

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC
909-3**

Première édition
First edition
1995-09

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

Partie 3:

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

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

Part 3:

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



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 909-3: 1995

Validité de la présente publication

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

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

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

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

Terminologie

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

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

Symboles graphiques et littéraux

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

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

et pour les appareils électromédicaux,

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

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

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

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

Validity of this publication

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

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

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

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

Terminology

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

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

Graphical and letter symbols

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

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

and for medical electrical equipment,

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

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

IEC publications prepared by the same technical committee

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

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC
909-3**

Première édition
First edition
1995-09

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

Partie 3:

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

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

Part 3:

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

© CEI 1995 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 pro-
cédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et
les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

No part of this publication may be reproduced or utilized in
any form or by any means, electronic or mechanical,
including photocopying and microfilm, without permission
in writing from the publisher.

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale 3, rue de Varembe Genève, Suisse



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

U

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

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	4
Articles	
Section 1: Généralités	
1.1 Domaine d'application	6
1.2 Références normatives	8
1.3 Définitions	8
1.3.1 Deux court-circuits monophasés simultanés séparés à la terre	8
1.3.2 Courant initial durant deux court-circuits monophasés simultanés séparés à la terre I''_{KEE}	8
1.3.3 Courant à la terre total I_{Etot} à l'emplacement du court-circuit	8
1.3.4 Courant de court-circuit partiel à travers la terre $\leq 3I_{(0)}$	10
1.3.5 Facteur de réduction d'une ligne α	10
1.3.6 Impédance d'entrée Z_p	10
1.4 Symboles	12
Section 2: Courants durant deux court-circuits monophasés simultanés séparés à la terre	
2.1 Méthode de calcul	14
2.1.1 Courant de court-circuit symétrique initial	14
2.1.2 Valeur de crête du courant de court-circuit, courant de court-circuit symétrique coupé et courant de court-circuit permanent	18
2.1.3 Répartition des courants de court-circuits à la terre pendant deux courants de court-circuits monophasés simultanés séparés à la terre	20
Section 3: Courants de court-circuit partiels s'écoulant à travers la terre dans le cas d'un court-circuit déséquilibré	
3.1 Méthode de calcul	22
3.1.1 Généralités	22
3.1.2 Court-circuit monophasé à la terre dans un poste	22
3.1.3 Court-circuit monophasé à la terre en dehors d'un poste	26
3.1.4 Facteur de réduction des lignes aériennes et des câbles	28
Annexes	
A Exemple de calcul de deux court-circuits monophasés simultanés séparés à la terre	34
A.1 Données	34
A.2 Calculs	36
B Exemples de calcul de courants de court-circuit partiels à travers la terre	40
B.1 Données	40
B.2 Premier cas: Calcul d'un courant de court-circuit monophasé à la terre dans un poste	42
B.3 Deuxième cas: Calcul d'un courant de court-circuit monophasé à la terre en dehors d'un poste	48

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
Clause	
Section 1: General	
1.1 Scope	7
1.2 Normative references	9
1.3 Definitions	9
1.3.1 Two separate simultaneous single phase line-to-earth short circuits ...	9
1.3.2 Initial short-circuits currents during two separate simultaneous single phase line-to-earth short circuits I''_{kEE}	9
1.3.3 Total earth current I_{Etot} at the short-circuit location	9
1.3.4 Partial short-circuit current through earth $\underline{r}$ $3I_{L(0)}$	11
1.3.5 Reduction factor of line $\underline{r}$	11
1.3.6 Driving point impedance $\underline{Z}_p$	11
1.4 Symbols	13
Section 2: Currents during two separate simultaneous single phase line-to-earth short circuits	
2.1 Calculation method	15
2.1.1 Initial symmetrical short-circuit current	15
2.1.2 Peak short-circuit current, symmetrical short-circuit breaking current and steady-state short-circuit current	19
2.1.3 Distribution of line-to-earth short-circuit currents during two separate simultaneous single phase line-to-earth short circuits ...	21
Section 3: Partial short-circuit currents flowing through earth in the case of an unbalanced short circuit	
3.1 Calculation method	23
3.1.1 General	23
3.1.2 Line-to-earth short circuit in a station	23
3.1.3 Line-to-earth short circuit outside a station	27
3.1.4 Reduction factor for overhead lines and cables	29
Annexes	
A Example for the calculation of two separate simultaneous single-phase line-to-earth short-circuit currents	35
A.1 Data	35
A.2 Calculations	37
B Examples for the calculation of partial short-circuit currents through earth	41
B.1 Data	41
B.2 Case 1: Calculation of line-to-earth short-circuit current in a station	43
B.3 Case 2: Calculation of line-to-earth short-circuit current outside a station	49

