

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

60909-3

Deuxième édition
Second edition
2003-09

**Courants de court-circuit dans les réseaux
triphasés à courant alternatif –**

Partie 3:

**Courants durant deux courts-circuits monophasés
simultanés séparés à la terre et courants de court-
circuit partiels s'écoulant à travers la terre**

**Short-circuit currents in three-phase
a.c. systems –**

Part 3:

**Currents during two separate simultaneous
line-to-earth short circuits and partial short-
circuit currents flowing through earth**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 60909-3:2003

Numérotation des publications

Depuis le 1er janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000. Ainsi, la CEI 34-1 devient la CEI 60034-1.

Editions consolidées

Les versions consolidées de certaines publications de la CEI incorporant les amendements sont disponibles. Par exemple, les numéros d'édition 1.0, 1.1 et 1.2 indiquent respectivement la publication de base, la publication de base incorporant l'amendement 1, et la publication de base incorporant les amendements 1 et 2.

Informations supplémentaires sur les publications de la CEI

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 cette publication, y compris sa validité, sont disponibles dans le Catalogue des publications de la CEI (voir ci-dessous) en plus des nouvelles éditions, amendements et corrigenda. Des informations sur les sujets à l'étude et l'avancement des travaux entrepris par le comité d'études qui a élaboré cette publication, ainsi que la liste des publications parues, sont également disponibles par l'intermédiaire de:

☞ **Site web de la CEI** (www.iec.ch)

☞ **Catalogue des publications de la CEI**

Le catalogue en ligne sur le site web de la CEI (www.iec.ch/searchpub) vous permet de faire des recherches en utilisant de nombreux critères, comprenant des recherches textuelles, par comité d'études ou date de publication. Des informations en ligne sont également disponibles sur les nouvelles publications, les publications remplacées ou retirées, ainsi que sur les corrigenda.

☞ **IEC Just Published**

Ce résumé des dernières publications parues (www.iec.ch/online_news/justpub) est aussi disponible par courrier électronique. Veuillez prendre contact avec le Service client (voir ci-dessous) pour plus d'informations.

☞ **Service clients**

Si vous avez des questions au sujet de cette publication ou avez besoin de renseignements supplémentaires, prenez contact avec le Service clients:

Email: custserv@iec.ch
Tél: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00

Publication numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series. For example, IEC 34-1 is now referred to as IEC 60034-1.

Consolidated editions

The IEC is now publishing consolidated versions of its publications. For example, edition numbers 1.0, 1.1 and 1.2 refer, respectively, to the base publication, the base publication incorporating amendment 1 and the base publication incorporating amendments 1 and 2.

Further information on IEC publications

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 this publication, including its validity, is available in the IEC Catalogue of publications (see below) in addition to new editions, amendments and corrigenda. Information on the subjects under consideration and work in progress undertaken by the technical committee which has prepared this publication, as well as the list of publications issued, is also available from the following:

☞ **IEC Web Site** (www.iec.ch)

☞ **Catalogue of IEC publications**

The on-line catalogue on the IEC web site (www.iec.ch/searchpub) enables you to search by a variety of criteria including text searches, technical committees and date of publication. On-line information is also available on recently issued publications, withdrawn and replaced publications, as well as corrigenda.

☞ **IEC Just Published**

This summary of recently issued publications (www.iec.ch/online_news/justpub) is also available by email. Please contact the Customer Service Centre (see below) for further information.

☞ **Customer Service Centre**

If you have any questions regarding this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre:

Email: custserv@iec.ch
Tel: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

60909-3

Deuxième édition
Second edition
2003-09

**Courants de court-circuit dans les réseaux
triphasés à courant alternatif –**

Partie 3:

**Courants durant deux courts-circuits monophasés
simultanés séparés à la terre et courants de court-
circuit partiels s'écoulant à travers la terre**

**Short-circuit currents in three-phase
a.c. systems –**

Part 3:

**Currents during two separate simultaneous
line-to-earth short circuits and partial short-
circuit currents flowing through earth**

© IEC 2003 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.

International Electrotechnical Commission, 3, rue de Varembé, PO Box 131, CH-1211 Geneva 20, Switzerland
Telephone: +41 22 919 02 11 Telefax: +41 22 919 03 00 E-mail: inmail@iec.ch Web: www.iec.ch



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission

CODE PRIX
PRICE CODE

V

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

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	6
1 Domaine d'application.....	10
2 Références normatives	12
3 Termes et définitions	12
4 Symboles.....	16
5 Courants durant deux courts-circuits monophasés simultanés séparés à la terre	18
5.1 Méthode de calcul	18
5.1.1 Courant de court-circuit symétrique initial	18
5.1.2 Valeur de crête du courant de court-circuit, courant de court-circuit symétrique coupé et courant de court-circuit permanent	22
5.1.3 Répartition des courants de courts-circuits à la terre pendant deux courants de courts-circuits monophasés simultanés séparés à la terre.....	22
6 Courants de court-circuit partiels s'écoulant à travers la terre dans le cas d'un court-circuit déséquilibré.....	24
6.1 Méthode de calcul	24
6.1.1 Généralités	24
6.1.2 Court-circuit monophasé à la terre dans un poste	24
6.1.3 Court-circuit monophasé à la terre en dehors du poste	28
6.1.4 Court-circuit monophasé au voisinage d'un poste	32
6.1.5 Facteur de réduction des lignes aériennes et des câbles	34
Annexe A (informative) Exemple de calcul de deux courts-circuits monophasés simultanés séparés à la terre	40
Annexe B (informative) Exemples de calcul des courants de courts-circuits partiels à travers la terre	44
Figure 1 – Impédance d'entrée Z_p d'une chaîne infinie, constituée par l'impédance du câble de garde $Z_W = Z'_W \cdot d_T$ et la résistance de pied des pylônes R_T séparées par des distances d_T entre pylônes identiques	14
Figure 2 – Impédance d'entrée Z_{pn} d'une chaîne finie de n pylônes, constituée par l'impédance du câble de garde $Z_W = Z'_W \cdot d_T$, et la résistance du pied des pylônes R_T avec des distances d_T entre pylônes identiques et l'impédance de terre Z_{EB} (Equation (28)) d'un poste B.....	16
Figure 3 – Représentation de deux courts-circuits monophasés simultanés séparés à la terre et du courant I_{kEE}''	18
Figure 4 – Courants de court-circuit partiels dans le cas d'un court-circuit monophasé à la terre dans le poste B	26
Figure 5 – Courants de court-circuit partiels dans le cas d'un court-circuit monophasé à la terre sur un pylône T d'une ligne aérienne.....	28
Figure 6 – Répartition du courant total de terre I_{Etot}	30
Figure 7 – Courants de court-circuit partiels dans le cas d'un court-circuit monophasé à la terre sur un pylône n d'une ligne aérienne au voisinage d'un poste B	32
Figure 8 – Valeur absolue r du facteur de réduction pour les câbles de garde non magnétiques en fonction de la résistivité ρ du sol	38

CONTENTS

FOREWORD	7
1 Scope	11
2 Normative reference	13
3 Terms and definitions	13
4 Symbols	17
5 Currents during two separate simultaneous line-to-earth short circuits	19
5.1 Calculation method	19
5.1.1 Initial symmetrical short-circuit current	19
5.1.2 Peak short-circuit current, symmetrical short-circuit breaking current and steady-state short-circuit current	23
5.1.3 Distribution of line-to-earth short-circuit currents during two separate simultaneous line-to-earth short circuits	23
6 Partial short-circuit currents flowing through earth in the case of an unbalanced short circuit	25
6.1 Calculation method	25
6.1.1 General	25
6.1.2 Line-to-earth short circuit in a station	25
6.1.3 Line-to-earth short circuit far outside a station	29
6.1.4 Line-to-earth short circuit in the vicinity of a station	33
6.1.5 Reduction factor for overhead lines and cables	35
Annex A (informative) Example for the calculation of two separate simultaneous line-to-earth short-circuit currents	41
Annex B (informative) Examples for the calculation of partial short-circuit currents through earth	45
Figure 1 – Driving point impedance Z_p of an infinite chain, composed of the earth-wire impedance $Z_W = Z'_W \cdot d_T$ and the footing resistance R_T of the towers, with equal distances d_T between towers	15
Figure 2 – Driving point impedance Z_{pn} of a finite chain with n towers, composed of the earth-wire impedance $Z_W = Z'_W \cdot d_T$, the footing resistance R_T of the towers with equal distances d_T between towers and the earthing impedance Z_{EB} (Equation (28)) of a station B	17
Figure 3 – Characterization of two separate simultaneous line-to-earth short circuits and the current I_{KEE}''	19
Figure 4 – Partial short-circuit currents in the case of a line-to-earth short circuit inside the station B	27
Figure 5 – Partial short-circuit currents in the case of a line-to-earth short circuit at tower T of an overhead line	29
Figure 6 – Distribution of the total earth current I_{Etot}	31
Figure 7 – Partial short-circuit currents in the case of a line-to-earth short circuit at tower n of an overhead line in the vicinity of station B	33
Figure 8 – The magnitude r of the reduction factor for non-magnetic earth wires in relation to soil resistivity ρ	39
Figure A.1 – Two separate simultaneous line-to-earth short circuits on a single fed radial line, see Table 1	41

Figure A.1 – Deux courts-circuits monophasés simultanés séparés à la terre sur une ligne alimentée en antenne, voir Tableau 1	40
Figure B.1 – Court-circuit monophasé à la terre dans le poste B – Schéma du réseau avec les postes A, B et C	46
Figure B.2 – Court-circuit monophasé à la terre dans le poste B – Systèmes direct, inverse et homopolaire avec les connexions à l'emplacement F du court-circuit à l'intérieur du poste B	46
Figure B.3 – Court-circuit monophasé à la terre en dehors des postes A, B et C, sur le pylône T d'une ligne aérienne – Schéma du réseau pour les postes A, B et C	50
Figure B.4 – Court-circuit monophasé à la terre en dehors des postes A, B et C sur le pylône T d'une ligne aérienne – Systèmes directs, inverse et homopolaire avec les connexions à l'emplacement F du court-circuit	52
Figure B.5 – Potentiel de terre $u_{ETn} = U_{ETn}/U_{ET}$ avec $U_{ET} = 1,912$ kV et $u_{EBn} = U_{EBn}/U_{EB}$ avec $U_{EB} = 0,972$ kV, si le court-circuit monophasé à la terre se produit sur les pylônes $n = 0, 1, 2, 3$, au voisinage du poste B conformément à 6.1.4 (voir l'exemple pour $n = 10$ à l'Article B.4)	62
Tableau 1 – Calcul des courants initiaux de courts-circuits monophasés à la terre dans les cas simples	22
Tableau 2 – Résistivité ρ et profondeur équivalente de pénétration dans la terre δ pour différents types de sol	34

Figure B.1 – Line-to-earth short circuit inside station B – System diagram for stations A, B and C	47
Figure B.2 – Line-to-earth short circuit inside station B – Positive-, negative- and zero-sequence systems with connections at the short-circuit location F	47
Figure B.3 – Line-to-earth short circuit outside stations A, B and C at tower T of an overhead line – System diagram for stations A, B and C.	51
Figure B.4 – Line-to-earth short circuit outside the stations A, B and C at tower T of an overhead line – Positive- negative- and zero-sequence systems with connections at the short-circuit location F	53
Figure B.5 – Earth potentials $u_{ETn} = U_{ETn}/U_{ET}$ with $U_{ET} = 1,912$ kV and $u_{EBn} = U_{EBn}/U_{EB}$ with $U_{EB} = 0,972$ kV, if the line-to-earth short circuit occurs at the towers $n = 0, 1, 2, 3$, in the vicinity of station B according to 6.1.4 (see the example for $n = 10$ in Clause B.4).	63
Table 1 – Calculation of initial line-to-earth short-circuit currents in simple cases.....	23
Table 2 – Resistivity ρ and equivalent earth penetration depth δ for different soil types.....	35

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

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

Partie 3: Courants durant deux courts-circuits monophasés simultanés séparés à la terre et courants de court-circuit partiels s'écoulant à travers la terre

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de la CEI"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de la CEI intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de la CEI se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de la CEI. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que la CEI s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; la CEI ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de la CEI dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de la CEI et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) La CEI n'a prévu aucune procédure de marquage valant indication d'approbation et n'engage pas sa responsabilité pour les équipements déclarés conformes à une de ses Publications.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à la CEI, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de la CEI, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de la CEI ou de toute autre Publication de la CEI, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de la CEI peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 60909-3 a été établie par le comité d'études 73 de la CEI: Courants de court-circuit.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition parue en 1995 dont elle constitue une révision technique.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

SHORT-CIRCUIT CURRENTS IN THREE-PHASE AC SYSTEMS –**Part 3: Currents during two separate simultaneous
line-to-earth short circuits and partial short-circuit currents
flowing through earth**

FOREWORD

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as "IEC Publication(s)"). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with an IEC Publication.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 60909-3 has been prepared by IEC technical committee 73: Short-circuit currents.

This second edition cancels and replaces the first edition published in 1995. This edition constitutes a technical revision.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
73/127/FDIS	73/128/RVD

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

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/CEI, Partie 2.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant 2008. A cette date, la publication sera

- reconduite;
- supprimée;
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60909-3:2003

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

FDIS	Voting report
73/127/FDIS	73/128/RVD

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

This publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 2.

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until 2008. At this date, the publication will be

- reconfirmed;
- withdrawn;
- replaced by a revised edition, or
- amended.

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

Partie 3: Courants durant deux courts-circuits monophasés simultanés séparés à la terre et courants de court-circuit partiels s'écoulant à travers la terre

1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 60909 spécifie les procédures applicables au calcul des valeurs présumées des courants de court-circuit lors d'un court-circuit déséquilibré dans les réseaux triphasés à haute tension à courant alternatif fonctionnant à une fréquence nominale de 50 Hz ou 60 Hz, c'est-à-dire:

- a) courants durant deux courts-circuits monophasés simultanés séparés à la terre dans les réseaux à neutre isolé ou mis à la terre par une bobine d'extinction;
- b) courants de court-circuit partiels s'écoulant à travers la terre, dans le cas d'un seul court-circuit monophasé à la terre dans les réseaux à neutre mis à la terre directement ou par une faible impédance.

Les courants calculés suivant ces procédures sont utilisés pour la détermination des tensions induites ou des tensions de contact ou de pas, et de la montée du potentiel de terre d'un poste (groupe de production, poste).

La présente norme ne couvre pas:

- a) les courants de court-circuit provoqués délibérément de façon contrôlée, comme dans les stations d'essai en court-circuit, ou
- b) les courants de court-circuit dans les installations électriques à bord des navires ou des avions, ou
- c) les défauts simples monophasés à la terre dans les réseaux à neutre isolé ou mis à la terre par une bobine d'extinction.

L'objet de la présente norme est d'établir des procédures pratiques et concises pour le calcul des courants de court-circuit à la terre durant deux courts-circuits monophasés simultanés séparés à la terre et des courants de court-circuit partiels s'écoulant à travers la terre, dans les installations électriques, donnant des résultats sûrs et d'une précision suffisante. Dans ce but, le courant est déterminé en utilisant une source de tension équivalente appliquée à l'emplacement du court-circuit, toutes les autres sources étant mises à zéro. La procédure est applicable à une détermination par des méthodes manuelles, par des simulations analogiques ou par le calcul numérique.

La présente norme constitue un complément à la CEI 60909-0. Pour les définitions, les symboles et les hypothèses de calcul en général, se reporter à cette publication. Seuls des éléments particuliers sont définis ou spécifiés dans le présent document. Ceci n'exclut pas l'utilisation de méthodes particulières, par exemple la méthode de superposition, adaptées à des circonstances particulières, si elles donnent au moins la même précision.

Comme indiqué dans la CEI 60909-0, les courants de court-circuit et leur paramètres peuvent aussi être déterminés par des essais du réseau.

Le calcul des paramètres de court-circuit sur la base des caractéristiques assignées du matériel électrique et de la disposition topologique du réseau présente l'avantage d'être possible aussi bien pour les réseaux existants que pour les réseaux au stade de la conception.

SHORT-CIRCUIT CURRENTS IN THREE-PHASE AC SYSTEMS –

Part 3: Currents during two separate simultaneous line-to-earth short circuits and partial short-circuit currents flowing through earth

1 Scope

This part of IEC 60909 specifies procedures for calculation of the prospective short-circuit currents with an unbalanced short circuit in high-voltage three-phase AC systems operating at nominal frequency 50 Hz or 60 Hz, i.e.

- a) currents during two separate simultaneous line-to-earth short circuits in isolated neutral or resonant earthed neutral systems;
- b) partial short-circuit currents flowing through earth in case of single line-to-earth short circuit in solidly earthed or low-impedance earthed neutral systems.

The currents calculated by these procedures are used when determining induced voltages or touch or step voltages and rise of earth potential at a station (power station or substation).

This standard does not cover:

- a) short-circuit currents deliberately created under controlled conditions as in short-circuit testing stations, or
- b) short-circuit currents in the electrical installations on board ships or aeroplanes, or
- c) single line-to-earth faults in isolated or resonant earthed systems.

The object of this standard is to establish practical and concise procedures for the calculation of line-to-earth short-circuit currents during two separate simultaneous line-to-earth short circuits and partial short-circuit currents through earth from electrical installations, leading to conservative results with sufficient accuracy. For this purpose, the current is determined by considering an equivalent voltage source applied at the short-circuit location with all other sources set to zero. The procedure is suitable for determination by manual methods or digital computation.

