

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

AVA Documents
Document Sharing Hub

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 $Z_{TG} = U_{TG}^2 / S_{TG}$ de la machine synchrone, on obtient la valeur réduite représentée par la lettre minuscule $x_d'' = X_d'' / Z_{TG}$.

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 $\underline{Z}_{(1)}$ 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 $\underline{Z}_{(2)}$ 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 $\underline{Z}_{(0)}$ 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 $3 \underline{Z}_{NE}$.

3.20.4 *Short-circuit impedance $\underline{Z}_k$ of a three-phase a.c. system*

Abbreviated expression for the positive-sequence short-circuit impedance $\underline{Z}_{(1)}$ 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 $\underline{Z}_{(1)}$ 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 $\underline{Z}_{(1)}$ 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 $\underline{Z}_{(2)}$ 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 $\underline{Z}_{(0)}$ 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_{k3}''	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_{kT}	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
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)
rs	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
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)

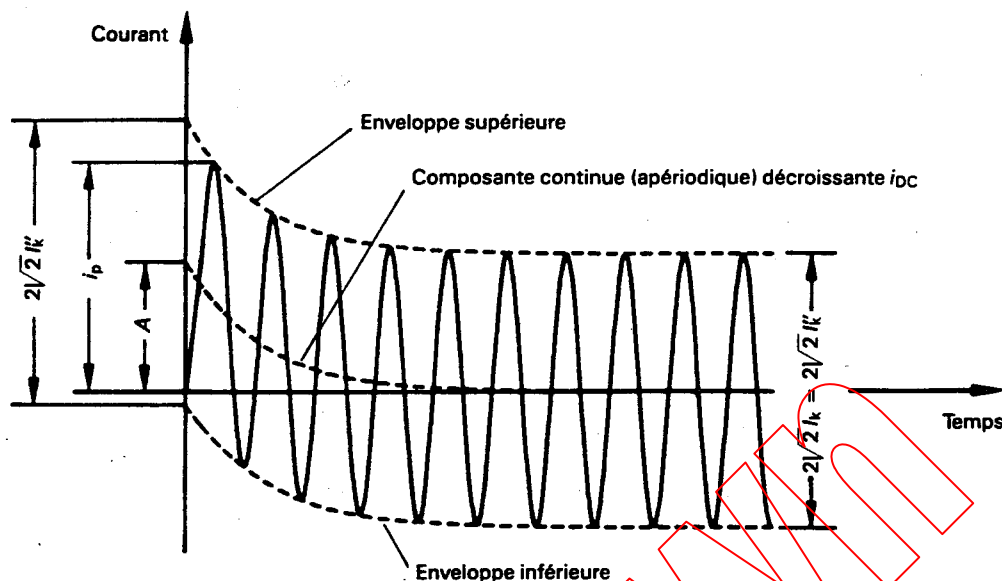
κ	Factor for the calculation of the peak short-circuit current
λ	Factor for the calculation of the steady-state short-circuit current
μ	Factor for the calculation of the symmetrical short-circuit breaking current
μ_0	Absolute permeability of vacuum, $\mu_0 = 4\pi/10^{-7}$ H/m
ρ	Resistivity
φ	Phase angle

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)
rs1	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:

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

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

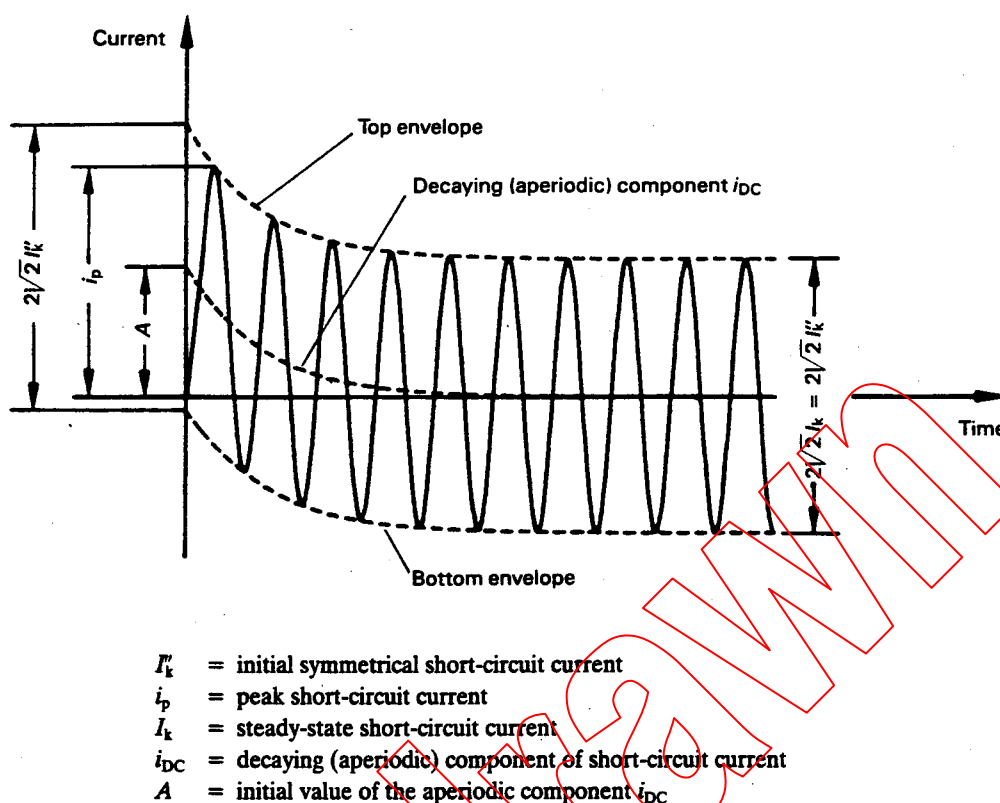


FIG. 1. — Short-circuit current of a far-from-generator short circuit (schematic diagram).