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

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

PARTIE 3: COURANTS DURANT DEUX COURT-CIRCUITS MONOPHASÉS SIMULTANÉS SÉPARÉS À LA TERRE ET COURANTS DE COURT-CIRCUIT PARTIELS S'ÉCOULANT À TRAVERS LA TERRE

AVANT-PROPOS

- 1) La CEI (Commission Electrotechnique Internationale) 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. 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 en ce qui concerne les questions techniques, préparés par les comités d'études où sont représentés tous les Comités nationaux s'intéressant à ces questions, expriment dans la plus grande mesure possible un accord international sur les sujets examinés.
- 3) Ces décisions constituent des recommandations internationales publiées sous forme de normes, de rapports techniques ou de guides et agréées comme telles par les Comités nationaux.
- 4) Dans le but d'encourager l'unification internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent à appliquer de façon transparente, dans toute la mesure possible, les Normes internationales de la CEI dans leurs normes nationales et régionales. Toute divergence entre la norme de la CEI et la norme nationale ou régionale correspondante doit être indiquée en termes clairs dans cette dernière.

La Norme internationale CEI 909-3 a été établie par le comité d'études 73 de la CEI: Courants de court-circuit.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

DIS	Rapport de vote
73/71/DIS	73/78/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.

Les annexes A et B sont données uniquement à titre d'information.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**SHORT-CIRCUIT CURRENT CALCULATION
IN THREE-PHASE A.C. SYSTEMS****PART 3: CURRENTS DURING TWO SEPARATE SIMULTANEOUS
SINGLE PHASE LINE-TO-EARTH SHORT CIRCUITS
AND PARTIAL SHORT-CIRCUIT CURRENTS
FLOWING THROUGH EARTH**

FOREWORD

- 1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the IEC is to promote international cooperation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, the IEC publishes International Standards. 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. The 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 the IEC on technical matters, prepared by technical committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.
- 3) They have the form of recommendations for international use published in the form of standards, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.

International Standard IEC 909-3 has been prepared by IEC technical committee 73: Short-circuit currents.

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

DIS	Report on voting
73/71/DIS	73/78/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.

Annexes A and B are for information only.

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

PARTIE 3: COURANTS DURANT DEUX COURT-CIRCUITS MONOPHASÉS SIMULTANÉS SÉPARÉS À LA TERRE ET COURANTS DE COURT-CIRCUIT PARTIELS S'ÉCOULANT À TRAVERS LA TERRE

Section 1: Généralités

1.1 Domaine d'application

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

- a) courants durant deux court-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 défaut 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 doivent être utilisés pour la détermination des tensions induites ou des tensions de contact ou de pas, et la montée du potentiel de terre dans un 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;
- b) les courants de court-circuit dans les installations électriques à bord des navires ou des avions;
- c) les simples défauts 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 court-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 calcul numérique.

La présente norme constitue un complément à la CEI 909. 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'exclue 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.

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

PART 3: CURRENTS DURING TWO SEPARATE SIMULTANEOUS SINGLE PHASE LINE-TO-EARTH SHORT CIRCUITS AND PARTIAL SHORT-CIRCUIT CURRENTS FLOWING THROUGH EARTH

Section 1: General

1.1 Scope

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

- a) currents during two separate simultaneous single phase 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 fault in solidly earthed or low-impedance earthed neutral systems.

The currents calculated by these procedures are to be used when determining induced voltages or touch or step voltages and rise of earth potential at a 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 single phase short circuit 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, analogue simulations or digital computation.

This standard is an addition to IEC 909. 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.

Comme indiqué dans la CEI 909, les courants de court-circuit et leurs paramètres peuvent aussi être déterminés par des essais du réseau, par des mesures sur un analyseur de réseau ou avec un calculateur numérique.

Le calcul des paramètres du 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.

