aligned} X_{Qt} &= 0.995 Z_{Qt} = 0.0579 \Omega \\ R_{Qt} &= 0.1 X_{Qt} = 0.0058 \Omega \end{aligned} \right\} \text{ See Sub-clause 8.3.2.1}$ $\underline{Z}_{Qt} = R_{Qt} + jX_{Qt}$ | 0.0058 + j0.0579 |
| 2 | Cable L1 | $R_{L1t} = R'_{L1} l \frac{1}{r_r^2} = 0.1 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot 4.85 \text{ km} \cdot \frac{1}{\left(\frac{33 \text{ kV}}{6.3 \text{ kV}}\right)^2}$ $R_{L1t} = 0.0177 \Omega$ $X_{L1t} = X'_{L1} l \frac{1}{r_r^2} = 0.0177 \Omega \text{ (see Table AIII)}$ $\underline{Z}_{L1t} = R_{L1t} + jX_{L1t}$ | 0.0177 + j0.0177 |
| 3 | Transformer T1 | $Z_{T1} = \frac{u_{kT1}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT1LV}^2}{S_{rT1}} = 0.3969 \Omega \text{ (see Table AIII)}$ <p>Equation (7):</p> $R_{T1} = \frac{u_{RT1}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT1LV}^2}{S_{rT1}} = \frac{0.6\%}{100\%} \cdot \frac{(6.3 \text{ kV})^2}{15 \text{ MVA}}$ $R_{T1} = 0.01588 \Omega$ <p>Equation (8):</p> $X_{T1} = \sqrt{Z_{T1}^2 - R_{T1}^2} = 0.3966 \Omega$ $\underline{Z}_{T1} = R_{T1} + jX_{T1}$ | 0.01588 + j0.3966 |
| 4 | L1 + T1 | $\underline{Z}_{L1t} + \underline{Z}_{T1} = \underline{Z}_{L2t} + \underline{Z}_{T2}$ | 0.03358 + j0.4143 |
| 5 | (L1 + T1) (L2 + T2) in parallel | $\frac{1}{2} (\underline{Z}_{L1t} + \underline{Z}_{T1})$ | 0.01679 + j0.2072 |
| 6 | Short-circuit impedance | $\underline{Z}_{k(T1, T2)} = \underline{Z}_{Qt} + \frac{1}{2} (\underline{Z}_{L1t} + \underline{Z}_{T1})$ | 0.02259 + j0.2651 |

Impédances de court-circuit des moteurs asynchrones M1 et M2:

Moteur M1:

$$Z_{M1} = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} = 1,5 \Omega \quad (\text{voir paragraphe A2.2})$$

$$P_{rM}/p = 5 \text{ MW}/2 = 2,5 \text{ MW} [\geq 1 \text{ MW}] \quad (p = 2 \text{ paires de pôles})$$

d'où:

$$X_M = 0,995 Z_M \text{ et } R_M = 0,1 X_M \quad (\text{voir paragraphe 11.5.3.5})$$

$$\underline{Z}_{M1} = (0,1493 + j 1,493) \Omega; |\underline{Z}_{M1}| = 1,5 \Omega$$

Moteur M2 (trois moteurs de mêmes caractéristiques → moteur équivalent):

$$Z_{M2} = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} = 1,705 \Omega \quad (\text{voir paragraphe A2.2})$$

$$P_{rM}/p = 1 \text{ MW}/1 = 1 \text{ MW} [\geq 1 \text{ MW}]$$

d'où:

$$X_M = 0,995 Z_M \text{ et } R_M = 0,1 X_M$$

$$\underline{Z}_{M2} = (0,1696 + j 1,696) \Omega; |\underline{Z}_{M2}| = 1,705 \Omega$$

Le courant de court-circuit I_k'' au point de défaut F de la figure A5, page 136, vaut, d'après l'équation (55) du paragraphe 12.2.3.2:

$$\underline{I}_k'' = (\underline{I}_{kT1}'' + \underline{I}_{kT2}'') + \underline{I}_{kM1}'' + \underline{I}_{kM2}''$$

$$\underline{I}_{kT1}'' + \underline{I}_{kT2}'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_{k(T1,T2)}} = \frac{1,1 \cdot 6 \text{ kV}}{\sqrt{3} (0,02259 + j 0,2651) \Omega} = (1,216 - j 14,27) \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{kM1}'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_{M1}} = \frac{1,1 \cdot 6 \text{ kV}}{\sqrt{3} (0,1493 + j 1,493) \Omega} = (0,253 - j 2,527) \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{kM2}'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_{M2}} = \frac{1,1 \cdot 6 \text{ kV}}{\sqrt{3} (0,1696 + j 1,696) \Omega} = (0,223 - j 2,225) \text{ kA}$$

$$\underline{I}_k'' = (1,692 - j 19,02) \text{ kA}; |\underline{I}_k''| = 19,10 \text{ kA} \quad (\text{voir paragraphe A2.2})$$

La valeur de crête i_p du courant de court-circuit au point de défaut F, selon la figure A5, vaut d'après l'équation (56) du paragraphe 12.2.3.3:

$$i_p = (i_{pT1} + i_{pT2}) + i_{pM1} + i_{pM2}$$

Short-circuit impedances of asynchronous motors M1 and M2:

Motor M1:

$$Z_{M1} = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} = 1.5 \Omega \quad (\text{see Sub-clause A2.2})$$

$$P_{rM}/p = 5 \text{ MW}/2 = 2.5 \text{ MW} [\geq 1 \text{ MW}] \quad (p = 2 \text{ pairs of poles})$$

therefore:

$$X_M = 0.995 Z_M \text{ et } R_M = 0.1 X_M \quad (\text{see Sub-clause 11.5.3.5})$$

$$\underline{Z}_{M1} = (0.1493 + j 1.493) \Omega; |\underline{Z}_{M1}| = 1.5 \Omega$$