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.

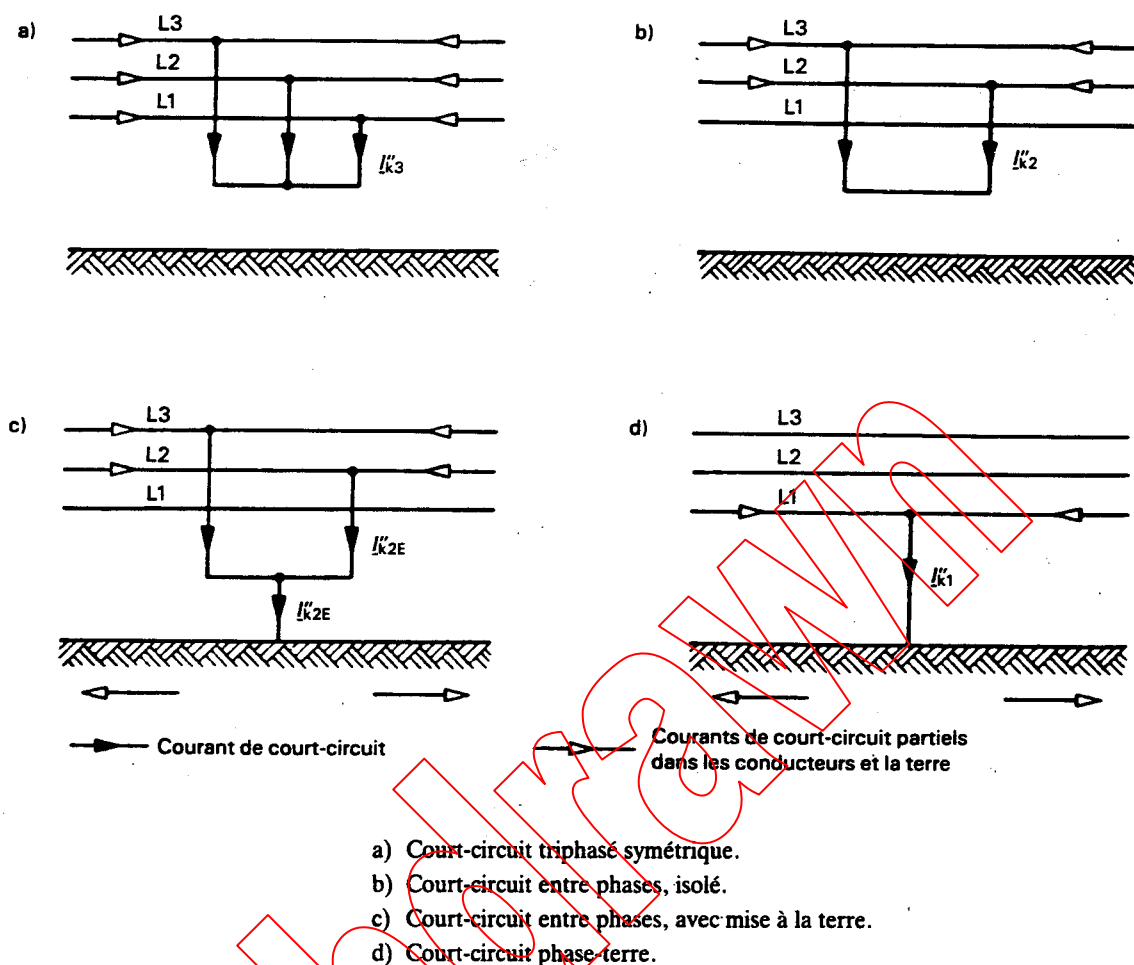


FIG. 2. — Caractérisation des courts-circuits et de leurs courants. Le sens des flèches figurant les courants est arbitraire.

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.