This standard is an addition to IEC 60909-0. General definitions, symbols and calculation assumptions refer to that publication. Special items only are defined or specified in this document. 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.

As stated in IEC 60909-0, short-circuit currents and their parameters may also be determined by system tests.

The calculation of the short-circuit parameters 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.

2 Références normatives

Les documents de référence suivants sont indispensables pour l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

CEI 60909-0:2001, *Courants de court-circuit dans les réseaux triphasés à courant alternatif – Partie 0: Calcul des courants*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions suivants s'appliquent.

3.1

deux courts-circuits monophasés simultanés séparés à la terre

courts-circuits monophasés à la terre se produisant simultanément en des emplacements distincts et sur des phases distinctes d'un réseau triphasé à courant alternatif dont le neutre est isolé ou mis à la terre par une bobine d'extinction

3.2

courants de court-circuit initiaux durant deux courts-circuits monophasés simultanés séparés à la terre I_{kEE}''

valeur efficace des courants de court-circuit initiaux circulant avec la même amplitude aux deux emplacements, au moment des deux courts-circuits monophasés simultanés séparés à la terre.

3.3

courant à la terre total I_{Etot} à l'emplacement du court-circuit

valeur efficace du courant total de terre à l'emplacement du court-circuit circulant par l'impédance de terre d'un poste (centrale, ou sous station) ou la résistance de pied d'un pylône de ligne aérienne loin d'un poste et par les conducteurs mis à la terre (Figures 4 et 5). Ces conducteurs peuvent être des câbles de garde de lignes aériennes ou des gaines, des écrans ou des armures de câble

3.4

courant à la terre I_{En}

valeur efficace du courant de terre ramenant au potentiel de la terre un pylône de ligne aérienne n au voisinage d'un poste

3.5

courant à la terre I_{EBn}

valeur efficace du courant de terre ramenant au potentiel de terre U_{EBn} un poste B, dans le cas d'un court-circuit monophasé à la terre sur un pylône de ligne aérienne n au voisinage d'un poste B

3.6

courant de court-circuit partiel à travers la terre $r \cdot 3I_{(0)}$

la fraction du courant total s'écoulant à la terre à une certaine distance de l'emplacement du court-circuit et du réseau de terre d'un poste, où la répartition du courant total entre les conducteurs mis à la terre et la terre est presque constante. Son amplitude dépend du facteur de réduction r

2 Normative reference

The following referenced documents are indispensable for the application of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60909-0:2001, *Short-circuit currents in three-phase a.c. systems – Part 0: Calculation of currents*

3 Terms and definitions

For the purposes of this standard, the following definitions apply.

3.1

two separate simultaneous line-to-earth short circuits

line-to-earth short circuits at different locations at the same time on different conductors of a three-phase AC system having a resonant earthed or an isolated neutral.

3.2

initial short-circuit currents during two separate simultaneous line-to-earth short circuits I''_{KEE}

r.m.s. value of the initial short-circuit currents flowing with the same magnitude at both locations at the instant of the two separate simultaneous line-to-earth short circuits.

3.3

total earth current I_{Etot} at the short-circuit location

r.m.s. value of the earth current at the short-circuit location flowing through the earthing system of a station (power station or substation) or the footing resistance of an overhead line tower far away from a station and through earthed conductors to earth (Figures 4 and 5). Such conductors may be earth wires of over-head lines or sheaths, shielding or armouring of cables.

3.4

earth current I_{ETn}

r.m.s. value of the earth current causing the potential to rise above earth at an overhead line tower n in the vicinity of a station

3.5

earth current I_{EBn}

r.m.s. value of the earth current causing the potential to rise above earth U_{EBn} of station B, in case of a line-to-earth short circuit at an overhead line tower n in the vicinity of the station B

3.6

partial short-circuit current through earth $\underline{r} \cdot 3I_{(0)}$

part of the total current flowing through earth remote from the short-circuit location and the earthing system of a station, where the distribution of the total current between earthed conductors and earth is nearly constant. Its magnitude depends on the reduction factor $\underline{r}$.

3.7

facteur de réduction r

facteur qui détermine la fraction du courant homopolaire s'écoulant par la terre à une certaine distance de l'emplacement du court-circuit et du réseau de terre d'un poste

3.8

impédance d'entrée Z_P d'une chaîne infinie

dans le cas d'une ligne aérienne, conformément à la Figure 1, impédance d'entrée constituée de l'impédance du câble de garde $Z_W = Z'_W \cdot d_T$ entre deux pylônes avec retour par la terre et de la résistance de pied de pylône R_T des pylônes de la ligne aérienne:

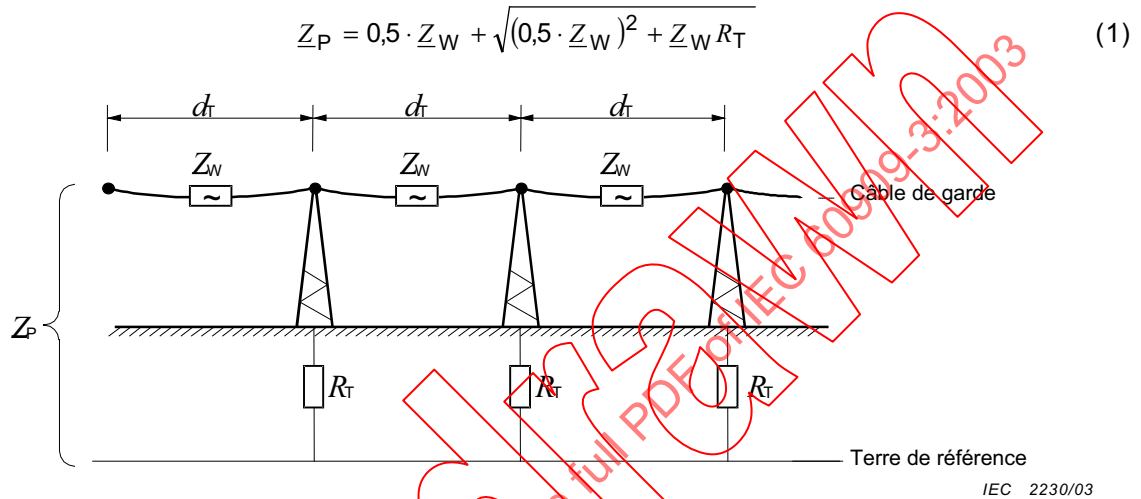


Figure 1 – Impédance d'entrée Z_P d'une chaîne infinie, constituée par l'impédance du câble de garde $Z_W = Z'_W \cdot d_T$ et la résistance de pied des pylônes R_T séparées par des distances d_T entre pylônes identiques

L'impédance d'entrée Z_P peut être supposée constante à une certaine distance de l'emplacement du court-circuit F et plus élevée qu'à la distance du pylône éloigné du poste D_F définie par l'Equation (18).

Dans le cas de câbles d'énergie, une approche similaire peut être utilisée, mais des précautions particulières sont nécessaires.

3.9

impédance d'entrée Z_{Pn} d'une chaîne finie

l'impédance d'entrée Z_{Pn} d'une ligne aérienne, avec n pylônes comme indiqué en Figure 2 et avec une impédance de terre Z_{EB} d'un poste B placé en bout peut être calculée conformément à l'Equation (2):

$$Z_{Pn} = \frac{Z_P (Z_{EB} + Z_P) \cdot k^n + [Z_P (Z_{EB} - Z_P + 2 \cdot Z_W) - Z_W (Z_{EB} + Z_W)] \cdot k^{-n}}{(Z_{EB} + Z_P) \cdot k^n - (Z_{EB} - Z_P + Z_W) \cdot k^{-n}} \quad (2)$$

avec

$$k = 1 + Z_W \left(\frac{R_T}{Z_P} + \frac{1}{Z_P} \right) \quad (3)$$

NOTE Pour $n \rightarrow \infty$, l'Equation (2) conduit à l'Equation (1). En pratique ceci est déjà vrai pour $n \approx 10 \dots 15$.

3.7

reduction factor r

factor which determines the part of the zero-sequence current flowing through earth remote from the short-circuit location and the earthing system of a station.

3.8

driving point impedance Z_P of an infinite chain

in the case of an overhead line, the driving point impedance, according to Figure 1, is composed of the earth-wire impedance $Z_W = Z'_W \cdot d_T$ between two towers with earth return and the footing resistance R_T of the overhead line towers:

$$Z_P = 0,5 \cdot Z_W + \sqrt{(0,5 \cdot Z_W)^2 + Z_W R_T} \quad (1)$$

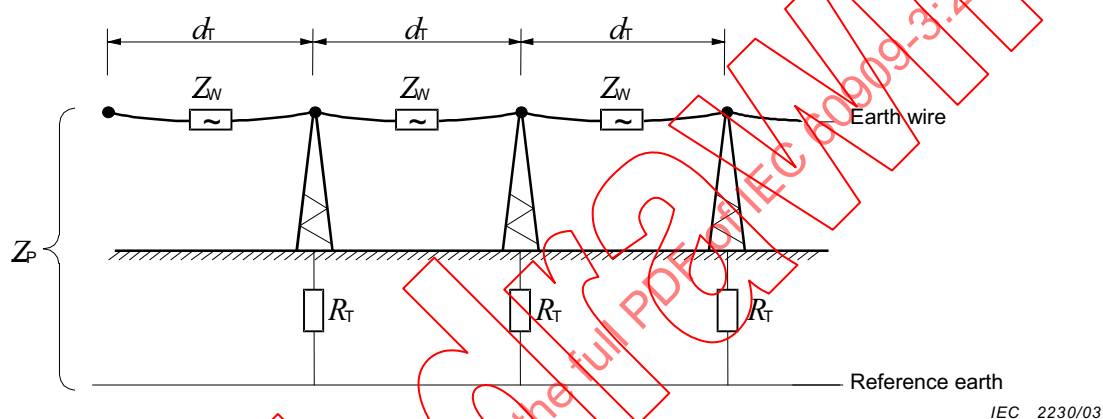


Figure 1 – Driving point impedance Z_P of an infinite chain, composed of the earth-wire impedance $Z_W = Z'_W \cdot d_T$ and the footing resistance R_T of the towers, with equal distances d_T between towers

The driving point impedance Z_P can be assumed constant at a distance from the short-circuit location F longer than the far-from-station distance D_F defined by Equation (18).

In the case of power cables, a similar approach may be used, but special considerations are necessary.

3.9

driving point impedance Z_{Pn} of a finite chain

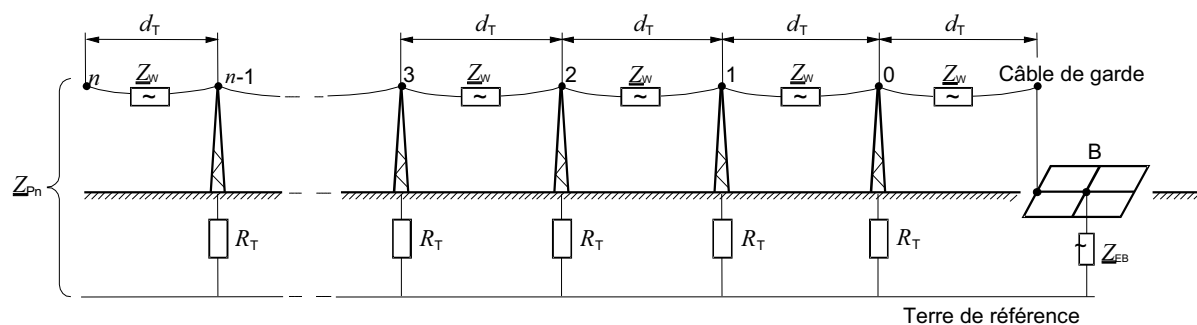
driving point impedance Z_{Pn} of an overhead line, with n towers as given in Figure 2 and with the earth impedance Z_{EB} of a station B at the end, can be calculated according to Equation (2):

$$Z_{Pn} = \frac{\left(\frac{Z_{Pn}}{Z_{EB}} + Z_P \right) \cdot k^n + \left(\frac{Z_{Pn}}{Z_{EB}} - Z_P + 2 \cdot Z_W \right) \cdot \left(\frac{Z_{Pn}}{Z_{EB}} + Z_W \right) \cdot k^{-n}}{\left(Z_{EB} + Z_P \right) \cdot k^n - \left(\frac{Z_{Pn}}{Z_{EB}} - Z_P + Z_W \right) \cdot k^{-n}} \quad (2)$$

with

$$k = 1 + \frac{Z_W}{Z_P} + \frac{1}{Z_P} \quad (3)$$

NOTE For $n \rightarrow \infty$, Equation (2) is leading to Equation (1). In practical cases, this is already true for $n \approx 10 \dots 15$.



IEC 2231/03

Figure 2 – Impédance d'entrée $\underline{Z}_{Pn}$ d'une chaîne finie de n pylônes, constituée par l'impédance du câble de garde $\underline{Z}_W = \underline{Z}'_W \cdot d_T$, et la résistance du pied des pylônes R_T avec des distances d_T entre pylônes identiques et l'impédance de terre $\underline{Z}_{EB}$ (Equation (28)) d'un poste B

4 Symboles

Toutes les équations sont des équations quantitatives dans lesquelles les symboles représentent des grandeurs physiques comportant à la fois des valeurs numériques et des dimensions. Les symboles de grandeurs complexes sont soulignés, par exemple $\underline{Z} = R + jX$.

c	Facteur de tension selon le Tableau 1 de la CEI 60909-0
$cU_n/\sqrt{3}$	Source de tension équivalente, voir la CEI 60909-0
D_F	Distance du pylône éloigné du poste
d_T	Distance entre pylônes
I_{bEE}	Courant de court-circuit coupé dans le cas de deux courts-circuits monophasés simultanés séparés à la terre
I_{Etot}	Courant de terre total à l'emplacement du court-circuit
I_{ETn}	Courant de terre au pylône court-circuité à proximité d'une station
$\underline{I}_{k1}''$	Courant de court-circuit monophasé à la terre initial
$\underline{I}_{kEE}''$	Courant de court-circuit initial dans le cas de deux courts-circuits monophasés simultanés séparés à la terre
$\underline{I}_{kE2E}''$	Courant de court-circuit initial s'écoulant par la terre dans le cas d'un court-circuit biphasé à la terre, voir la CEI 60909-0
I_W	Courant câble de garde
i_{pEE}	Valeur de crête du courant de court-circuit dans le cas de deux courts-circuits monophasés simultanés séparés à la terre
I_T	Courant de court-circuit dans le pylône
$\underline{M}_{(1)}, \underline{M}_{(2)}$	Impédance de couplage du système respectivement directe et inverse
$\underline{R}_E$	Résistance du réseau de terre
$\underline{R}_T$	Résistance de pied d'un pylône de ligne aérienne
r	Facteur de réduction
$r\mathbf{\bar{3}}I_{(0)}\vec{O}$	Courant de court-circuit partiel dans la terre à une distance supérieure à D_F
$\underline{Z}_{(1)A}, \underline{Z}_{(1)B}$	Impédance de court-circuit directe du réseau triphasé à courant alternatif aux emplacements de court-circuit A et B

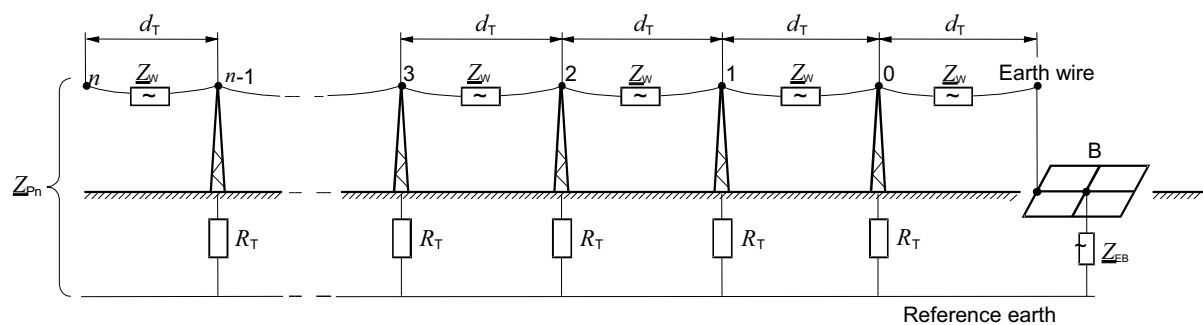


Figure 2 – Driving point impedance $\underline{Z}_{Pn}$ of a finite chain with n towers, composed of the earth-wire impedance $\underline{Z}_W = \underline{Z}'_W \cdot d_T$, the footing resistance R_T of the towers with equal distances d_T between towers and the earthing impedance $\underline{Z}_{EB}$ (Equation (28)) of a station B

4 Symbols

All equations are written as quantity equations, in which the symbols represent physical quantities possessing both numerical values and dimensions. Symbols of complex quantities are underlined, e.g. $\underline{Z} = R + jX$.