Motor M2 (three motors with equal data → equivalent motor):

$$Z_{M2} = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} = 1.705 \Omega \quad (\text{see Sub-clause A2.2})$$

$$P_{rM}/p = 1 \text{ MW}/1 = 1 \text{ MW} [\geq 1 \text{ MW}]$$

therefore:

$$X_M = 0.995 Z_M \text{ and } R_M = 0.1 X_M$$

$$\underline{Z}_{M2} = (0.1696 + j 1.696) \Omega; |\underline{Z}_{M2}| = 1.705 \Omega$$

Short-circuit current \underline{I}_k'' at the short-circuit location F in Figure A5, page 137, according to Equation (55) in Sub-clause 12.2.3.2:

$$\underline{I}_k'' = (\underline{I}_{kT1}'' + \underline{I}_{kT2}'') + \underline{I}_{kM1}'' + \underline{I}_{kM2}''$$

$$\underline{I}_{kT1}'' + \underline{I}_{kT2}'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_{k(T1,T2)}} = \frac{1.1 \cdot 6 \text{ kV}}{\sqrt{3} (0.02259 + j 0.2651) \Omega} = (1.216 - j 14.27) \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{kM1}'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_{M1}} = \frac{1.1 \cdot 6 \text{ kV}}{\sqrt{3} (0.1493 + j 1.493) \Omega} = (0.253 - j 2.527) \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{kM2}'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_{M2}} = \frac{1.1 \cdot 6 \text{ kV}}{\sqrt{3} (0.1696 + j 1.696) \Omega} = (0.223 - j 2.225) \text{ kA}$$

$$\underline{I}_k'' = (1.692 - j 19.02) \text{ kA}; |\underline{I}_k''| = 19.10 \text{ kA} \quad (\text{see Sub-clause A2.2})$$

Peak short-circuit current i_p at the short-circuit location F in Figure A5 according to Equation (56) in Sub-clause 12.2.3.3:

$$i_p = (i_{pT1} + i_{pT2}) + i_{pM1} + i_{pM2}$$

Soit conformément au paragraphe 9.1.1.2:

$$T1, T2: \frac{R}{X} = \frac{0,02259 \Omega}{0,2651 \Omega} = 0,0852$$

$$\kappa = 1,02 + 0,98 e^{-3 \cdot 0,0852} = 1,78$$

$$i_{pT1} + i_{pT2} = \sqrt{2} \kappa (I''_{kT1} + I''_{kT2})$$

$$i_{pT1} + i_{pT2} = \sqrt{2} \cdot 1,78 \cdot 14,32 \text{ kA} = 36,05 \text{ kA}$$

$$M1: \frac{R}{X} = 0,1; \kappa_{M1} = 1,75 \quad (\text{voir tableau II})$$

$$i_{pM1} = \sqrt{2} \kappa_{M1} I''_{kM1} = \sqrt{2} \cdot 1,75 \cdot 2,54 \text{ kA} = 6,29 \text{ kA}$$

$$M2: \frac{R}{X} = 0,1; \kappa_{M2} = 1,75$$

$$i_{pM2} = \sqrt{2} \kappa_{M2} I''_{kM2} = \sqrt{2} \cdot 1,75 \cdot 2,24 \text{ kA} = 5,53 \text{ kA}$$

$$i_p = (36,05 + 6,29 + 5,53) \text{ kA} = 47,87 \text{ kA}$$

La composante apériodique décroissante i_{DC} vaut, d'après l'équation (1), à 50 Hz:

$$i_{DC} = (i_{DC,T1} + i_{DC,T2}) + i_{DC,M1} + i_{DC,M2}$$

$$i_{DC,T1} + i_{DC,T2} = \sqrt{2} (I''_{kT1} + I''_{kT2}) e^{-2\pi f t R/X}$$

$$i_{DC,T1} + i_{DC,T2} = \sqrt{2} \cdot 14,32 \text{ kA} e^{-2\pi \cdot 50 \text{ s}^{-1} \cdot 0,0852 \cdot t}$$

$$i_{DC,M1} = \sqrt{2} I''_{kM1} e^{-2\pi f t R/X} = \sqrt{2} \cdot 2,54 \text{ kA} e^{-2\pi \cdot 50 \text{ s}^{-1} \cdot 0,1 \cdot t}$$

$$i_{DC,M2} = \sqrt{2} I''_{kM2} e^{-2\pi f t R/X} = \sqrt{2} \cdot 2,24 \text{ kA} e^{-2\pi \cdot 50 \text{ s}^{-1} \cdot 0,1 \cdot t}$$

Le courant de court-circuit symétrique coupé I_b vaut, d'après l'équation (57) du paragraphe 12.2.3.3:

$$I_b = (I_{bT1} + I_{bT2}) + I_{bM1} + I_{bM2}$$

$$I_{bT1} + I_{bT2} = I''_{kT1} + I''_{kT2} = 14,32 \text{ kA}$$

(d'après le paragraphe 12.2.3.3, court-circuit éloigné des alternateurs)

$$I_{bM1} = \mu_{M1} q_{M1} I''_{kM1}$$

Avec un temps mort minimal $t_{\min} = 0,1 \text{ s}$ et les valeurs déjà calculées de μ et de q :

$$I_{bM1} = 0,80 \cdot 0,68 \cdot 2,54 \text{ kA} = 1,38 \text{ kA}$$