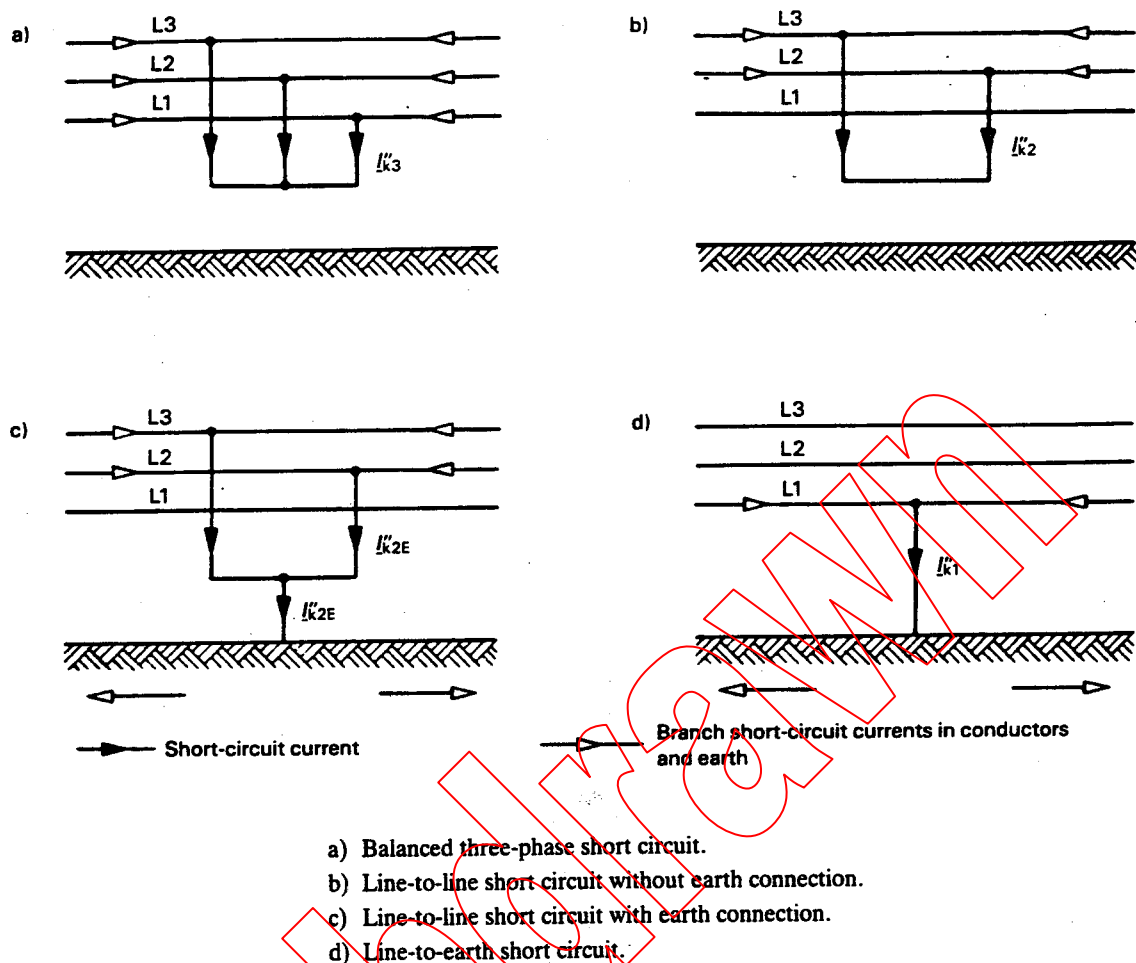


FIG. 2. – Characterization of short circuits and their currents. The direction of current arrows is chosen arbitrarily.

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_Q (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.

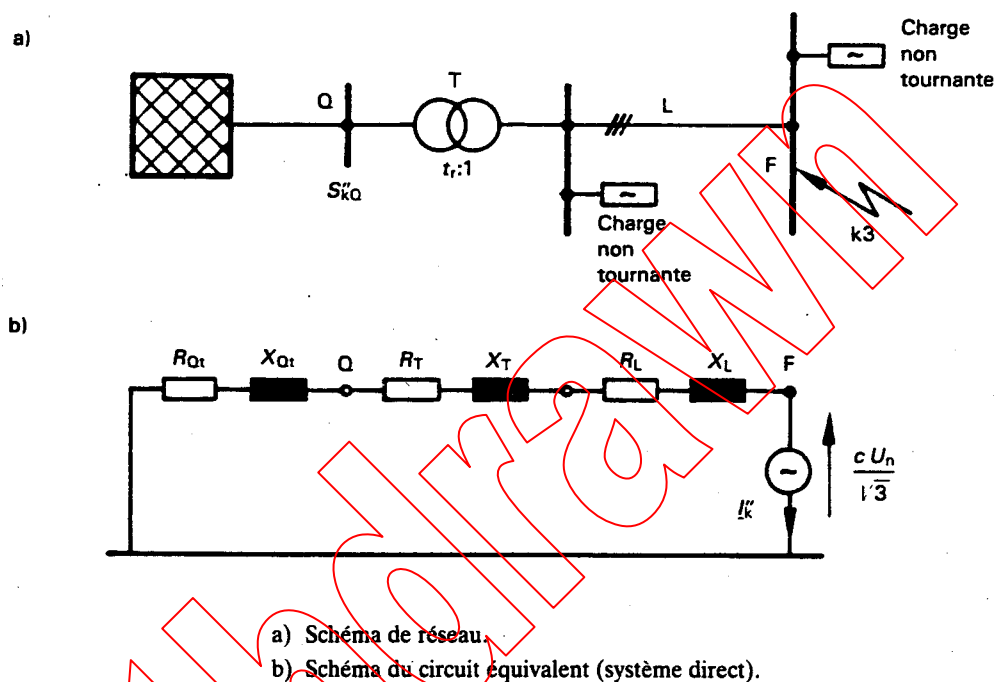


FIG. 3. - Illustration du calcul du courant de court-circuit symétrique initial I''_k suivant la procédure de la source de tension équivalente.

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.