c	Voltage factor according to Table 1 of IEC 60909-0
$cU_n/\sqrt{3}$	Equivalent voltage source, see IEC 60909-0
D_F	Far-from-station distance
d_T	Distance between towers
I_{bEE}	Short-circuit breaking current in the case of two separate simultaneous line-to-earth short circuits
I_{Etot}	Total earth current at the short-circuit location
I_{ETn}	Earth current at the short-circuited tower in the vicinity of a station
I''_{kl}	Initial line-to-earth short-circuit current
I''_{kEE}	Initial short-circuit current in the case of two separate simultaneous line-to-earth short circuits
I''_{kE2E}	Initial short-circuit current flowing to earth in the case of a line-to-line short circuit with earth connection, see IEC 60909-0
I_W	Earth wire current
i_{pEE}	Peak short-circuit current in the case of two separate simultaneous line-to-earth short circuits
I_T	Short-circuit current through the tower
$\underline{M}_{(1)}, \underline{M}_{(2)}$	Coupling impedance, in the positive- and negative-sequence system
R_E	Resistance of earth grid
R_T	Footing resistance of an overhead line tower
r	Reduction factor
$r\dot{3}I_{(0)\bar{0}}$	Partial short-circuit current through earth at a distance longer than D_F
$\underline{Z}_{(1)A}, \underline{Z}_{(1)B}$	Positive-sequence short-circuit impedance of the three-phase AC system at the short-circuit locations A and B

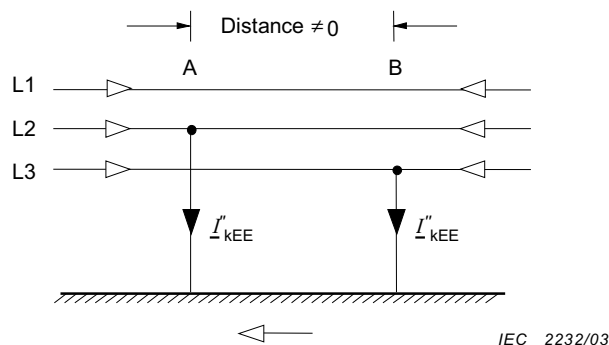
$Z_{(2)A}, Z_{(2)B}$	Impédance de court-circuit inverse du réseau triphasé à courant alternatif aux emplacements de court-circuit A et B
$Z_{(0)}$	Impédance de court-circuit homopolaire du réseau complet entre les emplacements de court-circuit A et B (les admittances entre phases et terre sont négligées)
Z_E	Impédance de mise à la terre d'un poste conformément à l'Equation (28)
Z_{ET}	Impédance de mise à la terre du pylône court-circuité conformément à l'Equation (27)
Z_{Etot}	Impédance totale de mise à la terre d'un poste conformément à l'Equation (16)
Z_{ETot}	Impédance totale de mise à la terre du pylône court-circuité conformément à l'Equation (21)
Z_P	Impédance d'entrée d'une chaîne infinie (Equation (1) et Figure 1)
Z_{Pn}	Impédance d'entrée d'une chaîne finie (Equation (2) et Figure 2)
Z_U	Impédance d'entrée des gaines, écrans ou armures de câble
$Z_W = Z'_W \cdot d_T$	Impédance du câble de garde entre deux pylônes
Z'_W	Impédance linéique du câble de garde avec retour par la terre
Z'_{WL}	Impédance mutuelle linéique entre le câble de garde et les conducteurs de phase parallèles, avec retour commun par la terre
δ	Profondeur équivalente de pénétration dans la terre
ρ	Résistivité du sol

5 Courants durant deux courts-circuits monophasés simultanés séparés à la terre

5.1 Méthode de calcul

5.1.1 Courant de court-circuit symétrique initial

La Figure 3 montre les courants de court-circuit I''_{KEE} dans le cas de deux courts-circuits monophasés simultanés séparés à la terre dans des phases distinctes aux emplacements A et B séparés par une distance non nulle, c'est-à-dire distance $\neq 0$. Il est supposé que les emplacements A et B sont loin des postes.



NOTE La direction des courants est choisie arbitrairement.

Figure 3 – Représentation de deux courts-circuits monophasés simultanés séparés à la terre et du courant I''_{KEE}

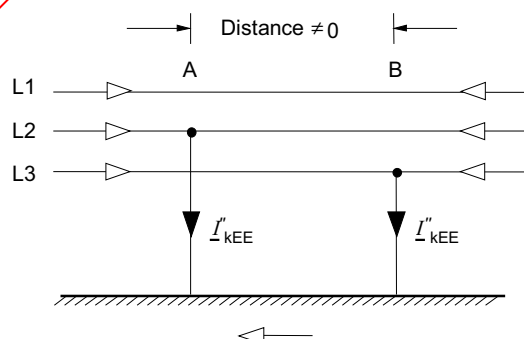
$Z_{(2)A}, Z_{(2)B}$	Negative-sequence short-circuit impedance of the three-phase AC system at the short-circuit locations A and B
$Z_{(0)}$	Zero-sequence short-circuit impedance of the entire network between the short-circuit locations A and B (admittances between line conductors and earth are disregarded)
Z_E	Earthing impedance of a station according to Equation (28)
Z_{ET}	Earthing impedance of the short circuited tower according to Equation (27)
Z_{Etot}	Total earthing impedance of a station according to Equation (16)
Z_{ETtot}	Total earthing impedance of the short circuited tower according to Equation (21)
Z_P	Driving point impedance of an infinite chain (Equation (1) and Figure 1)
Z_{Pn}	Driving point impedance of a finite chain (Equation (2) and Figure 2)
Z_U	Input impedance of sheaths, shielding or armouring of cables
$Z_W = Z'_W \cdot d_T$	Earth-wire impedance between two towers
Z'_W	Per unit length earth-wire impedance with earth return
Z'_{WL}	Per unit length mutual impedance between earth wires and the line conductors with common earth return
δ	Equivalent earth penetration depth
ρ	Soil resistivity

5 Currents during two separate simultaneous line-to-earth short circuits

5.1 Calculation method

5.1.1 Initial symmetrical short-circuit current

Figure 3 shows the short-circuit current I''_{KEE} during two separate simultaneous line-to-earth short circuits on different line conductors at the locations A and B with finite distance between them, i.e. distance $\neq 0$. It is assumed that the locations A and B are far from stations.



NOTE The direction of current is chosen arbitrarily.

IEC 2232/03

Figure 3 – Characterization of two separate simultaneous line-to-earth short circuits and the current I''_{KEE}

Dans les réseaux à neutre isolé ou mis à la terre par une bobine d'extinction, le courant de court-circuit symétrique initial I_{kEE}'' est calculé à l'aide de

$$I_{kEE}'' = \frac{3cU_n}{\left| \underline{Z}_{(1)A} + \underline{Z}_{(2)A} + \underline{Z}_{(1)B} + \underline{Z}_{(2)B} + \underline{M}_{(1)} + \underline{M}_{(2)} + \underline{Z}_{(0)} \right|} \quad (4)$$

NOTE Pour la résolution de l'Equation (4) voir les directives CCITT – *Directives concernant la protection des lignes de télécommunication contre les effets préjudiciable des lignes électriques et des chemin des fers électrifiés*, Volume V: *Courants et tensions inducteurs dans les systèmes de transport et de distribution d'énergie*. Genève 1999.

Dans le cas d'un court-circuit éloigné d'un alternateur, pour lequel $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$ et $\underline{M}_{(1)} = \underline{M}_{(2)}$, le courant de court-circuit initial devient

$$I_{kEE}'' = \frac{3cU_n}{\left| 2\underline{Z}_{(1)A} + 2\underline{Z}_{(1)B} + 2\underline{M}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)} \right|} \quad (5)$$

5.1.1.1 Détermination de $\underline{M}_{(1)}$ et $\underline{M}_{(2)}$

Les impédances de couplage directe et inverse, $\underline{M}_{(1)}$ et $\underline{M}_{(2)}$ sont déterminées comme ci-après:

Une tension $\underline{U}_A$ est introduite à l'emplacement du court-circuit A comme la seule tension active du réseau. Si $\underline{I}_{(1)A}$ et $\underline{I}_{(2)A}$ sont les courants dus à cette source de tension dans les systèmes direct et inverse au point de court-circuit A et si $\underline{U}_{(1)B}$ et $\underline{U}_{(2)B}$ sont les tensions résultantes dans les systèmes direct et inverse au point B, alors

$$\underline{M}_{(1)} = \frac{\underline{U}_{(1)B}}{\underline{I}_{(1)A}} \quad \underline{M}_{(2)} = \frac{\underline{U}_{(2)B}}{\underline{I}_{(2)A}} \quad (6)$$

Les impédances de couplage $\underline{M}_{(1)}$ et $\underline{M}_{(2)}$ peuvent aussi être déterminées au point de court-circuit B au lieu du point A à l'aide de

$$\underline{M}_{(1)} = \frac{\underline{U}_{(1)A}}{\underline{I}_{(1)B}} \quad \underline{M}_{(2)} = \frac{\underline{U}_{(2)A}}{\underline{I}_{(2)B}} \quad (7)$$

5.1.1.2 Exemples simples de deux courts-circuits monophasés simultanés séparés à la terre

Dans des cas simples les courants de deux courts-circuits monophasés simultanés séparés à la terre peuvent être calculés comme indiqué dans le Tableau 1, à condition d'admettre que $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$ et que $\underline{M}_{(1)} = \underline{M}_{(2)}$. Avec cette hypothèse, les Equations (8) à (10), données dans le Tableau 1, sont déduites de l'Equation (5). Les indices des Equations (8) à (10) se rapportent aux impédances appropriées dans les circuits correspondants.

In systems with isolated neutral or with resonant earthed neutral the initial symmetrical short-circuit current I_{kEE}'' is calculated using

$$I_{kEE}'' = \frac{3cU_n}{\left| \underline{Z}_{(1)A} + \underline{Z}_{(2)A} + \underline{Z}_{(1)B} + \underline{Z}_{(2)B} + \underline{M}_{(1)} + \underline{M}_{(2)} + \underline{Z}_{(0)} \right|} \quad (4)$$

NOTE For derivation of Equation (4) see CCITT – *Directives concerning protection of telecommunication lines against harmful effects from electric power and electrified railway lines, Volume V: Inducing currents and voltages in power transmission and distribution systems*. Geneva 1999.

In the case of a far-from-generator short circuit, where $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$ and $\underline{M}_{(1)} = \underline{M}_{(2)}$, the initial short-circuit current becomes

$$I_{kEE}'' = \frac{3cU_n}{\left| 2\underline{Z}_{(1)A} + 2\underline{Z}_{(1)B} + 2\underline{M}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)} \right|} \quad (5)$$

5.1.1.1 Determination of $\underline{M}_{(1)}$ and $\underline{M}_{(2)}$

The positive- and negative-sequence coupling impedances $\underline{M}_{(1)}$ and $\underline{M}_{(2)}$ are determined as follows:

A voltage source $\underline{U}_A$ is introduced at the short-circuit location A as the only active voltage of the system. If $\underline{I}_{(1)A}$ and $\underline{I}_{(2)A}$ are the currents due to this voltage source in the positive- and negative- sequence systems at the short-circuit location A and if $\underline{U}_{(1)B}$ and $\underline{U}_{(2)B}$ are the resulting voltages in the positive- and negative-sequence systems at the location B, then

$$\underline{M}_{(1)} = \frac{\underline{U}_{(1)B}}{\underline{I}_{(1)A}} \quad \underline{M}_{(2)} = \frac{\underline{U}_{(2)B}}{\underline{I}_{(2)A}} \quad (6)$$

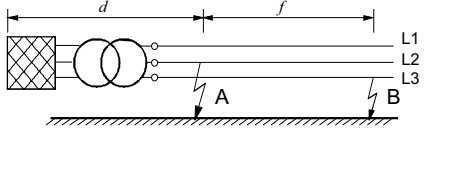
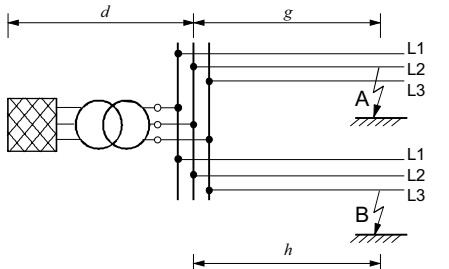
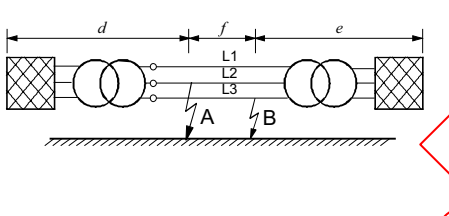
The coupling impedances $\underline{M}_{(1)}$ and $\underline{M}_{(2)}$ may also be determined at the short-circuit location B instead of the location A by using

$$\underline{M}_{(1)} = \frac{\underline{U}_{(1)A}}{\underline{I}_{(1)B}} \quad \underline{M}_{(2)} = \frac{\underline{U}_{(2)A}}{\underline{I}_{(2)B}} \quad (7)$$

5.1.1.2 Simple cases of two separate simultaneous line-to-earth short circuits

In simple cases, the two separate simultaneous line-to-earth short-circuit currents can be calculated as shown in Table 1 provided it is presumed that $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$ and $\underline{M}_{(1)} = \underline{M}_{(2)}$. With this presumption Equations (8) to (10), shown in Table 1, are derived from Equation (5). The indices in Equations (8) to (10) refer to the relevant impedances in the respective circuits.

Tableau 1 – Calcul des courants initiaux de courts-circuits monophasés à la terre dans les cas simples

a)		ligne alimentée en antenne $I_{kEE}'' = \frac{3cU_n}{ 6Z_{(1)d} + 2Z_{(1)f} + Z_{(0)f} } \quad (8)$
b)		deux lignes alimentées en antenne $I_{kEE}'' = \frac{3cU_n}{ 6Z_{(1)d} + 2(Z_{(1)g} + Z_{(1)h}) + Z_{(0)g} + Z_{(0)h} } \quad (9)$
c)		ligne à double alimentation $I_{kEE}'' = \frac{3cU_n}{ 6Z_{(1)d}Z_{(1)e} + 2Z_{(1)f}(Z_{(1)d} + Z_{(1)e}) + Z_{(0)f} } \quad (10)$
Le facteur de tension c doit être pris dans le Tableau 1 de la CEI 60909-0.		

5.1.2 Valeur de crête du courant de court-circuit, courant de court-circuit symétrique coupé et courant de court-circuit permanent

La valeur de crête du courant de court-circuit est calculée conformément à la CEI 60909-0 à l'aide de

$$i_{pEE} = \kappa \sqrt{2} I_{kEE}'' \quad (11)$$

Pour le facteur κ , la valeur à utiliser est la même que dans le cas d'un court-circuit triphasé aux emplacements A ou B, en prenant la valeur la plus élevée.

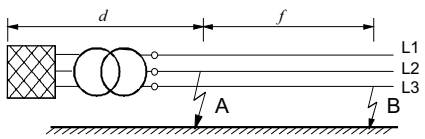
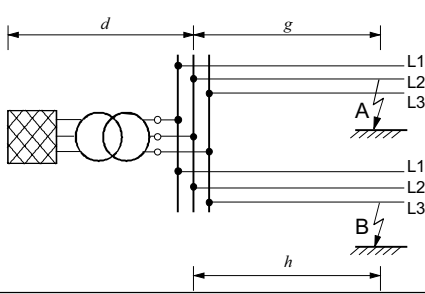
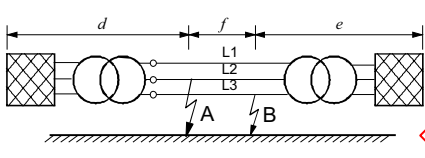
Si les courts-circuits monophasés à la terre peuvent être assimilés à un court-circuit éloigné d'un alternateur, alors

$$I_{kEE} = I_{bEE} = I_{kEE}'' \quad (12)$$

5.1.3 Répartition des courants de courts-circuits à la terre pendant deux courants de courts-circuits monophasés simultanés séparés à la terre

Si deux courts-circuits monophasés à la terre se produisent aux emplacements A et B, la répartition du courant à travers la terre peut être calculée en admettant que $r^{-3}I_{(0)} = r^{-1}I_{kEE}''$ est la seule source active de courant alimentant le système homopolaire en A et B; toutes les autres sources sont négligées.

Table 1 – Calculation of initial line-to-earth short-circuit currents in simple cases

a)		Single-fed radial line $I_{kEE}'' = \frac{3cU_n}{ 6Z_{-(1)d} + 2Z_{-(1)f} + Z_{-(0)f} } \quad (8)$
b)		Two single-fed radial lines $I_{kEE}'' = \frac{3cU_n}{ 6Z_{-(1)d} + 2(Z_{-(1)g} + Z_{-(1)h}) + Z_{-(0)g} + Z_{-(0)h} } \quad (9)$
c)		Double-fed single line $I_{kEE}'' = \frac{3cU_n}{\left \frac{6Z_{-(1)d}Z_{-(1)e} + 2Z_{-(1)f}(Z_{-(1)d} + Z_{-(1)e})}{Z_{-(1)d} + Z_{-(1)f} + Z_{-(1)e}} + Z_{-(0)f} \right } \quad (10)$
The voltage factor c shall be taken from Table 1 of IEC 60909-0		

5.1.2 Peak short-circuit current, symmetrical short-circuit breaking current and steady-state short-circuit current

The peak short-circuit current is calculated according to IEC 60909-0

$$i_{pEE} = \kappa \sqrt{2} I_{kEE}'' \quad (11)$$

For the factor κ , the same value is used as in the case of a three-phase short circuit at the location A or B, whichever is the largest.

If the line-to-earth short circuits can be assumed as far-from-generator short circuits, then

$$I_{kEE} = I_{bEE} = I_{kEE}'' \quad (12)$$

5.1.3 Distribution of line-to-earth short-circuit currents during two separate simultaneous line-to-earth short circuits

If two separate line-to-earth short circuits occur at the locations A and B, the current distribution through earth can be calculated assuming $r_{3I(0)} = r_{-kEE}''$ as the only active current source feeding the zero-sequence system in A and B; all other sources are disregarded.