1.2 Références normatives

Le document normatif suivant contient des dispositions qui, par suite de la référence qui en est faite, constituent des dispositions valables pour la présente norme internationale. Au moment de la publication, l'édition indiquée était en vigueur. Tout document normatif est sujet à révision, et les parties prenantes des accords fondés sur la présente norme internationale sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer l'édition la plus récente du document normatif indiqué ci-après. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des Normes internationales en vigueur à un moment donné.

CEI 909: 1988, *Calcul des courants de court-circuit dans les réseaux triphasés à courant alternatif*.

CEI 909-1: 1991, *Calcul des courants de court-circuit dans les réseaux triphasés à courant alternatif – Partie 1: Facteurs pour le calcul des courants de court-circuit dans les réseaux alternatifs triphasés conformément à la CEI 909*.

CEI 909-2: 1992, *Calcul des courants de court-circuit dans les réseaux triphasés à courant alternatif – Matériel électrique – Données pour le calcul des courants de court-circuit conformément à la CEI 909 (1988)*.

1.3 Définitions

Pour les besoins de la présente norme, les définitions suivantes s'appliquent.

1.3.1 Deux court-circuits monophasés simultanés séparés à la terre

Court-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 est mis à la terre par une bobine d'extinction.

1.3.2 Courant initial durant deux court-circuits monophasés simultanés séparés à la terre I''_{kEE}

Valeur efficace du courant de court-circuit initial circulant avec la même amplitude aux deux emplacements, au moment des deux court-circuits monophasés simultanés séparés à la terre.

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

Valeur efficace du courant total s'écoulant par le réseau de terre d'un poste (centrale, poste de transformation ou de couplage) ou par l'impédance de pied d'un pylône de ligne aérienne et par des conducteurs mis à la terre. De tels conducteurs peuvent être des câbles de garde de ligne aérienne ou bien des gaines, écrans ou armures de câbles.

As stated in IEC 909, short-circuit currents and their parameters may also be determined by system tests, by measurement on a network analyzer, or with a digital computer.

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.

1.2 Normative references

The following normative document contains provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this International Standard. At the time of publication, the edition indicated was valid. All normative documents are subject to revision, and parties to agreement based on this International Standard are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent edition of the normative documents indicated below. Members of IEC and ISO maintain registers of currently valid International Standards.

IEC 909: 1988, *Short-circuit current calculation in three-phase a.c. systems*.

IEC 909-1: 1991, *Short-circuit current calculation in three-phase a.c. systems – Part 1: Factors for the calculation of short-circuit currents in three-phase a.c. systems according to IEC 909*.

IEC 909-2: 1991, *Short-circuit current calculation in three-phase a.c. systems – Electrical equipment – Data for short-circuit current calculations in accordance with IEC 909 (1988)*.

1.3 Definitions

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

1.3.1 Two separate simultaneous single phase line-to-earth short circuits

Line-to-earth short circuits at different locations at the same time in different phases of a three-phase a.c. system having a resonant earthed or an isolated neutral.

1.3.2 Initial short-circuit currents during two separate simultaneous single phase line-to-earth short circuits I''_{kEE}

The 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.

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

The r.m.s. value of the total current flowing through the earthing system of a station (power station, transformer or switching station) or the footing impedance of an overhead line tower and through earthed conductors to earth. Such conductors may be earth wires of overhead lines or sheaths, shielding or armouring of cables.

1.3.4 Courant de court-circuit partiel à travers la terre $\underline{I}_{(0)}$

Amplitude de 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 $\underline{r}$.

1.3.5 Facteur de réduction d'une ligne $\underline{r}$

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.

1.3.6 Impédance d'entrée $\underline{Z}_p$

Dans le cas d'une ligne aérienne, impédance constituée de l'impédance du câble de garde $\underline{Z}_W$ entre deux pylônes avec retour par la terre, et de la résistance de pied de pylône R_T . L'impédance d'entrée est définie pour une direction par

$$\underline{Z}_p = \frac{\underline{Z}_W}{2} + \sqrt{\left[\frac{\underline{Z}_W}{2}\right]^2 + \underline{Z}_W R_T} = \frac{\underline{Z}_W}{2} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{4 R_T}{\underline{Z}_W}} \right] \quad (1)$$