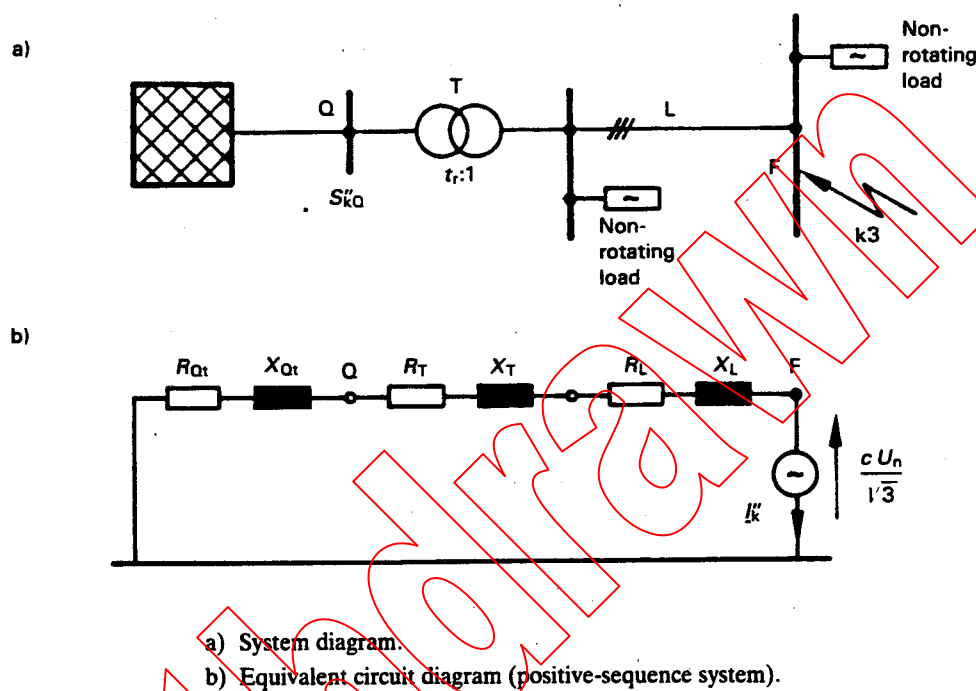


FIG. 3. – Illustration for calculating the initial symmetrical short-circuit current I''_k in compliance with the procedure for the equivalent voltage source.

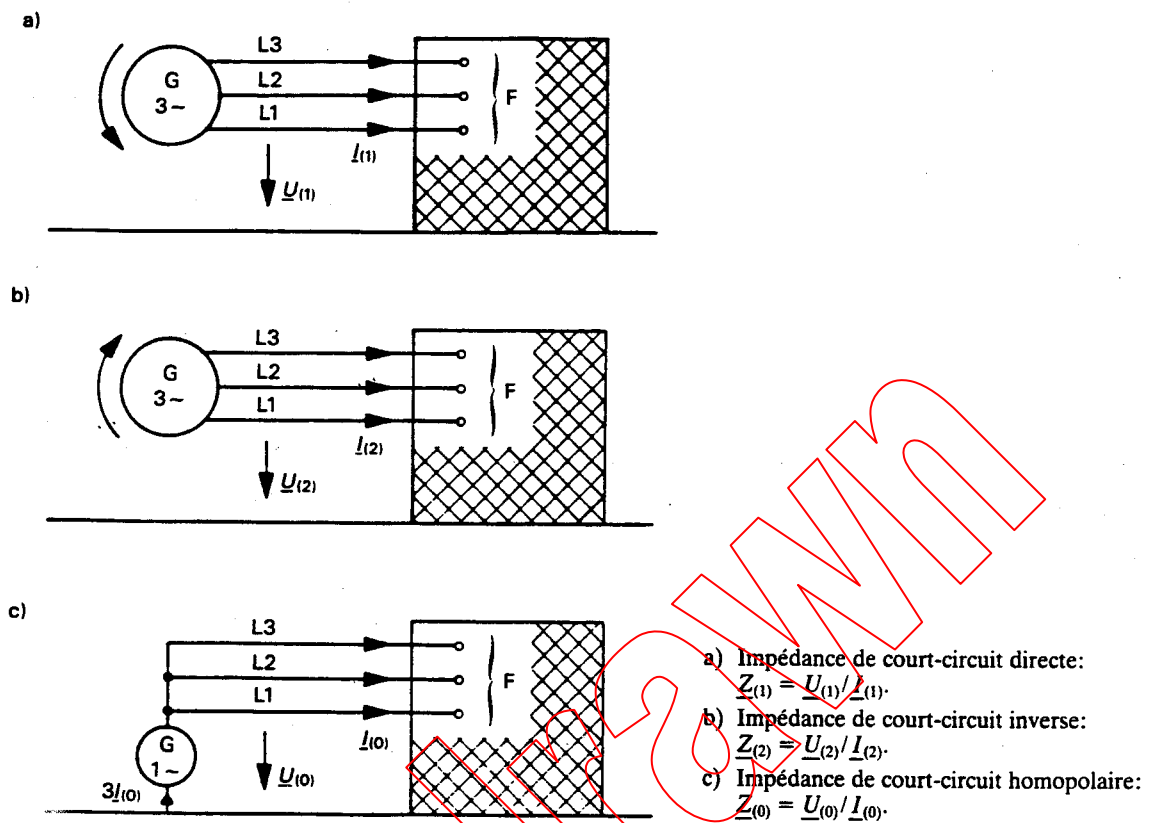


FIG. 4. — Impédance de court-circuit d'un réseau alternatif triphasé au point de défaut F.

TABLEAU I

Facteur de tension c

Tensions nominales U_n	Facteur de tension c 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.