Par exemple, dans le cas de deux courts-circuits monophasés à la terre sur les pylônes A et B d'une ligne aérienne, le courant à la terre I_T du pylône éloigné du poste 3

$$I_T = r \cdot I_{kEE}'' \frac{Z_p}{Z_p + 2R_T} \quad (13)$$

où

r est le facteur de réduction de la ligne aérienne selon 6.1.5;

R_T est la résistance du pied de pylône;

Z_p est l'impédance d'entrée selon l'Equation (1).

NOTE L'Equation (13) peut être résolue à partir de la Figure 6 en remplaçant I_{Etot} par $r \cdot I_{kEE}$.

6 Courants de court-circuit partiels s'écoulant à travers la terre dans le cas d'un court-circuit déséquilibré

6.1 Méthode de calcul

6.1.1 Généralités

Les paragraphes suivants traitent des courants partiels s'écoulant à travers la terre et dans les conducteurs mis à la terre (par exemple réseaux de terre, câbles de garde de lignes aériennes et gaines conductrices, écrans et armures de câbles), dans le cas de courts-circuits monophasés à la terre. Ce type de court-circuit est le court-circuit déséquilibré se produisant le plus fréquemment dans les réseaux haute tension directement mis à la terre. Le courant I_{k1}'' conduit aux courants de court-circuit partiels à la terre les plus élevés si $Z_{(0)} > Z_{(1)}$.

Lorsque $Z_{(0)} < Z_{(1)}$ et dans le cas d'un court-circuit biphasé à la terre, le courant à travers la terre I_{k2E}'' doit être pris en considération conformément à la CEI 60909-0.

De plus les postes A, B et C sont supposés être séparés par plus de deux fois la distance "loin du poste" D_F selon l'Equation (18).

Pour le calcul des courants de court-circuit conformément à la CEI 60909-0, les résistances des pylônes, avec ou sans câble de garde, et les impédances des réseaux de terre et des autres connexions à la terre peuvent être négligées.

La procédure de calcul sera considérée avec un réseau simplifié constitué de trois postes A, B et C et de lignes aériennes avec un seul circuit et un seul câble de garde.

6.1.2 Court-circuit monophasé à la terre dans un poste

La Figure 4 représente un poste de transformation B avec des arrivées venant des postes adjacents A et C.

For example, in the case of two line-to-earth short circuits at the towers A and B of an overhead line, the current I_T of the respective tower far from stations is

$$I_T = r I_{kEE} \frac{Z_P}{Z_P + 2R_T} \quad (13)$$

where

r is the reduction factor of the overhead line according to 6.1.5;

R_T is the footing resistance of the tower;

Z_P is the driving point impedance according to Equation (1).

NOTE Equation (13) could be derived from Figure 6 if I_{Etot} is replaced by $r I_{kEE}$

6 Partial short-circuit currents flowing through earth in the case of an unbalanced short circuit

6.1 Calculation method

6.1.1 General

The following subclauses deal with partial short-circuit currents flowing through earth and earthed conductors (e.g. earthing systems, earth wires of overhead lines and conductive sheaths, shieldings and armouring of cables) in the case of line-to-earth short circuits. This type of short circuit in solidly earthed high-voltage systems is the most frequently occurring unbalanced short circuit. I_{k1} leads to the highest short-circuit currents through earth if $Z_{(0)} > Z_{(1)}$.

For $Z_{(0)} < Z_{(1)}$ in the case of a line-to-line short circuit with earth connection, the current to earth I_{kE2E} shall be considered according to IEC 60909-0.

Moreover, it is assumed that stations A, B and C are separated by more than twice the far-from-station distance D_F according to Equation (18).

For the calculation of short-circuit currents according to IEC 60909-0, the tower resistances with or without earth wire and the earth-grid impedances and other connections to earth may be disregarded.

The calculation procedure will be considered on a simplified network consisting of three stations A, B and C, and overhead lines with a single circuit and one earth wire.

6.1.2 Line-to-earth short circuit in a station

Figure 4 shows a transformer station B with feeders coming in from adjacent stations A and C.

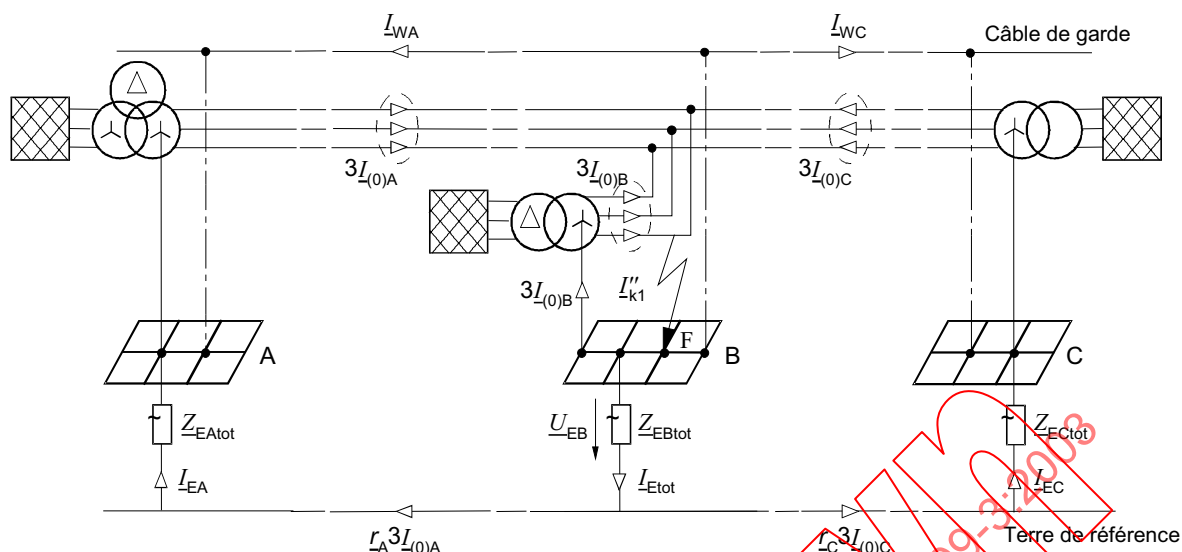


Figure 4 – Courants de court-circuit partiels dans le cas d'un court-circuit monophasé à la terre dans le poste B

IEC 2233/03

Le courant de court-circuit monophasé à la terre I_{k1}'' est égal à trois fois le courant homopolaire circulant au point de court-circuit F:

$$I_{k1}'' = 3I_{(0)A} + 3I_{(0)B} + 3I_{(0)C} \quad (14)$$

Le courant total à travers la terre au point de court-circuit F dans un poste éloigné des autres postes auxquels il est raccordé, est:

$$I_{Etot} = r_A \cdot 3I_{(0)A} + r_C \cdot 3I_{(0)C} \quad (15a)$$

c'est-à-dire selon la Figure 4

$$I_{Etot} = r_A \cdot 3I_{(0)A} + r_C \cdot 3I_{(0)C} \quad (15b)$$

L'impédance de mise à la terre d'un poste est

$$Z_{Etot} = \frac{1}{\frac{1}{R_E} + \frac{1}{Z_P} + \frac{1}{Z_U}} \quad (16)$$

où

R_E est la résistance du réseau de terre;

Z_P est l'impédance d'entrée selon l'Equation (1);

Z_U est l'impédance d'entrée des gaines, écrans et armures des câbles.

Le potentiel du câble de garde au poste B est:

$$U_{EB} = Z_{EBtot} I_{Etot} \quad (17)$$

NOTE Si les postes A ou C sont plus proches que D_F du poste B, le courant de terre total I_{Etot} est diminué d'une quantité trop importante du courant de court-circuit monophasé à la terre circulant en retour vers le poste le plus proche A ou C par les câbles de garde.

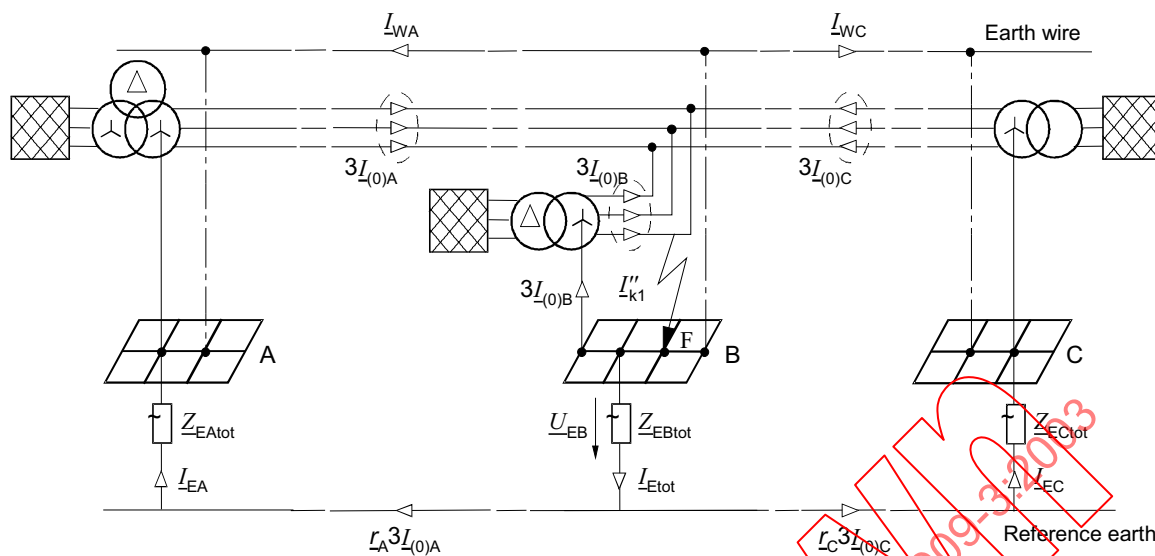


Figure 4 – Partial short-circuit currents in the case of a line-to-earth short circuit inside the station B

The line-to-earth short-circuit current I''_{k1} is equal to three times the zero-sequence current flowing to the short-circuit location F:

$$I''_{k1} = 3I_{(0)A} + 3I_{(0)B} + 3I_{(0)C} \quad (14)$$

The total current through earth at the short-circuit location F at a station remote from other stations to which it is connected, is:

$$I_{Etot} = \sum r \cdot 3I_{(0)} \quad (15a)$$

i.e. in Figure 4

$$I_{Etot} = r_A \cdot 3I_{(0)A} + r_C \cdot 3I_{(0)C} \quad (15b)$$

The earthing impedance of a station is

$$\underline{Z}_{Etot} = \frac{1}{\frac{1}{R_E} + \frac{1}{\underline{Z}_P} + \frac{1}{\underline{Z}_U}} \quad (16)$$

where

R_E is the resistance of earth grid;

$\underline{Z}_P$ is the driving point impedance according to Equation (1);

$\underline{Z}_U$ is the input impedance of sheath, shielding or armouring of a cable.

The earth potential at the station B is:

$$\underline{U}_{EB} = \underline{Z}_{EBtot} I_{Etot} \quad (17)$$

NOTE If the station A or C are nearer than D_F to station B, total earth current I_{Etot} is reduced by an excessive part of the line-to-earth short-circuit current flowing back to the nearest station A or C via earth wires.

La distance d'éloignement D_F est calculée comme suit:

$$D_F = 3\sqrt{R_T} \frac{d_T}{\operatorname{Re}\{\sqrt{Z_W}\}} \quad (18)$$

où

R_T est la résistance de pied des pylônes;

d_T est la distance entre les pylônes;

$\operatorname{Re}\{\sqrt{Z_W}\}$ est la partie réelle de la racine carrée de l'impédance du câble de garde de $Z_W = Z'_W d_T$ avec Z'_W selon l'Equation (33).

La répartition du courant de court-circuit entre les câbles de garde et la terre comme indiqué à la Figure 4 est déterminée par les facteurs de réduction des câbles de garde r_A et r_C des lignes aériennes AB et BC. Dans le cas des câbles, le facteur de réduction dépend des gaines conductrices, des armures et de leurs mises à la terre.

Les courants dans les câbles de garde des lignes aériennes de la Figure 4, loin des postes A, B et C sont donnés par

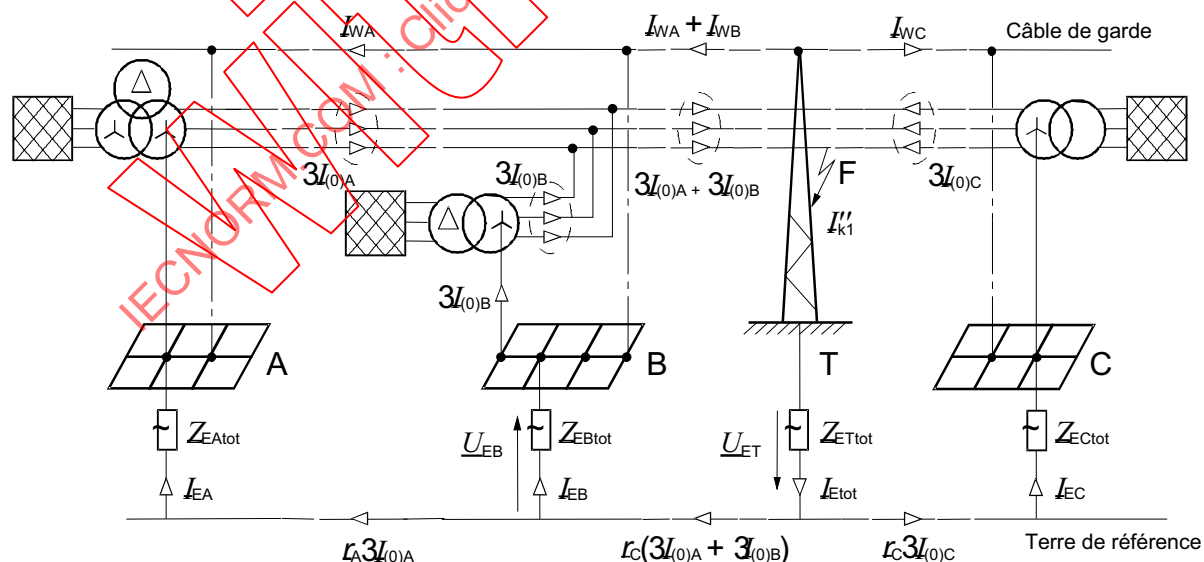
$$I_{WA} = (1 - r_A)^3 I_{(0)A} \quad (19a)$$

$$I_{WC} = (1 - r_C)^3 I_{(0)C} \quad (19b)$$

NOTE Des précautions particulières peuvent être nécessaires dans le cas de lignes à double circuit ou de lignes parallèles avec des systèmes homopolaires couplés.

6.1.3 Court-circuit monophasé à la terre en dehors du poste

Un court-circuit monophasé à la terre sur un pylône d'une ligne aérienne est représenté sur la Figure 5. Le court-circuit est supposé se produire loin des postes.



IEC 2234/03

Figure 5 – Courants de court-circuit partiels dans le cas d'un court-circuit monophasé à la terre sur un pylône T d'une ligne aérienne

The far-from-station distance D_F is calculated as follows:

$$D_F = 3\sqrt{R_T} \frac{d_T}{\operatorname{Re} \left\{ \sqrt{Z_W} \right\}} \quad (18)$$

where

R_T is the tower footing resistance;

d_T is distance between towers;

$\operatorname{Re} \left\{ \sqrt{Z_W} \right\}$ is the real part of the square root of the earth-wire impedance $Z_W = Z'_W d_T$ with Z'_W according to Equation (33).

The distribution of the short-circuit current between the earth wires and the earth as shown in

Figure 4 is determined by the earth wire reduction factors r_A and r_C of the overhead lines AB and BC. For cables, the reduction factor depends on the conductive sheaths, armourings and their earthing.

The currents in the overhead line earth wires of Figure 4 remote from the stations A, B and C are given by

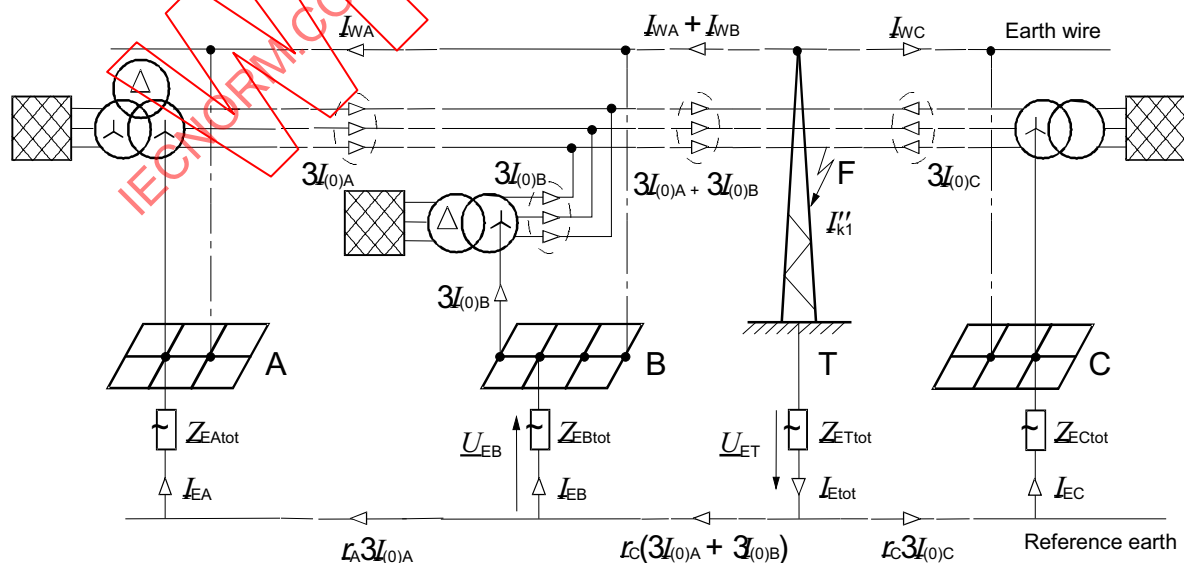
$$I_{WA} = (1 - r_A) 3 I_{(0)A} \quad (19a)$$

$$I_{WC} = (1 - r_C) 3 I_{(0)C} \quad (19b)$$

NOTE Special considerations may be necessary in the case of double-circuit lines or parallel lines with coupled zero-sequence systems.