avec $\underline{Z}_W = \underline{Z}'_W \cdot d_T$

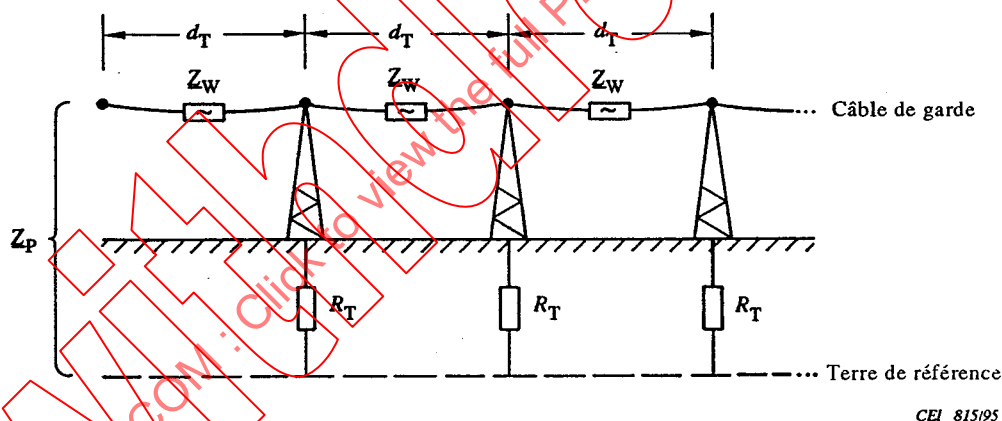


Figure 1 – Chaîne infinie constituée par l'impédance du câble de garde $\underline{Z}_W$ et la résistance de pied des pylônes R_T , séparées par des distances identiques d_T

NOTE - L'impédance d'entrée $\underline{Z}_p$ peut être supposée constante à une distance de l'emplacement du court-circuit, F , supérieure à la distance "loin du poste" D_F définie par l'équation (16).

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

1.3.4 Partial short-circuit current through earth $\underline{I}_{(0)}$

The magnitude of the 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 $\underline{r}$.

1.3.5 Reduction factor of line $\underline{r}$

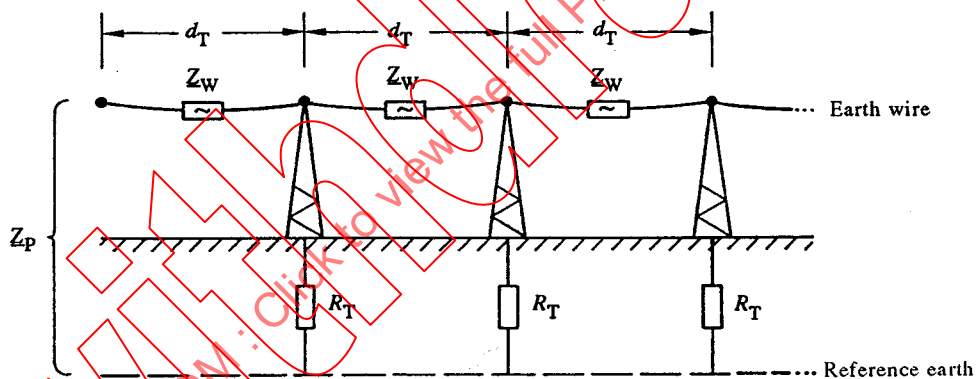
The factor which determines the part of the zero-sequence current flowing through earth remote from the short-circuit location and the earthing system of a station.

1.3.6 Driving point impedance $\underline{Z}_p$

In the case of an overhead line, the driving point impedance is composed of the earth-wire impedance $\underline{Z}_w$ between two towers with earth return, and the tower footing resistance R_T . The driving point impedance is defined for one direction by:

$$\underline{Z}_p = \frac{\underline{Z}_w}{2} + \sqrt{\left[\frac{\underline{Z}_w}{2}\right]^2 + \underline{Z}_w \cdot R_T} = \frac{\underline{Z}_w}{2} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{4 R_T}{\underline{Z}_w}} \right] \quad (1)$$

with $\underline{Z}_w = \underline{Z}'_w \cdot d_T$



IEC 815/95

Figure 1 – Infinite chain composed by the earth-wire impedance $\underline{Z}_w$ and the footing resistance R_T of towers separated with equal distances d_T

NOTE - The driving point impedance $\underline{Z}_p$ can be assumed constant at a distance from the short-circuit point F , longer than the far-from-station distance D_F defined by equation (16).