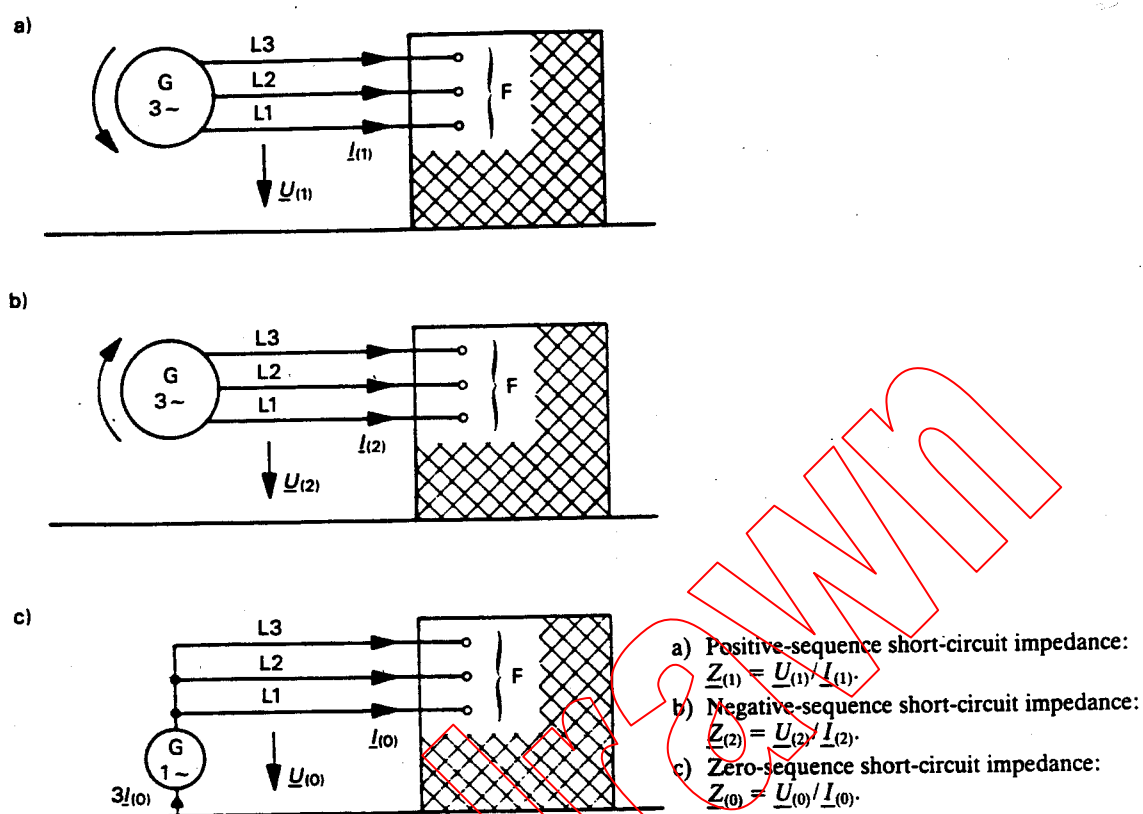


FIG. 4. — Short-circuit impedance of a three-phase a. c. system at the short-circuit location F.

TABLE I
Voltage factor c

Nominal voltage U_n	Voltage factor c 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 $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_k$ 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 $\underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)}$.

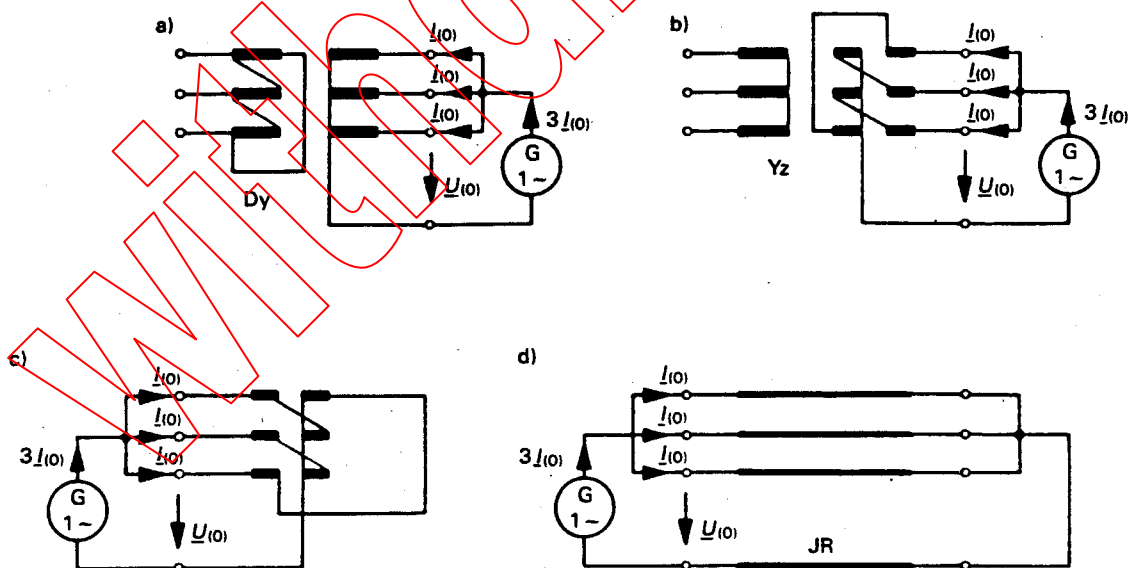
L'impédance de court-circuit homopolaire $\underline{Z}_{(0)}$ au point de défaut F s'obtient comme il est indiqué dans la figure 4c, page 26, une tension alternative étant appliquée entre les phases court-circuitées et les retours communs (par exemple réseau de terre, conducteur neutre, conducteurs 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 $Z_{(2)} = Z_{(1)}$.

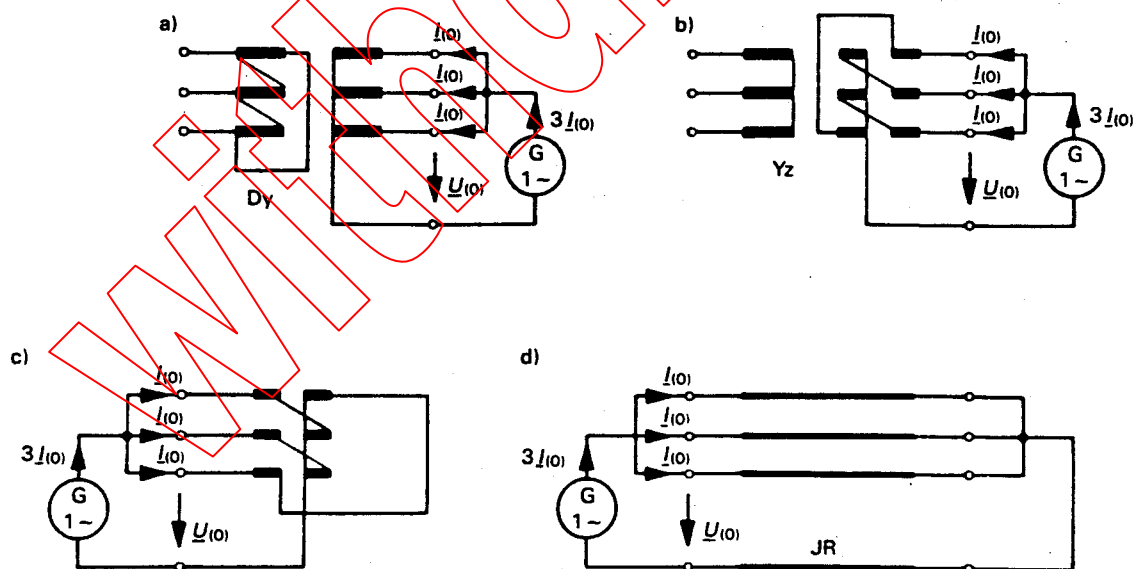
The zero-sequence short-circuit impedance $Z_{(0)}$ at the short-circuit location F is obtained according to Figure 4c, page 27, if an a.c. voltage is applied between the short-circuited lines and the common returns (e. g. earth system, neutral conductor, earth wires, cable sheaths, cable armouring).