6.1.3 Line-to-earth short circuit far outside a station

A line-to-earth short circuit at a tower of an overhead line is shown in Figure 5. The short circuit is assumed to occur remote from the stations.



IEC 2234/03

Figure 5 – Partial short-circuit currents in the case of a line-to-earth short circuit at tower T of an overhead line

Le courant de court-circuit monophasé à la terre I_{k1}'' est donné par

$$I_{k1}'' = 3 I_{(0)A} + 3 I_{(0)B} + 3 I_{(0)C} \quad (20)$$

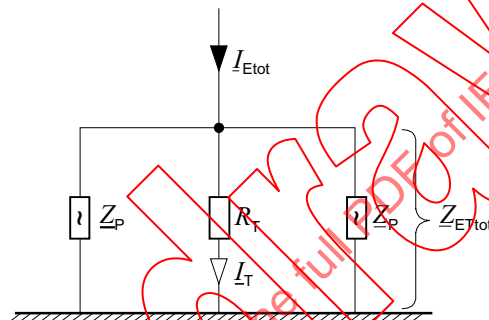
L'impédance totale de terre du pylône où se situe le court-circuit, selon la Figure 6, raccordé à un câble de garde de la ligne aérienne à l'emplacement du défaut, est donnée par

$$Z_{ETtot} = \frac{1}{\frac{1}{R_T} + \frac{2}{Z_P}} \quad (21)$$

où

R_T est la résistance de pied de pylône;

Z_P est l'impédance d'entrée de la ligne aérienne selon l'Equation (1).



IEC 2235/03

Figure 6 – Répartition du courant total de terre I_{Etot}

Lors d'un court-circuit sur un pylône T éloigné des postes A, B et C, le courant total de terre est donné par:

$$I_{Etot} = r_C (3 I_{(0)A} + 3 I_{(0)B}) + r_C \cdot 3 I_{(0)C} = r_C \cdot I_{k1}'' \quad (22)$$

Le potentiel de terre du pylône où se produit le court-circuit est

$$U_{ET} = Z_{ETtot} \cdot I_{Etot} \quad (23)$$

Si sur une ligne comportant un câble de garde, un court-circuit monophasé à la terre se produit sur un pylône au voisinage d'un poste, le potentiel de la terre peut être supérieur à celui calculé avec l'Equation (23). Le calcul nécessite une attention particulière comme cela est indiqué en 6.1.4.

Le courant à travers la terre au poste B dans le cas d'un court-circuit monophasé à la terre en F est obtenu, à partir de la Figure 5, par

$$I_{EB} = r_C (3 I_{(0)A} + 3 I_{(0)B}) - r_A 3 I_{(0)A} \quad (24)$$

Dans ce cas le potentiel de terre au poste B avec I_{EB} issu de l'Equation (24) est selon la Figure 5 donné par

$$U_{EB} = Z_{EBtot} \cdot I_{EB} \quad (25)$$

The line-to-earth short-circuit current I_{-kl}'' is given by

$$I_{-kl}'' = 3 I_{-(0)A} + 3 I_{-(0)B} + 3 I_{-(0)C} \quad (20)$$

The total earth impedance of the short-circuited tower according to Figure 6 connected to an earth wire of the overhead line at the short-circuit location is given by

$$Z_{ETtot} = \frac{1}{\frac{1}{R_T} + \frac{2}{Z_P}} \quad (21)$$

where

R_T is the footing resistance of the tower;

Z_P is the driving point impedance of the overhead line according to Equation (1)

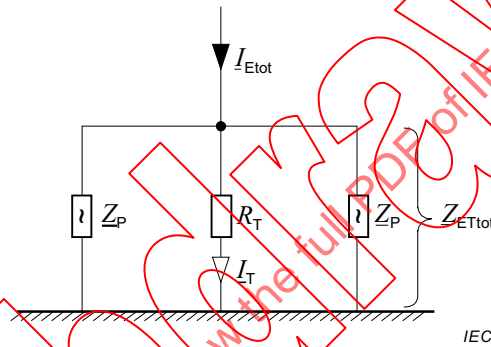


Figure 6 – Distribution of the total earth current I_{-Etot}

For a short circuit at a tower T remote from the stations A, B and C, the total earth current is given by

$$I_{-Etot} = r_C (3 I_{-(0)A} + 3 I_{-(0)B}) + r_C \cdot 3 I_{-(0)C} = r_C \cdot I_{-kl}'' \quad (22)$$

The earth potential at the tower at which the short circuit occurs is given by

$$U_{ET} = Z_{ETtot} \cdot I_{Etot} \quad (23)$$

If on a line with an earth wire, a line-to-earth short circuit occurs on a tower in the vicinity of a station, the earth potential may be higher than calculated with Equation (23). Determination needs special considerations as given in 6.1.4.

The current through earth in station B in the case of a line-to-earth short circuit in F is found from Figure 5 as

$$I_{EB} = r_C (3 I_{(0)A} + 3 I_{(0)B}) - r_A \cdot 3 I_{(0)A} \quad (24)$$

The earth potential at station B in this case with I_{EB} from Equation (24) is, according to Figure 5, given by

$$U_{EB} = Z_{EBtot} \cdot I_{EB} \quad (25)$$

Le courant de terre I_{EB} résultant d'un court-circuit monophasé à la terre se produisant sur la ligne aérienne au voisinage du poste B peut être supérieur au courant de terre I_{Etot} résultant d'un court-circuit monophasé à la terre à l'intérieur du poste B. (voir 6.1.4).

6.1.4 Court-circuit monophasé au voisinage d'un poste

Si le court-circuit monophasé à la terre se produit au voisinage d'un poste (distance inférieure à D_F) (poste B de la Figure 7), alors le potentiel de terre U_{EBn} (indice complémentaire n pour indiquer que le court-circuit monophasé à la terre se produit aux pylônes $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ à l'extérieur du poste) peut être supérieur à U_{EB} , qui est calculé selon l'Equation (17) de 6.1.2. Dans ce cas le potentiel de terre U_{ETn} du pylône n en court-circuit au voisinage du poste B est également supérieur au potentiel de terre U_{ET} calculé selon 6.1.3, Equation (23) pour un pylône extérieur éloigné du poste.

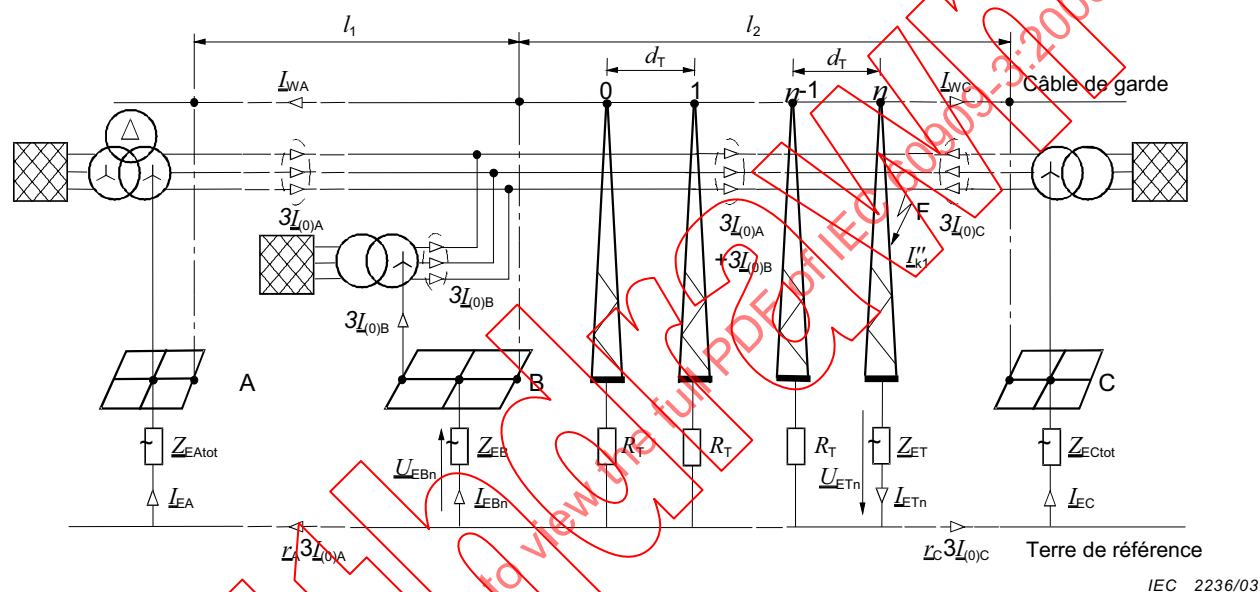


Figure 7 – Courants de court-circuit partiels dans le cas d'un court-circuit monophasé à la terre sur un pylône n d'une ligne aérienne au voisinage d'un poste B

En calculant I_{k1}'' et $3I_{(0)B}$ il faut tenir compte que la numérotation des pylônes suit celle de la Figure 2.

Potentiel de terre U_{ETn} au pylône n à l'extérieur du poste B

Le courant I_{ETn} au pylône n en court-circuit au voisinage du poste B circulant dans Z_{ET} selon l'Equation (27) est égal à la superposition de deux termes, le premier dépendant du courant de terre $r_C \cdot I_{k1}''$ à l'emplacement du court-circuit et le second dépendant du courant $3I_{(0)B}$ revenant au nœud de répartition du transformateur dans le poste B.

$$I_{ETn} = r_C \cdot I_{k1}'' \frac{Z_{Pn}}{Z_{Pn} + Z_{ET}} - r_C \cdot 3I_{(0)B} \frac{Z_{EB}}{Z_{EB} + Z_P} \cdot \frac{1}{k^n} \quad (26)$$

avec

$$Z_{ET} = \frac{1}{\frac{1}{R_T} + \frac{1}{Z_P}} \quad (27)$$

et

$$Z_{EB} = \frac{1}{\frac{1}{R_{EB}} + \frac{1}{Z_P}} \quad (28)$$

The earth current I_{EB} for a line-to-earth short circuit occurring on the overhead line in the vicinity of station B may be higher than I_{Etot} for a line-to-earth short circuit inside station B in Figure 4 (see 6.1.4).

6.1.4 Line-to-earth short circuit in the vicinity of a station

If the line-to-earth short circuit occurs in the vicinity (distance smaller than D_F) of a station (station B in Figure 7), then the earth potential U_{EBn} (additional index n to point out, that the line-to-earth short circuit occurs at the tower $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ outside the station) may be higher than U_{EB} , calculated according to 6.1.2, Equation (17). In this case, the earth potential U_{ETn} of the short-circuited tower n in the vicinity of station B is also higher than the earth potential U_{ET} calculated in accordance with Clause 6.1.3, Equation (23) for a tower far outside a station.

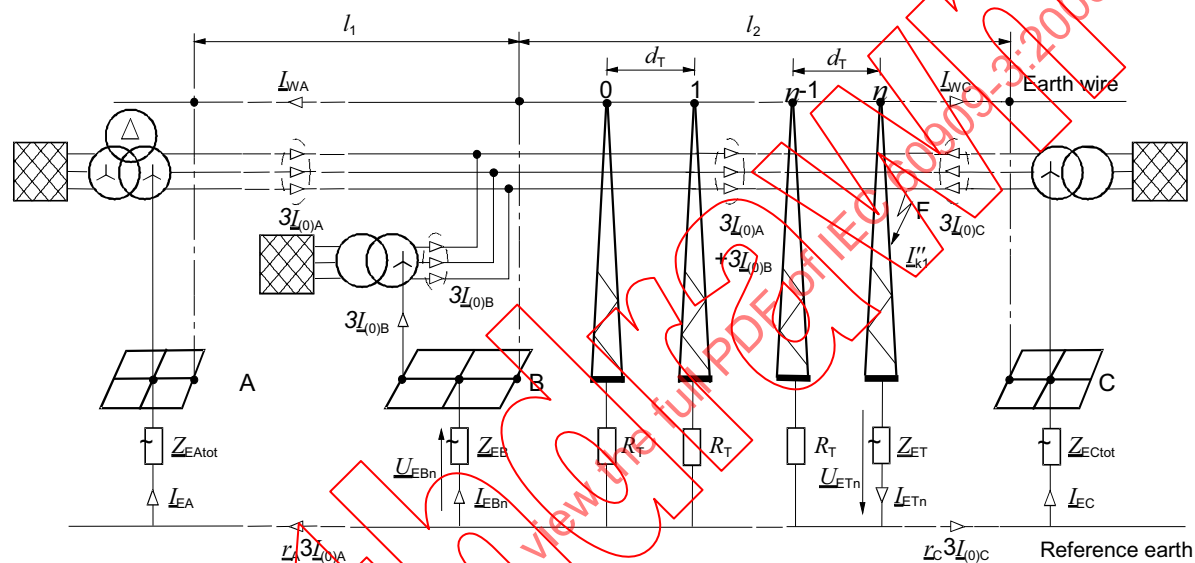


Figure 7 – Partial short-circuit currents in the case of a line-to-earth short circuit at tower n of an overhead line in the vicinity of station B

Following Figure 2, the numbering of the towers has to be taken into account, when calculating I_{-k1} and $3 \cdot I_{(0)B}$.

Earth potential U_{ETn} at the tower n outside station B

The current I_{ETn} at the short-circuited tower n in the vicinity of station B flowing through Z_{ET} according to Equation (27) is found from the superposition of two terms, the first one depending on the current through earth $r_C \cdot I_{-k1}$ at the short-circuit location and the second one depending on the current $3 \cdot I_{(0)B}$ flowing back to the star point of the transformer in station B.

$$I_{ETn} = r_C \cdot I_{-k1} \frac{Z_{Pn}}{Z_{Pn} + Z_{ET}} - r_C \cdot 3I_{(0)B} \frac{Z_{EB}}{Z_{EB} + Z_P} \cdot \frac{1}{k^n} \quad (26)$$

with

$$Z_{ET} = \frac{1}{\frac{1}{R_T} + \frac{1}{Z_P}} \quad (27)$$

and

$$Z_{EB} = \frac{1}{\frac{1}{R_{EB}} + \frac{1}{Z_P}} \quad (28)$$

L'impédance d'entrée $\underline{Z}_P$ est obtenue de l'Equation (1), $\underline{Z}_{Pn}$ de l'Equation (2) et $\underline{k}$ de l'Equation (3).

Le potentiel de terre $\underline{U}_{ETn}$ au pylône n en court-circuit est donné par:

$$\underline{U}_{ETn} = \underline{Z}_{ET} \cdot \underline{I}_{ETn} \quad (29)$$

Potentiel de terre du poste B pendant un court-circuit monophasé sur le pylône n

Le courant $\underline{I}_{EBn}$ circulant dans $\underline{Z}_{EB}$ (Equation (28)) du poste B dans le cas d'un court-circuit monophasé sur un pylône n au voisinage du poste B (Figure 7) est donné par l'équation suivante:

$$\underline{I}_{EBn} = \underline{r}_C \cdot \underline{I}_{k1}'' \frac{\underline{Z}_{ET}}{\underline{Z}_{ET} + \underline{Z}_{Pn}} \cdot \frac{2 \cdot \underline{Z}_P - \underline{Z}_W}{(\underline{Z}_{EB} + \underline{Z}_P) \cdot \underline{k}^n - (\underline{Z}_{EB} - \underline{Z}_P + \underline{Z}_W) \cdot \underline{k}^{-n}} - 3 \cdot \underline{r}_C \underline{I}_{(0)B} \frac{\underline{Z}_P}{\underline{Z}_P + \underline{Z}_{EB}} \quad (30)$$

Il convient d'utiliser $\underline{Z}_{ET}$ et $\underline{Z}_{EB}$ provenant des Equations (27) et (28).

Le potentiel de terre du poste B pendant le court-circuit monophasé entre phase et terre au pylône n au voisinage du poste B est donné par:

$$\underline{U}_{EBn} = \underline{Z}_{EB} \cdot \underline{I}_{EBn} \quad (31)$$

6.1.5 Facteur de réduction des lignes aériennes et des câbles

L'équation suivante s'applique aux lignes aériennes avec câbles de garde. Elle est également valable pour des câbles avec des gaines métalliques, des écrans ou des armures mis à la terre à chaque extrémité. Le facteur de réduction dans le cas d'un câble de garde est donné par

$$\underline{r} = \frac{\underline{I}_{Etot}}{3 \underline{I}_{(0)}} = 1 - \frac{\underline{Z}'_{WL}}{\underline{Z}'_W} \quad (32)$$

$\underline{Z}'_{WL}$ et $\underline{Z}'_W$ dépendent de la résistivité ρ du sol, de la distance d_{WL} entre le câble de garde et les conducteurs de phase et du rayon équivalent du conducteur r_{WW} pour un ou plusieurs conducteurs. $\underline{Z}'_W$ et $\underline{Z}'_{WL}$ doivent être respectivement calculées conformément aux Equations (33) et (34).