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

1.4 Symboles

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

c	Facteur de tension selon le tableau I de la CEI 909
$cU_n/\sqrt{3}$	Source de tension équivalente (valeur efficace), voir CEI 909
D_F	Distance "loin du poste"
d_T	Distance entre pylônes, voir fig. 1
I_{bEE}	Courant de court-circuit coupé (valeur efficace)
I_{Etot}	Courant de terre total à l'emplacement du court-circuit (valeur efficace)
I''_{k1}	Courant de court-circuit monophasé à la terre initial (valeur efficace)
I''_{kEE}	Courant de court-circuit initial durant deux court-circuits monophasés simultanés séparés à la terre (valeur efficace)
I''_{kE2E}	Courant de court-circuit initial (valeur efficace) s'écoulant par la terre dans le cas d'un court-circuit biphasé à la terre, voir la CEI 909
i_{pEE}	Valeur de crête du courant de court-circuit
$\underline{M}_{(1)}, \underline{M}_{(2)}$	Impédance de couplage du système respectivement directe et inverse
R'_S	Composante résistive linéique de l'impédance propre d'une gaine à la terre
R_E	Résistance du réseau de terre
R_T	Résistance de pied d'un pylône de ligne aérienne
r	Facteur de réduction
$r \cdot 3I_{(0)}$	Courant de court-circuit partiel à travers 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
$\underline{Z}_{(2)A}, \underline{Z}_{(2)B}$	Impédance de court-circuit inverse du réseau triphasé à courant alternatif aux emplacements de court-circuit A et B
$\underline{Z}_{(0)}$	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)
$\underline{Z}'_S$	Impédance linéique d'une gaine à la terre
$\underline{Z}_E$	Impédance totale de terre dans une station
$\underline{Z}_P$	Impédance d'entrée selon l'équation (1) et la figure 1
$\underline{Z}_{ET}$	Impédance totale de terre du pylône où se situe le court-circuit
$\underline{Z}_U$	Impédance d'entrée des gaines, écrans ou armures de câble
$\underline{Z}_W = \underline{Z}'_W \cdot d_T$	Impédance du câble de garde avec retour par la terre entre deux pylônes
$\underline{Z}'_W$	Impédance linéique du câble de garde avec retour par la terre
$\underline{Z}'_{WL}$	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

1.4 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 I of IEC 909
$cU_n/\sqrt{3}$	Equivalent voltage source (r.m.s.), see IEC 909
D_F	Far-from-station distance
d_T	Distance between towers, see fig. 1.
I_{bEE}	Short-circuit breaking current (r.m.s.)
I_{Etot}	Total earth current at the short-circuit location (r.m.s.)
I''_{k1}	Initial line-to-earth short-circuit current (r.m.s.)
I''_{kEE}	Initial short-circuit current during two separate simultaneous single-phase line-to-earth short circuit (r.m.s.)
I''_{kE2E}	Initial short-circuit current (r.m.s) flowing to earth in the case of a line-to-line short circuit with earth connection, see IEC 909.
i_{pEE}	Peak short-circuit current
$\underline{M}_{(1)}, \underline{M}_{(2)}$	Coupling impedance, in the positive- resp. negative-sequence system
R'_S	Resistive component of the sheath to earth self impedance per unit length
R_E	Resistance of earth grid
R_T	Footing resistance of an overhead line tower
ε	Reduction factor
$\varepsilon 3I_{(0)}$	Partial short-circuit current through earth at a distance larger than D_F
$\underline{Z}_{(1)A}, \underline{Z}_{(1)B}$	Positive-sequence short-circuit impedance of the three-phase a.c. system at the short-circuit locations A and B
$\underline{Z}_{(2)A}, \underline{Z}_{(2)B}$	Negative-sequence short-circuit impedance of the three-phase a.c. system at the short-circuit locations A and B
$\underline{Z}_{(0)}$	Zero-sequence short-circuit impedance of the entire network between the short-circuit locations A and B (admittances between phases and earth are disregarded)
$\underline{Z}'_S$	Sheath to earth impedance per unit length
$\underline{Z}_E$	Total earth impedance in a station
$\underline{Z}_{ET}$	Total earth impedance of the short-circuited tower
$\underline{Z}_P$	Driving point impedance according to equation (1) and fig. 1.
$\underline{Z}_U$	Input impedance of sheaths, shielding or armouring of cables
$\underline{Z}_W = \underline{Z}'_W \cdot d_T$	Earth-wire impedance with earth return between two towers
$\underline{Z}'_W$	Per unit length earth-wire impedance with earth return
$\underline{Z}'_{WL}$	Per unit length mutual impedance between earth wires and the line conductors with common earth return
δ	Equivalent earth penetration depth
ρ	Soil resistivity