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.



- a) Transformer of vector group Dy.
- b) Transformer of vector group Yz.
- c) Neutral-earthing transformer in zig-zag connection.
- d) 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 homopolaires 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:

$$Z_Q = \frac{c U_{nQ}^2}{S'_{kQ}} = \frac{c U_{nQ}}{\sqrt{3} I'_{kQ}} \quad (5a)$$

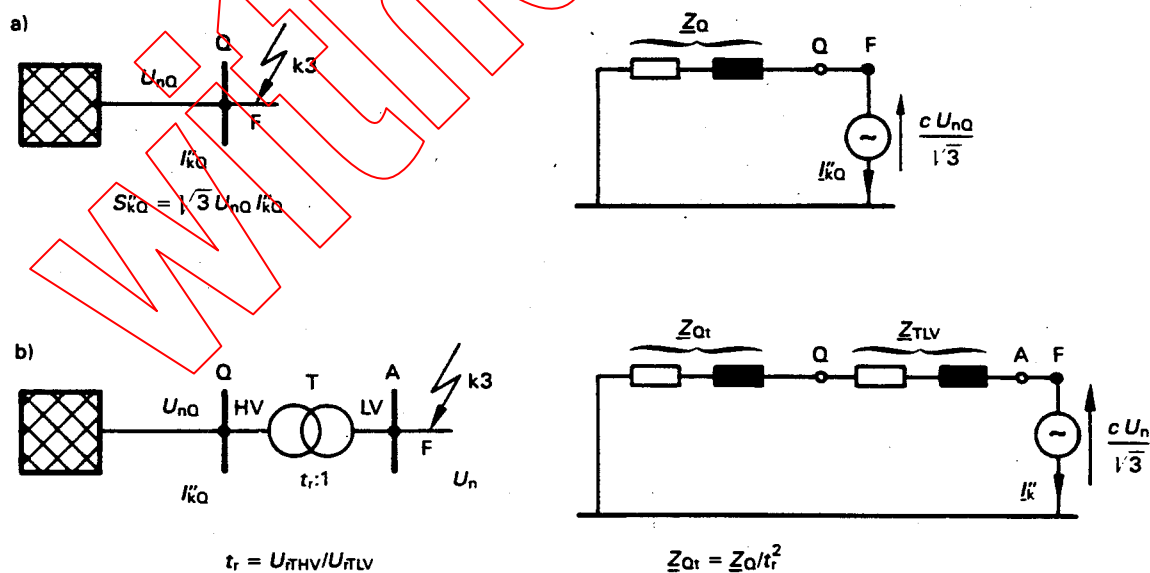


FIG. 6. — Schémas du réseau et d'alimentation des circuits équivalents.

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 armouring). 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:

$$Z_Q = \frac{c U_{nQ}^2}{S''_{kQ}} = \frac{c U_{nQ}}{\sqrt{3} I''_{kQ}} \quad (5a)$$