Tableau 2 – Résistivité ρ et profondeur équivalente de pénétration dans la terre δ pour différents types de sol

Types de sol	Résistivité ρ Ωm	Profondeur équivalente de pénétration dans la terre δ m	
		pour 50 Hz	pour 60 Hz
Granit	>10 000	>9 300	>8 500
Rochers	3 000 ... 10 000	5 100 ... 9 300	4 650 ... 8 500
Sol pierreux	1 000 ... 3 000	2 940 ... 5 100	2 690 ... 4 650
Cailloux, sable sec	200 ... 1 200	1 320 ... 3 220	1 200 ... 2 940
Sol calcaire, sable humide	70 ... 200	780 ... 1 320	710 ... 1 200
Terre agricole	50 ... 100	660 ... 930	600 ... 850
Argile, glaise	10 ... 50	295 ... 660	270 ... 600
Sol marécageux	<20	<415	<380

The driving point impedance $\underline{Z}_P$ is found from Equation (1), $\underline{Z}_{Pn}$ from Equation (2) and $\underline{k}$ from Equation (3).

The earth potential $\underline{U}_{ETn}$ at the short-circuited tower n is found with:

$$\underline{U}_{ETn} = \underline{Z}_{ET} \cdot \underline{I}_{ETn} \quad (29)$$

Earth potential of station B during a line-to-earth short circuit at the tower n

The current $\underline{I}_{EBn}$ passing $\underline{Z}_{EB}$ (Equation (28)) of the station B in the case of a line-to-earth short circuit at tower n in the vicinity of the station B (Figure 7) is found with the following equation:

$$\underline{I}_{EBn} = r_C \cdot \underline{I}_{k1}'' \cdot \frac{\underline{Z}_{ET}}{\underline{Z}_{ET} + \underline{Z}_{Pn}} \cdot \frac{2 \cdot \underline{Z}_P - \underline{Z}_W}{(\underline{Z}_{EB} + \underline{Z}_P) \cdot \underline{k}^n - (\underline{Z}_{EB} - \underline{Z}_P + \underline{Z}_W) \cdot \underline{k}^{-n}} - 3 \cdot r_C \cdot \underline{I}_{(0)B} \cdot \frac{\underline{Z}_P}{\underline{Z}_P + \underline{Z}_{EB}} \quad (30)$$

$\underline{Z}_{ET}$ and $\underline{Z}_{EB}$ should be used from Equation (27) and (28).

The earth potential of station B during the single line-to-earth short circuit at the tower n in the vicinity of the station B is:

$$\underline{U}_{EBn} = \underline{Z}_{EB} \cdot \underline{I}_{EBn} \quad (31)$$

6.1.5 Reduction factor for overhead lines and cables

The following equation is given for overhead lines with earth wires. It is also valid for cables with metallic sheaths, shielding or armouring earthed at both ends. The reduction factor for an earth wire is given by

$$r = \frac{\underline{I}_{Etot}}{3 \underline{I}_{(0)}} = 1 - \frac{\underline{Z}'_{WL}}{\underline{Z}'_W} \quad (32)$$

$\underline{Z}'_{WL}$ and $\underline{Z}'_W$ are dependent on soil resistivity ρ , distance d_{WL} between the earth wire and the line conductors and equivalent conductor radius r_{WW} for one or more conductors. $\underline{Z}'_W$ and $\underline{Z}'_{WL}$ shall be calculated according to Equations (33) and (34) respectively.

Table 2 – Resistivity ρ and equivalent earth penetration depth δ for different soil types

Earth types	Resistivity ρ Ωm	Equivalent earth penetration depth δ m	
		for 50 Hz	for 60 Hz
Granite	>10 000	>9 300	>8 500
Rocks	3 000 ... 10 000	5 100 ... 9 300	4 650 ... 8 500
Stony soil	1 000 ... 3 000	2 940 ... 5 100	2 690 ... 4 650
Pebbles, dry sand	200 ... 1 200	1 320 ... 3 220	1 200 ... 2 940
Calcareous soil, wet sand	70 ... 200	780 ... 1 320	710 ... 1 200
Farmland	50 ... 100	660 ... 930	600 ... 850
Clay, loam	10 ... 50	295 ... 660	270 ... 600
Marshy soil	<20	<415	<380

Le facteur de réduction peut être évalué à partir de la Figure 8 en utilisant le Tableau 2. Les équations ci-après peuvent être utilisées pour un calcul détaillé du facteur de réduction.

L'impédance linéique du câble de garde est

$$\underline{Z}'_W \approx R'_W + \frac{\omega \mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left\{ \frac{\mu_r}{4\nu} + \ln \frac{\delta}{r_{WW}} \right\} \quad (33)$$

avec $\frac{\gamma \mu_0}{8} \approx \begin{cases} 0,05 \text{ q/km} & \text{pour } 50 \text{ Hz} \\ 0,06 \text{ q/km} & \text{pour } 60 \text{ Hz} \end{cases}$

et l'impédance mutuelle linéique entre le câble de garde et les conducteurs de phase parallèles, avec retour commun par la terre

$$\underline{Z}'_{WL} \approx \frac{\omega \mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\delta}{d_{WL}} \quad (34)$$

avec la profondeur équivalente de pénétration dans la terre conformément au Tableau 2

$$\delta = \frac{1,85}{\sqrt{\frac{\omega \mu_0}{\rho}}} \quad (35)$$

Les définitions suivantes s'appliquent:

R'_W Résistance linéique du câble de garde

d_W Distance entre deux câbles de garde

r_{WW} Rayon équivalent du câble de garde

r_W Rayon du câble de garde

pour 1 un câble de garde: $r_{WW} = r_W$

pour 2 câbles de garde: $r_{WW} = \sqrt{r_W \cdot d_W}$

ν Nombre de câbles de garde

d_{WL} Distance moyenne géométrique entre le câble de garde et les conducteurs de phase L1, L2 et L3.

pour 1 câble de garde: $d_{WL} = \sqrt[3]{d_{WL1} \cdot d_{WL2} \cdot d_{WL3}}$

pour 2 câbles de garde: $d_{WL} = \sqrt[6]{d_{W1L1} \cdot d_{W1L2} \cdot d_{W1L3} \cdot d_{W2L1} \cdot d_{W2L2} \cdot d_{W2L3}}$

ω Pulsation: $\omega = 2\pi f$

μ_0 Constante magnétique: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$

μ_r Perméabilité relative du câble de garde.

Câbles aluminium-acier (ACSR) avec une couche d'aluminium: $\mu_r \approx 3 \dots 10$.

Autres câbles ACSR: $\mu_r \approx 3$.

Câbles acier: $\mu_r \approx 75$

ρ Résistivité du sol selon le Tableau 2

The reduction factor can be estimated from Figure 8 using Table 2. For detailed calculations of the reduction factor, the following equations can be used.

The earth wire impedance per unit length is

$$\underline{Z}'_W \approx R'_W + \frac{\omega\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left\{ \frac{\mu_r}{4\nu} + \ln \frac{\delta}{r_{WW}} \right\} \quad (33)$$

$$\text{with } \frac{\omega\mu_0}{8} \approx \begin{cases} 0,05 \, \Omega/\text{km} & \text{for 50Hz} \\ 0,06 \, \Omega/\text{km} & \text{for 60Hz} \end{cases}$$

and the mutual impedance per unit length between the earth wire and the parallel line conductors with common earth return

$$\underline{Z}'_{WL} \approx \frac{\omega\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\delta}{d_{WL}} \quad (34)$$

with the equivalent earth penetration depth according to Table 2

$$\delta = \frac{1,85}{\sqrt{\frac{\omega\mu_0}{\rho}}} \quad (35)$$

The following definitions apply

R'_W Resistance per unit length of earth wires

d_W Distance between two earth wires

r_{WW} Equivalent earth wire radius

r_W Earth wire radius

$$\begin{aligned} \text{for 1 earth wire: } r_{WW} &= r_W \\ \text{for 2 earth wires: } r_{WW} &= \sqrt{r_W \cdot d_W} \end{aligned}$$

ν Number of earth wires

d_{WL} Geometric mean distance between the earth wire and the line conductors L1, L2 and L3

$$\text{for 1 earth wire: } d_{WL} = \sqrt[3]{d_{WL1} \cdot d_{WL2} \cdot d_{WL3}}$$

$$\text{for 2 earth wires: } d_{WL} = \sqrt[6]{d_{W1L1} \cdot d_{W1L2} \cdot d_{W1L3} \cdot d_{W2L1} \cdot d_{W2L2} \cdot d_{W2L3}}$$

ω Angular frequency: $\omega = 2\pi f$

μ_0 Magnetic constant: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$

μ_r Relative permeability of earth wire

Aluminium core steel reinforced (ACSR) wires with one layer of aluminium: $\mu_r \approx 5 \dots 10$

Other ACSR wires: $\mu_r \approx 1$

Steel wires: $\mu_r \approx 75$

ρ Soil resistivity according to Table 2

D'après les Equations (32) à (34), le facteur de réduction des câbles de garde ACSR usuels dépend de la résistivité du sol. La Figure 8 montre par exemple la valeur du facteur de réduction du câble de garde pour des câbles de garde non magnétiques et pour différents types de lignes aériennes de tension nominale 60 kV à 220 kV. Dans le cas de lignes aériennes comportant un ou deux câbles de garde en acier, la valeur du facteur de réduction devient respectivement d'environ 0,95 et 0,90.

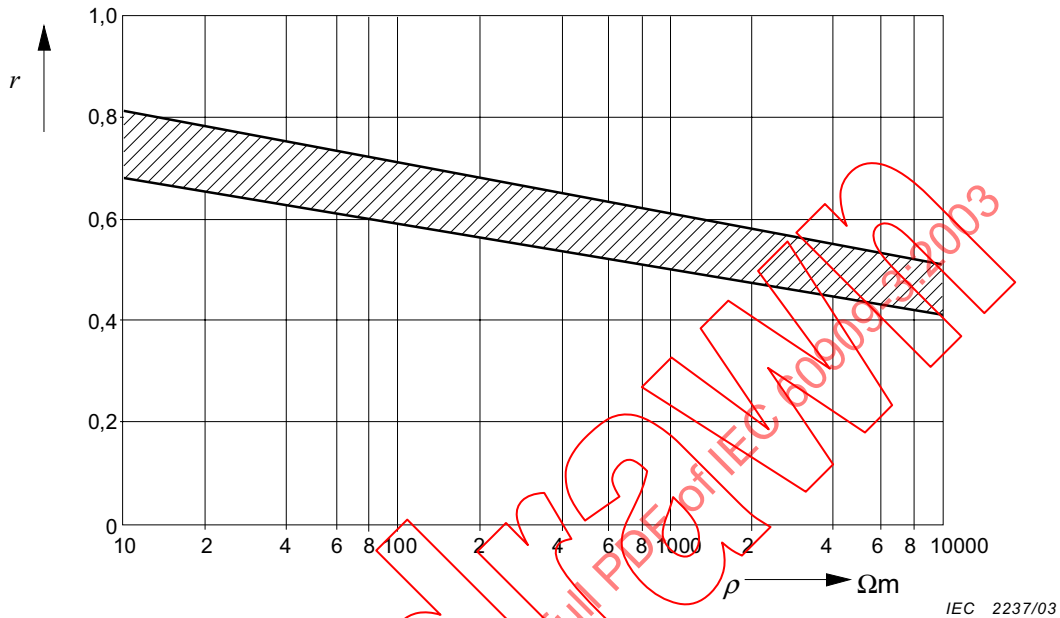


Figure 8 – Valeur absolue r du facteur de réduction pour les câbles de garde non magnétiques en fonction de la résistivité ρ du sol

Dans le cas de câbles d'énergie, le facteur de réduction dépend également du type et des dimensions de la gaine, de l'écran et de l'armure, conformément aux pratiques et aux normes nationales. Des indications peuvent être trouvées dans les manuels des fabricants.

According to Equations (32) to (34), the reduction factor of usual ACSR earth wires depends on earth resistivity. As an example, Figure 8 shows the magnitude of earth-wire reduction factors for non-magnetic earth wire for different types of overhead lines with nominal voltages 60 kV to 220 kV. In the case of overhead lines with 1 and 2 earth wires of steel, the magnitude of the reduction factor becomes about 0,95 and 0,90 respectively.

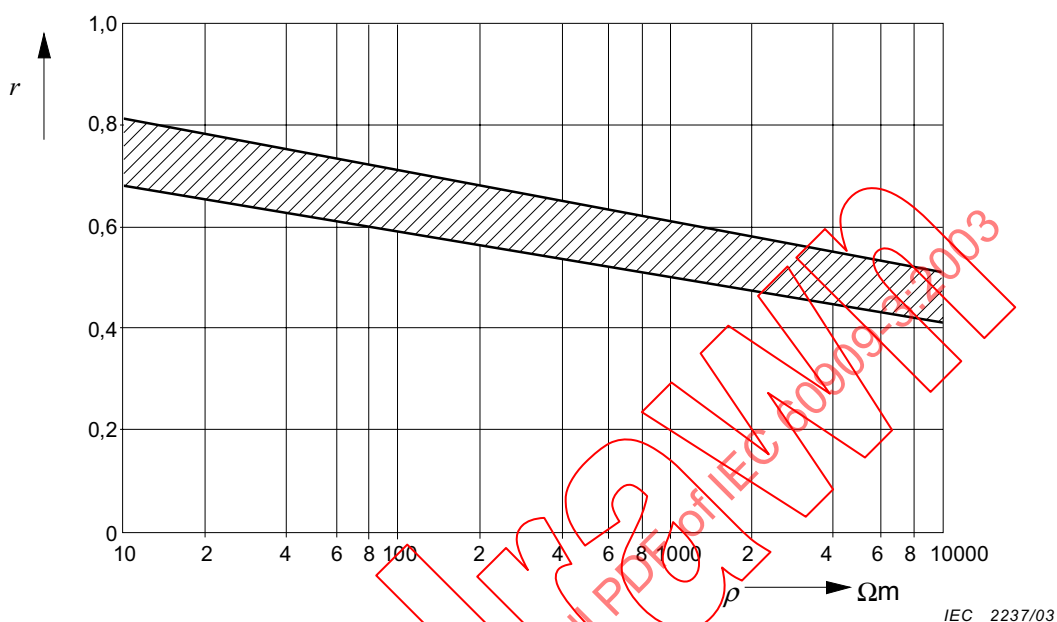


Figure 8 – The magnitude r of the reduction factor for non-magnetic earth wires in relation to soil resistivity ρ

In the case of power cables, the reduction factor also depends on the type and size of sheath, shielding and armouring in compliance with the national techniques and standards. Data may be taken from manufacturers' handbooks.