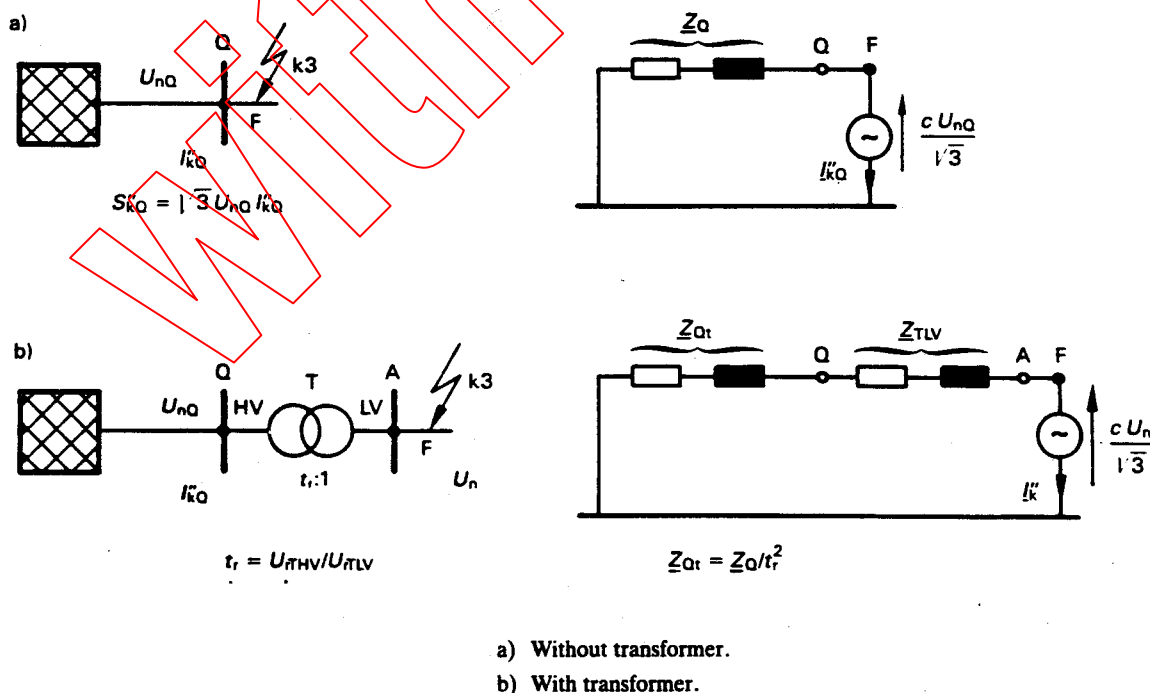


FIG. 6. — System diagram and equivalent circuit diagram for network feeders.

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:

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

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 homopolaire 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:

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

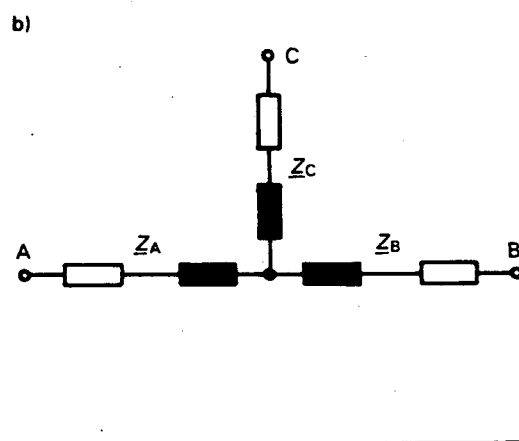
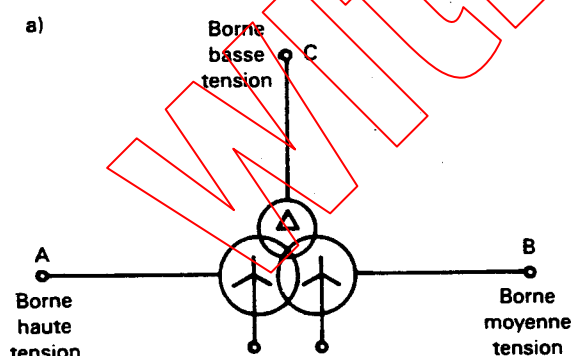
avec:

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

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

et

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



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 :

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

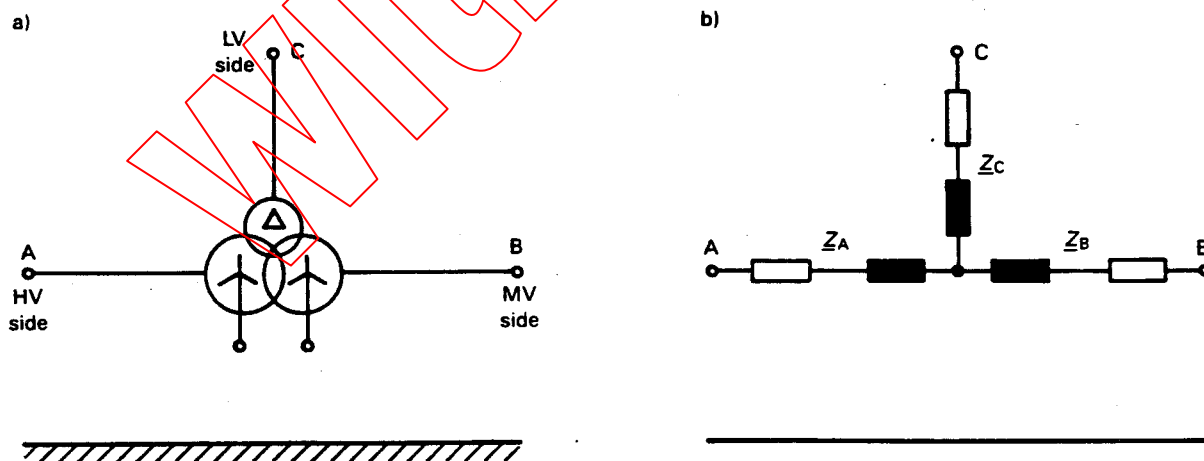
with:

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

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

and

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



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 $\sqrt[n]{nR^{n-1}}$, 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:

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

where:

ΣI_{rm} = 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)

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

$X_k = X_{Qt} + X_T + X_L$ = 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 $Z_{Qt} = R_{Qt} + jX_{Qt}$ 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)

$R_k = R_{Qt} + R_T + R_L$ = 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)

$X_k = X_{Qt} + X_T + X_L$ = 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 $Z_{Qt} = R_{Qt} + jX_{Qt}$, 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:

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

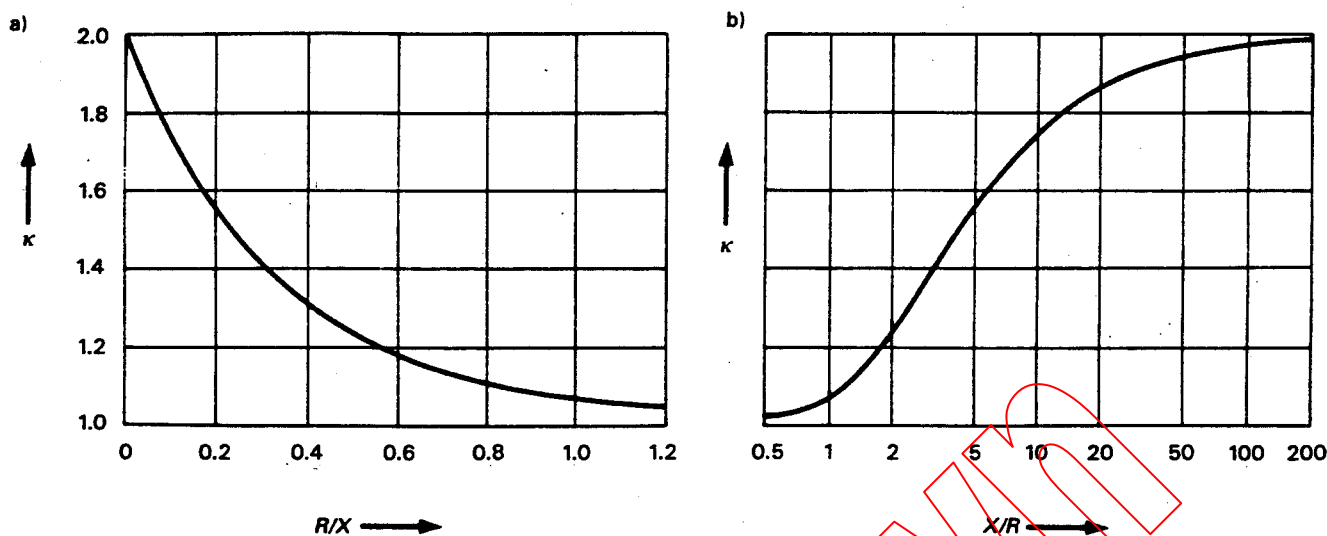


FIG. 8. — Facteur κ pour les circuits série en fonction:
a) du rapport R/X ; b) du rapport X/R .

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.

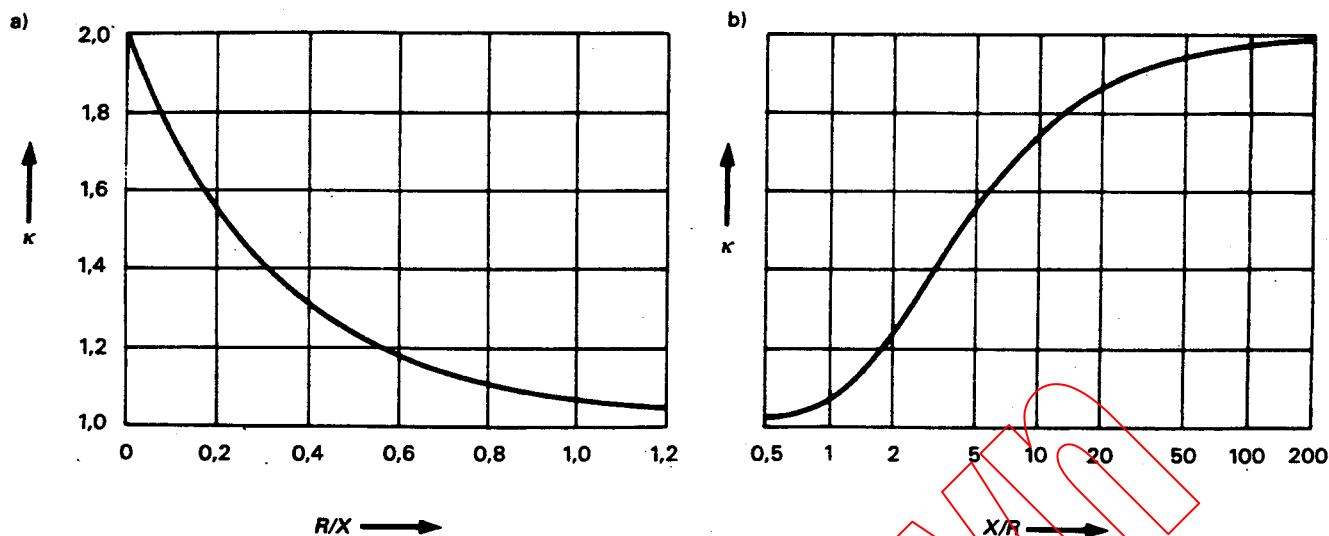


FIG. 8. — Factor κ for series circuits as a function of:
a) ratio R/X ; b) ratio X/R .

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:

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

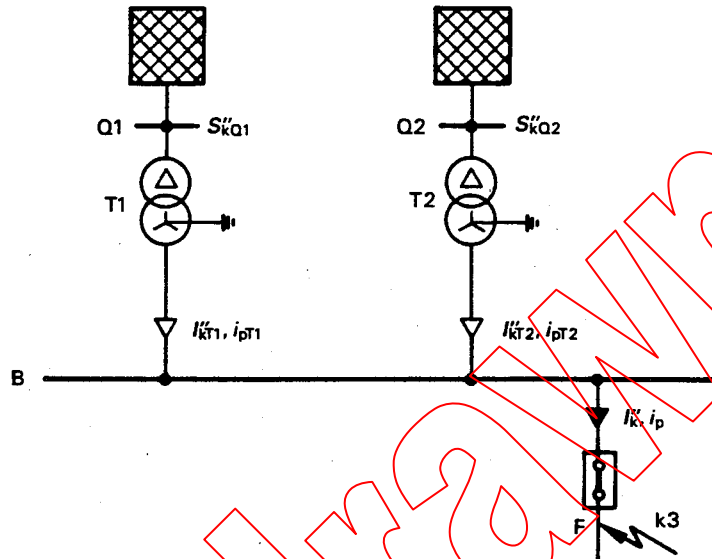


FIG. 9. — Schéma de réseau illustrant un court-circuit alimenté par plusieurs sources indépendantes les unes des autres. (Dans certains cas, l'impédance entre le jeu de barres B et le point de défaut F peut être négligée.)

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.

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

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).