Annexe A (informative)

Exemple de calcul de deux courts-circuits monophasés simultanés séparés à la terre

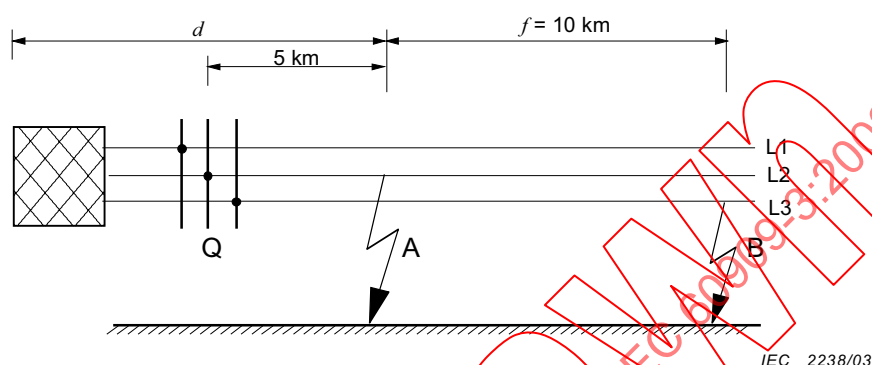


Figure A.1 – Deux courts-circuits monophasés simultanés séparés à la terre sur une ligne alimentée en antenne, voir Tableau 1

A.1 Données

Tension nominale: $U_n = 66 \text{ kV}$

Fréquence nominale: 50 Hz

Neutres des transformateurs isolés ou mis à la terre par bobine d'extinction

Impédance équivalente au point de raccordement de l'alimentation Q: $Z_Q = (1,5 + j 15) \Omega$

Courant de court-circuit symétrique initial au point de raccordement de l'alimentation Q (voir CEI 60909-0)

$$I_{kQ}'' = \frac{1,1 \cdot 66 \text{ kV}}{\sqrt{3} |1,5 + j 15| \Omega} = 2,8 \text{ kA}$$

Ligne aérienne:

conducteurs $3 \times 1 \times 166/88 \text{ mm}^2 \text{ ACSR}$

câble de garde $1 \times 49 \text{ mm}^2 \text{ acier}$, $r_W = 4,5 \text{ mm}$, $R_W' = 2,92 \Omega/\text{km}$, $\mu_r = 75$

distance moyenne géométrique entre le câble de garde et les conducteurs de phase $d_{WL} = 6 \text{ m}$

impédance linéique de la ligne:

directe

$$\underline{Z}'_{(1)} = (0,17 + j 0,40) \Omega/\text{km}$$

homopolaire

$$\underline{Z}'_{(0)} = (0,32 + j 1,40) \Omega/\text{km}$$

résistivité du sol rocheux

$$\rho = 1\,000 \Omega\text{m}$$

profondeur équivalente de pénétration dans le sol

$$\delta = 2\,940 \text{ m selon le Tableau 2}$$

résistance de pied de pylône

$$R_T = 10 \Omega$$

distance entre pylônes

$$d_T = 300 \text{ m}$$

Annex A (informative)

Example for the calculation of two separate simultaneous line-to-earth short-circuit currents

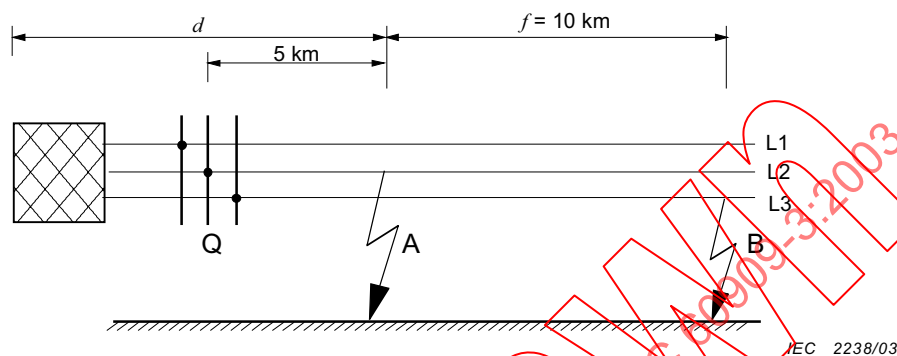


Figure A.1 – Two separate simultaneous line-to-earth short circuits on a single fed radial line, see Table 1

A.1 Data

Nominal voltage: $U_n = 66 \text{ kV}$

Nominal frequency: 50 Hz

Transformer neutrals isolated or resonant earthed

Equivalent impedance of the network at the feeder connection point Q: $\underline{Z}_Q = (1,5 + j 15) \Omega$

Initial symmetrical short-circuit current at the feeder connection point Q (see IEC 60909-0)

$$I_{kQ} = \frac{1,1 \cdot 66 \text{ kV}}{\sqrt{3} |1,5 + j 15| \Omega} = 2,8 \text{ kA}$$

Overhead line:

conductors $3 \times 1 \times 166/88 \text{ mm}^2 \text{ ACSR}$

earth wire $1 \times 49 \text{ mm}^2 \text{ steel}$, $r_W = 4,5 \text{ mm}$, $R'_W = 2,92 \Omega/\text{km}$, $\mu_r = 75$

geometric mean distance between the earth wire and the line conductors $d_{WL} = 6 \text{ m}$

line impedance per unit length:

positive-sequence $\underline{Z}'_{(1)} = (0,17 + j 0,40) \Omega/\text{km}$

zero-sequence $\underline{Z}'_{(0)} = (0,32 + j 1,40) \Omega/\text{km}$

stony soil resistivity $\rho = 1\,000 \Omega\text{m}$

equivalent earth penetration depth $\delta = 2\,940 \text{ m}$ from Table 2

tower footing resistance $R_T = 10 \Omega$

tower distance $d_T = 300 \text{ m}$

A.2 Calculs

Impédance linéique du câble de garde par unité de longueur conformément à l'Equation (33)

$$\begin{aligned}\underline{Z}'_W &= 2,92 \frac{\Omega}{\text{km}} + 0,05 \frac{\Omega}{\text{km}} + j 314 \text{ s}^{-1} \frac{4\pi \cdot 10^{-4} \Omega \text{s}}{2\pi \text{ km}} \left\{ \frac{75}{4} + \ln \frac{2940 \text{ m}}{4,5 \text{ mm}} \right\} \\ &= (2,97 + j 2,02) \frac{\Omega}{\text{km}}\end{aligned}$$

Impédance mutuelle linéique entre le câble de garde et les conducteurs de phase parallèles, avec retour commun par la terre, conformément à l'Equation (34)

$$\underline{Z}'_{WL} = 0,05 \frac{\Omega}{\text{km}} + j 314 \text{ s}^{-1} \frac{4\pi \cdot 10^{-4} \Omega \text{s}}{2\pi \text{ km}} \cdot \ln \frac{2940 \text{ m}}{6 \text{ m}} = (0,05 + j 0,39) \frac{\Omega}{\text{km}}$$

Facteur de réduction du câble de garde conformément à l'Equation (32)

$$r = \left| 1 - \frac{0,05 + j 0,39}{2,97 + j 2,02} \right| = 0,93$$

Impédance d'entrée conformément à l'Equation (1) avec $\underline{Z}_W = \underline{Z}'_W d_T$

$$\underline{Z}_P = 0,5(0,891 + j 0,606) \Omega + \sqrt{[0,5(0,891 + j 0,606)]^2 + 10 \cdot (0,891 + j 0,606)} \Omega = (3,6 + j 1,3) \Omega$$

L'Equation (8) du Tableau 1 donne

$$\begin{aligned}\underline{I}''_{kEE} &= \frac{3 \cdot 11 \cdot 66 \text{ kV}}{(14,1 + 3,4 + 3,2) \Omega + j (102 + 8 + 14) \Omega} = (285 - j 1709) \text{ A} \\ \underline{I}''_{kEE} &= 1733 \text{ A}\end{aligned}$$

où

$$6 \underline{Z}_{(1)d} = 6 \left\{ (15 + j 15) \Omega + 5 \text{ km } (0,17 + j 0,40) \frac{\Omega}{\text{km}} \right\} = (14,1 + j 102) \Omega$$

$$2 \underline{Z}_{(1)f} = 2 \cdot 10 \text{ km } (0,17 + j 0,40) \frac{\Omega}{\text{km}} = (3,4 + j 8) \Omega$$

$$\underline{Z}_{(0)f} = 10 \text{ km } (0,32 + j 1,4) \frac{\Omega}{\text{km}} = (3,2 + j 14) \Omega$$

Le courant à la terre à travers les résistances du pied des pylônes aux points des courts-circuits A et B est déterminé conformément à l'Equation (13)

$$I_T = 0,93 \cdot 1733 \text{ A} \cdot \frac{|3,6 + j 1,3| \Omega}{|(3,6 + j 1,3) \Omega + 2 \cdot 10 \Omega|} = 261 \text{ A}$$

A.2 Calculations

Earth wire impedance per unit length according to Equation (33)

$$\begin{aligned}\underline{Z}'_W &= 2,92 \frac{\Omega}{\text{km}} + 0,05 \frac{\Omega}{\text{km}} + j 314 \text{ s}^{-1} \frac{4\pi \cdot 10^{-4} \Omega \text{s}}{2\pi \text{ km}} \left(\frac{75}{4} + \ln \frac{2940 \text{ m}}{4,5 \text{ mm}} \right) \\ &= (2,97 + j 2,02) \frac{\Omega}{\text{km}}\end{aligned}$$

Mutual impedance per unit length between the earth wire and the parallel line conductors with common earth return according to Equation (34)

$$\underline{Z}'_{WL} = 0,05 \frac{\Omega}{\text{km}} + j 314 \text{ s}^{-1} \frac{4\pi \cdot 10^{-4} \Omega \text{s}}{2\pi \text{ km}} \cdot \ln \frac{2940 \text{ m}}{6 \text{ m}} = (0,05 + j 0,39) \frac{\Omega}{\text{km}}$$

Reduction factor of earth wire according to Equation (32)

$$r = \left| 1 - \frac{0,05 + j 0,39}{2,97 + j 2,02} \right| = 0,93$$

Driving point impedance according to Equation (1) with $\underline{Z}_W = \underline{Z}'_W d_T$

$$\underline{Z}_P = 0,5(0,891 + j0,606)\Omega + \sqrt{[0,5(0,891 + j0,606)]^2 + 10 \cdot (0,891 + j0,606)} \Omega = (3,6 + j 1,3) \Omega$$

Equation (8) of Table 1 gives

$$\begin{aligned}I''_{kEE} &= \frac{3 \cdot 11 \cdot 66 \text{ kV}}{(14,1 + 3,4 + 3,2) \Omega + j (102 + 8 + 14) \Omega} = (285 - j 1709) \text{ A} \\ I''_{kEE} &= 1733 \text{ A}\end{aligned}$$

where

$$\begin{aligned}6 \underline{Z}_{(1)d} &= 6 \left\{ (1,5 + j 15) \Omega + 5 \text{ km } (0,17 + j 0,40) \frac{\Omega}{\text{km}} \right\} = (14,1 + j 102) \Omega \\ 2 \underline{Z}_{(1)f} &= 2 \cdot 10 \text{ km } (0,17 + j 0,40) \frac{\Omega}{\text{km}} = (3,4 + j 8) \Omega \\ \underline{Z}_{(0)f} &= 10 \text{ km } (0,32 + j 1,4) \frac{\Omega}{\text{km}} = (3,2 + j 14) \Omega\end{aligned}$$

The current to earth through the tower footing resistances at the short-circuit locations A or B is determined according to Equation (13)

$$I_T = 0,93 \cdot 1733 \text{ A} \cdot \frac{|3,6 + j 1,3| \Omega}{|(3,6 + j 1,3) \Omega + 2 \cdot 10 \Omega|} = 261 \text{ A}$$

Annexe B (informative)

Exemples de calcul des courants de courts-circuits partiels à travers la terre

Un réseau à 132 kV et à 50 Hz est illustré par les Figures B.1 et B.3. Les distances sont de 40 km entre les postes A et B et de 100 km entre les postes B et C.

B.1 Données

Poste A:

impédance de court-circuit	$Z_A = (0 + j 6,4) \Omega$
impédance homopolaire du transformateur	$Z_{(0)A} = (0 + j 12) \Omega$

Poste B:

impédance de court-circuit	$Z_B = (0 + j 7,6) \Omega$
impédance homopolaire du transformateur	$Z_{(0)B} = (0 + j 7) \Omega$
résistance du réseau de terre	$R_{EB} = 5 \Omega$

Poste C:

impédance de court-circuit	$Z_C = (0 + j 21) \Omega$
impédance homopolaire du transformateur	$Z_{(0)C} = (0 + j 20,3) \Omega$

Ligne aérienne:

conducteurs de phase	$3 \times 2 \times 240/40 \text{ mm}^2 \text{ ACSR}$
câble de garde	$1 \times 240/40 \text{ mm}^2 \text{ ACSR}$
impédance directe linéique par phase	$Z_{NjL} = (0,06 + j 0,298) \Omega/\text{km}$
impédance homopolaire linéique par phase	$Z_{(0)L} = (0,272 + j 1,48) \Omega/\text{km}$
résistivité du sol	$\rho = 1\,000 \Omega\text{m}$
profondeur équivalente de pénétration dans le sol	$\delta = 2\,940 \text{ m du Tableau 2}$
impédance linéique du câble de garde	$Z_{Nj} = (0,17 + j 0,801) \Omega/\text{km}$
facteur de réduction du câble de garde	$r_A = r_B = r_C = r = 0,6 - j 0,03 \approx 0,6$
résistance de pied de pylône	$R_T = 10 \Omega$
distance entre pylônes	$d_T = 400 \text{ m}$
longueur de la ligne aérienne entre A et B	$l_1 = 40 \text{ km}$
longueur de la ligne aérienne entre B et C	$l_2 = 100 \text{ km}$

Annex B (informative)

Examples for the calculation of partial short-circuit currents through earth

A 132 kV, 50 Hz system is given as shown in Figures B.1 and B.3. The distances are 40 km between the stations A and B, and 100 km between the stations B and C.

B.1 Data

Station A:

short-circuit impedance	$\underline{Z}_A = (0 + j 6,4) \Omega$
zero-sequence impedance of the transformer	$\underline{Z}_{(0)A} = (0 + j 12) \Omega$

Station B:

short-circuit impedance	$\underline{Z}_B = (0 + j 7,6) \Omega$
zero-sequence impedance of the transformer	$\underline{Z}_{(0)B} = (0 + j 7) \Omega$
resistance of earth grid	$R_{EB} = 5 \Omega$

Station C:

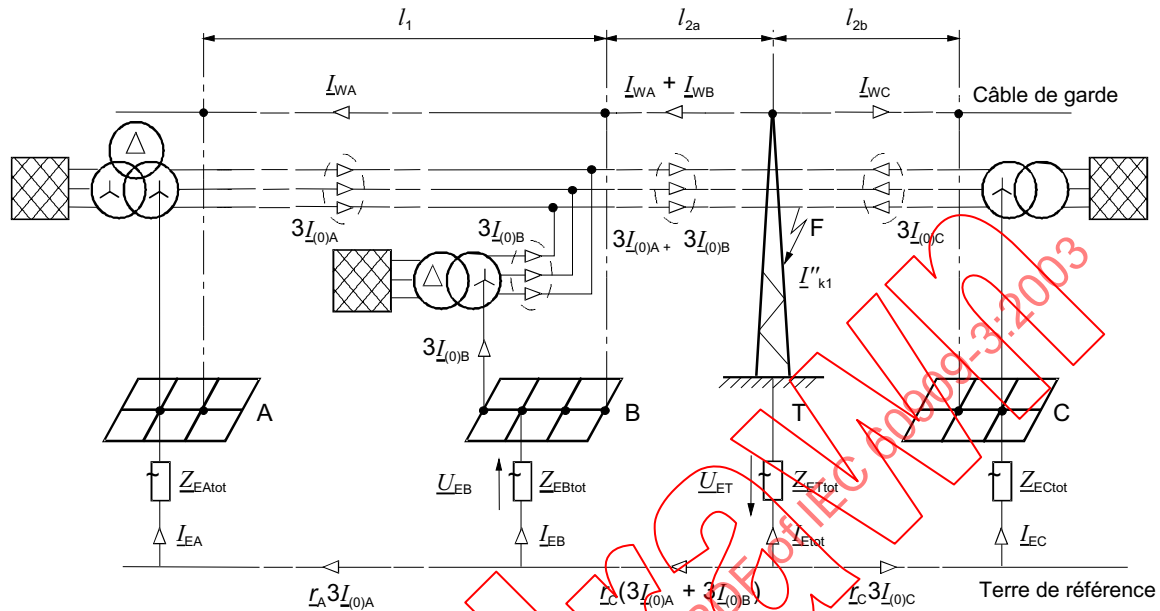
short-circuit impedance	$\underline{Z}_C = (0 + j 21) \Omega$
zero-sequence impedance of the transformer	$\underline{Z}_{(0)C} = (0 + j 20,3) \Omega$

Overhead line:

line conductors	$3 \times 2 \times 240/40 \text{ mm}^2 \text{ ACSR}$
earth wire	$1 \times 240/40 \text{ mm}^2 \text{ ACSR}$
positive-sequence line impedance per unit length	$\underline{Z}_{(1)L} = (0,06 + j 0,298) \Omega/\text{km}$
zero-sequence line impedance per unit length	$\underline{Z}_{(0)L} = (0,272 + j 1,48) \Omega/\text{km}$
soil resistivity	$\rho = 1\,000 \Omega\text{m}$
equivalent earth penetration depth	$\delta = 2\,940 \text{ m}$ from Table 2
earth-wire impedance per unit length	$\underline{Z}_W = (0,17 + j 0,801) \Omega/\text{km}$
earth-wire reduction factor	$r_A = r_B = r_C = r = 0,6 - j 0,03 \approx 0,6$
tower footing resistance	$R_T = 10 \Omega$
tower distance	$d_T = 400 \text{ m}$
length of overhead line between A and B	$l_1 = 40 \text{ km}$
length of overhead line between B and C	$l_2 = 100 \text{ km}$

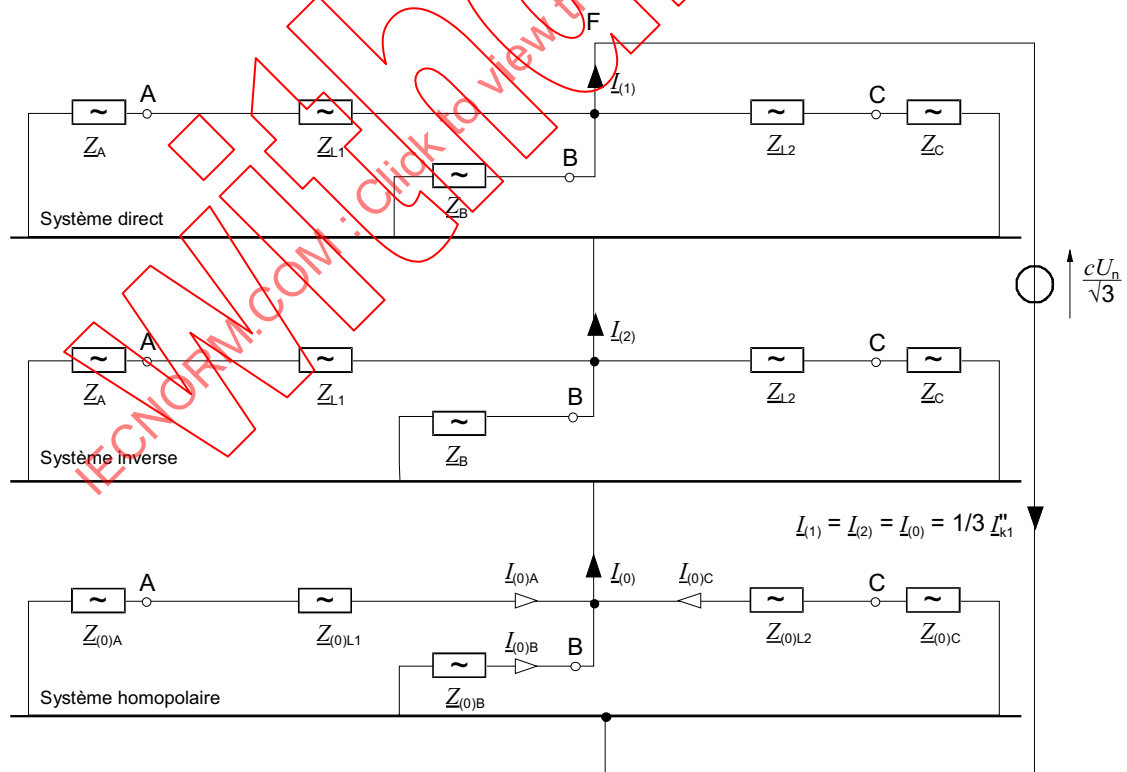
B.2 Court-circuit monophasé à la terre dans un poste

Un court-circuit monophasé se produit dans le poste B, comme indiqué sur la Figure B.1.



IEC 2239/03

Figure B.1 – Court-circuit monophasé à la terre dans le poste B – Schéma du réseau avec les postes A, B et C



IEC 2240/03

Figure B.2 – Court-circuit monophasé à la terre dans le poste B – Systèmes direct, inverse et homopolaire avec les connexions à l'emplacement F du court-circuit à l'intérieur du poste B

B.2 Line-to-earth short circuit in a station

A line-to-earth short circuit occurs inside station B as shown in Figure B.1.

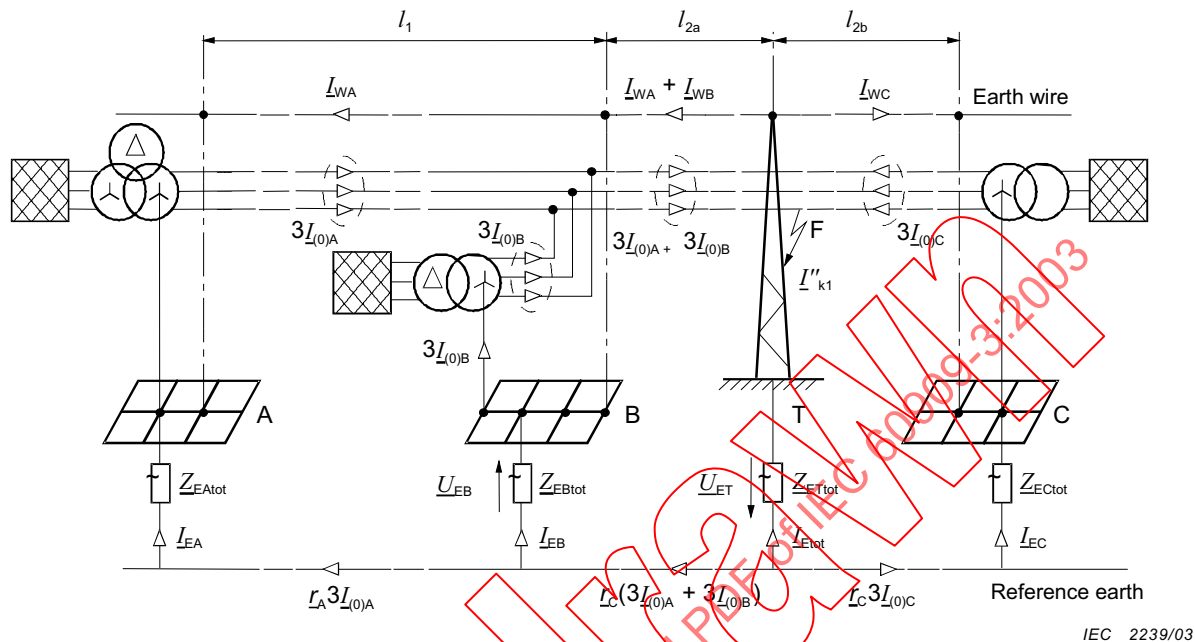


**Figure B.1 – Line-to-earth short circuit inside station B –
System diagram for stations A, B and C**

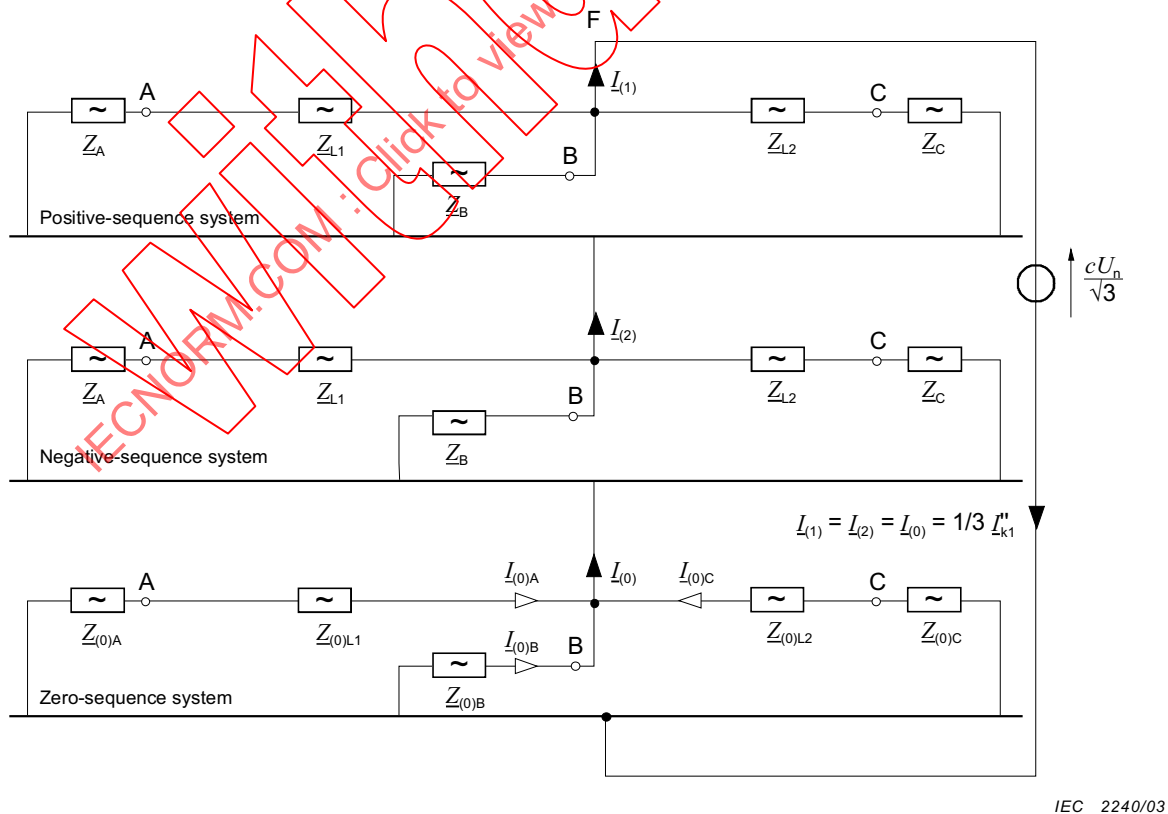


**Figure B.2 – Line-to-earth short circuit inside station B –
Positive-, negative- and zero-sequence systems with connections
at the short-circuit location F within station B**

Le courant de court-circuit monophasé à la terre peut être calculé conformément d'après l'Equation (52) de la CEI 60909-0 à l'aide de la Figure B.2.

$$\underline{I}_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot 11,132 \text{ kV}}{2 \cdot (0,222 + j4,876) \Omega + (0,115 + j6,157) \Omega} = (0,555 - j 15,789) \text{ kA}$$

où

$$\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)} = \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_A + \underline{Z}_{L1}} + \frac{1}{\underline{Z}_B} + \frac{1}{\underline{Z}_C + \underline{Z}_{L2}}} = (0,222 + j4,876) \Omega$$

$$\underline{Z}_{(0)} = \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_{(0)A} + \underline{Z}_{(0)L1}} + \frac{1}{\underline{Z}_{(0)B}} + \frac{1}{\underline{Z}_{(0)C} + \underline{Z}_{(0)L2}}} = (0,115 + j6,157) \Omega$$

Le courant homopolaire à l'emplacement du court-circuit est donné par

$$\underline{I}_{(0)} = \frac{1}{3} \underline{I}_{k1}'' = (0,1850 - j5,2630) \text{ kA}$$

Les courants homopolaires partiels conformément à la Figure B.2 sont indiqués comme suit:

$$\underline{I}_{(0)A} = (0,0753 - j 0,4439) \text{ kA}; \quad I_{(0)A} = 0,450 \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{(0)B} = (0,0723 - j 4,6319) \text{ kA}; \quad I_{(0)B} = 4,633 \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{(0)C} = (0,0334 - j 0,1873) \text{ kA}; \quad I_{(0)C} = 0,190 \text{ kA}$$

Le courant total à travers la terre à l'emplacement B du court-circuit en Figure B.1 est, conformément à l'Equation (15b):

$$\underline{I}_{\text{Etot}} = r \cdot (3\underline{I}_{(0)A} + 3\underline{I}_{(0)C}) = 0,6 \cdot 3 \cdot (0,1088 - j 0,6311) \text{ kA} = (0,1958 - j1,1360) \text{ kA};$$

$$I_{\text{Etot}} = 1,1528 \text{ kA}$$

L'impédance d'entrée $\underline{Z}_P$ est obtenu à partir de l'Equation (1):

$$\underline{Z}_P = 0,5(0,068 + j0,3204) \Omega + \sqrt{[0,5(0,068 + j0,3204) \Omega]^2 + 10 \Omega(0,068 + j0,3204) \Omega} = (1,4367 + j1,306) \Omega$$

L'impédance totale de terre $\underline{Z}_{\text{EBtot}}$ du poste B avec deux lignes sortantes est calculée avec l'Equation (16)

$$\underline{Z}_{\text{EBtot}} = \frac{1}{\frac{1}{5q} + \frac{1}{(1,4367 + j1,306)q}} = (0,6845 + j0,4928)q$$

et avec le résultat de l'Equation (17) le potentiel de terre du poste B:

The line-to-earth short-circuit current can be calculated according to IEC 60909-0, Equation (52) using Figure B.2.

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot 11 \cdot 132 \text{ kV}}{2 \cdot (0,222 + j4,876) \Omega + (0,115 + j6,157) \Omega} = (0,555 - j15,789) \text{ kA}$$

where

$$Z_{(1)} = Z_{(2)} = \frac{1}{\frac{1}{Z_A + Z_{L1}} + \frac{1}{Z_B} + \frac{1}{Z_C + Z_{L2}}} = (0,222 + j4,876) \Omega$$

$$Z_{(0)} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{(0)A} + Z_{(0)L1}} + \frac{1}{Z_{(0)B}} + \frac{1}{Z_{(0)C} + Z_{(0)L2}}} = (0,115 + j6,157) \Omega$$

The zero-sequence current at the short-circuit location is given by

$$I_{(0)} = \frac{1}{3} I_{k1}'' = (0,1850 - j5,2630) \text{ kA}$$

The partial zero-sequence currents according to Figure B.2 are found as follows:

$$I_{(0)A} = (0,0753 - j0,4439) \text{ kA}; \quad I_{(0)A} = 0,450 \text{ kA}$$

$$I_{(0)B} = (0,0723 - j4,6319) \text{ kA}; \quad I_{(0)B} = 4,633 \text{ kA}$$

$$I_{(0)C} = (0,0334 - j0,1873) \text{ kA}; \quad I_{(0)C} = 0,190 \text{ kA}$$

The total current through earth at the short-circuit location B in Figure B.1 is calculated with Equation (15b):

$$I_{Etot} = r \cdot (3I_{(0)A} + 3I_{(0)C}) = 0,6 \cdot 3 \cdot (0,1088 - j0,6311) \text{ kA} = (0,1958 - j1,1360) \text{ kA};$$

$$I_{Etot} = 1,1528 \text{ kA}$$

The driving point impedance Z_P is found from Equation (1):

$$Z_P = 0,5(0,068 + j0,3204) \Omega + \sqrt{[0,5(0,068 + j0,3204) \Omega]^2 + 10 \Omega(0,068 + j0,3204) \Omega} = (1,4367 + j1,306) \Omega$$

The total earth impedance Z_{EBtot} of station B with two outgoing lines is calculated with Equation (16)

$$Z_{EBtot} = \frac{1}{\frac{1}{5q} + \frac{2}{(1,4367 + j1,306)q}} = (0,6845 + j0,4928)q$$

and with this from Equation (17) the earth potential of station B:

$$\underline{U}_{EB} = (0,6845 + j0,4928) \Omega \cdot (0,1958 - j1,1360) \text{ kA} = (0,6938 - j0,6811) \text{ kV};$$

$$U_{EB} = 0,972 \text{ kV}$$

La distance «loin du poste» D_F (Equation (18)) est de:

$$D_F = 3\sqrt{R_T} \frac{d_T}{\operatorname{Re}\left\{\sqrt{Z_W}\right\}} = 3\sqrt{10\Omega} \frac{0,4\text{ km}}{\operatorname{Re}\left\{\sqrt{(0,068 + j0,3204)\Omega}\right\}} = 8,53\text{ km}$$

Loin des postes, c'est-à-dire à une distance supérieure à D_F , les courants dans le câble de garde des lignes aériennes sont donnés par l'Equation (19):

$$\underline{I}_{WA} = (1-r) \cdot 3\underline{I}_{0A} = 0,4 \cdot 3 \cdot (0,0753 - j0,4439) \text{ kA} = (0,0904 - j0,533) \text{ kA} ;$$

$$I_{WA} = 0,540 \text{ kA}$$

$$\underline{I}_{WC} = (1-r) \cdot 3\underline{I}_{0C} = 0,4 \cdot 3 \cdot (0,0334 - j0,1873) \text{ kA} = (0,0401 - j0,2247) \text{ kA},$$

$$I_{WC} = 0,228 \text{ kA}$$

Les courants maximaux totaux à travers la terre aux postes A et C sont:

$$I_{EA} = r \cdot 3I_{(0)A} = 0,6 \cdot 3 \cdot 0,450 \text{ kA} = 0,810 \text{ kA}$$

$$I_{EC} = r \cdot 3I_{(0)C} = 0,6 \cdot 3 \cdot 0,190 \text{ kA} = 0,342 \text{ kA}$$

B.3 Court-circuit monophasé à la terre en dehors d'un poste

Un court-circuit monophasé à la terre se produit à l'extérieur du poste au pylône T entre les postes B et C, $I_{2a} = 60$ km distants du poste B comme le montre la Figure B.3.

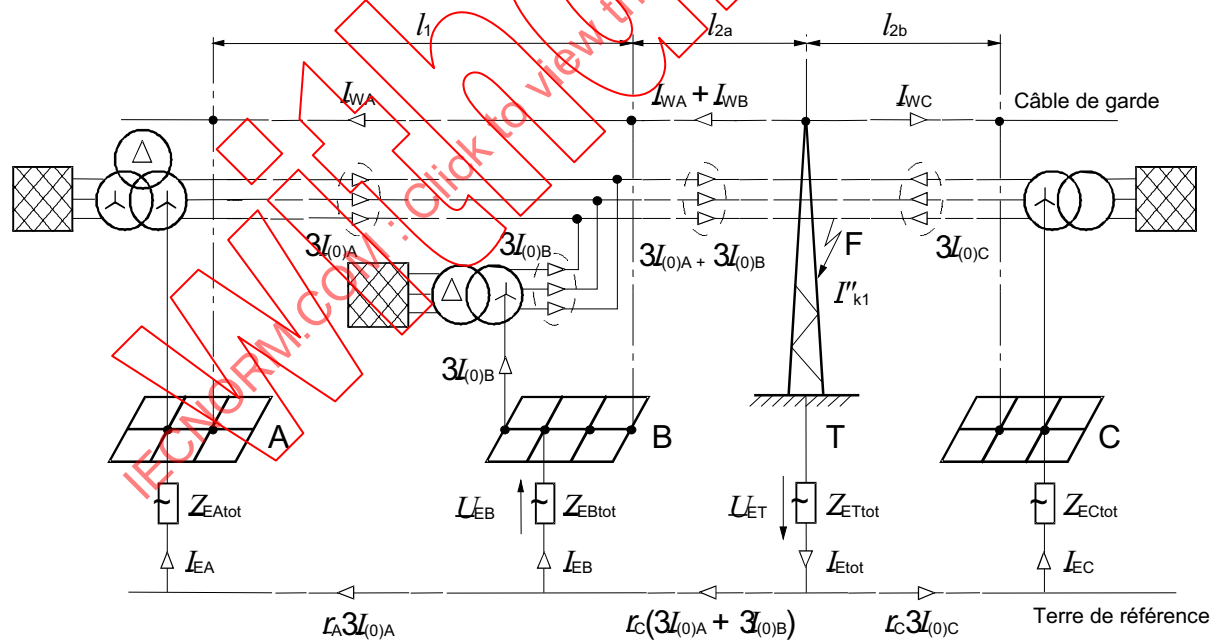


Figure B.3 – Court-circuit monophasé à la terre en dehors des postes A, B et C, sur le pylône T d'une ligne aérienne – Schéma du réseau pour les postes A, B et C