Section 2: Courants durant deux court-circuits monophasés simultanés séparés à la terre

2.1 Méthode de calcul

2.1.1 Courant de court-circuit symétrique initial

La figure 2 montre les courants de court-circuit I''_{kEE} dans le cas de deux court-circuits monophasés simultanés séparés à la terre dans des phases distinctes aux emplacements A et B séparés par une distance non nulle.

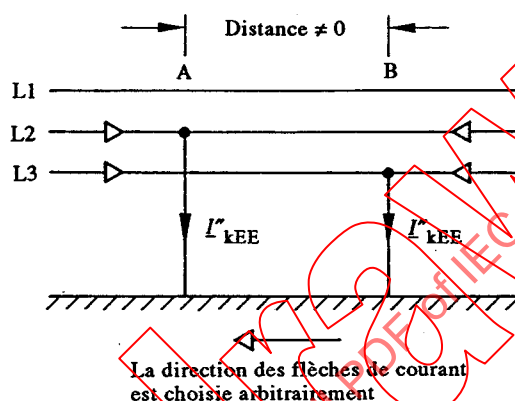


Figure 2 – Représentation de deux court-circuits monophasés simultanés séparés à la terre et du courant I''_{kEE}

Dans les réseaux avec 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

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

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

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

Pour le calcul du courant de court-circuit maximal conformément à la CEI 909, d'impédance totale de terre Z_E peut être négligée pour un court-circuit avec mise à la terre dans une station ou sur un pylône, équations (14) et (19).

NOTE - Pour la résolution de l'équation (2) voir les Directives du CCITT, UIT Genève, volume V, Chapitre 5.

Section 2: Currents during two separate simultaneous single phase line-to-earth short circuits

2.1 Calculation method

2.1.1 Initial symmetrical short-circuit current

Figure 2 shows the short-circuit current I''_{kEE} during two separate simultaneous single phase line-to-earth short circuits in different phases at the locations A and B with a distance between them $\neq 0$.

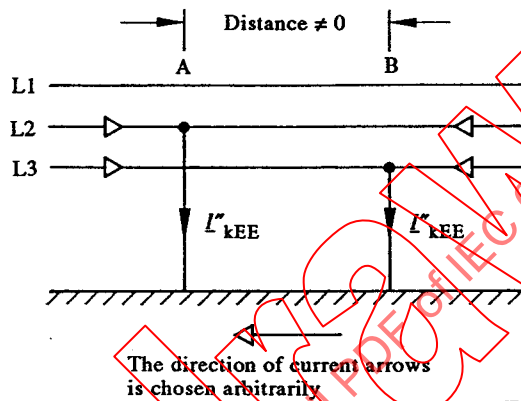


Figure 2 – Characterization of two separate simultaneous single phase line-to-earth short circuits and the current I''_{kEE}

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

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

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

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

For calculation of the maximum short-circuit current according to IEC 909, the total earth impedance Z_E is to be disregarded for a short circuit with earth connection in a station or at a tower, equations (14) and (19).

NOTE - For derivation of equation (2) see CCITT-Directives, ITU Geneva, volume V, Chapter 5.

2.1.1.1 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 indiqué ci-après:

Une source de 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

$$\underline{M}_{(1)} = \frac{\underline{U}_{(1)B}}{\underline{I}_{(1)A}} \quad \underline{M}_{(2)} = \frac{\underline{U}_{(2)B}}{\underline{I}_{(2)A}} \quad (4)$$

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

$$\underline{M}_{(1)} = \frac{\underline{U}_{(1)A}}{\underline{I}_{(1)B}} \quad \underline{M}_{(2)} = \frac{\underline{U}_{(2)A}}{\underline{I}_{(2)B}} \quad (5)$$

2.1.1.2 Exemples simples de deux court-circuits monophasés simultanés séparés à la terre

Dans des cas simples les courants de deux court-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 équations (6) à (8), données dans le tableau 1, sont déduites de l'équation (2). Les indices des équations (6) à (8) se rapportent aux impédances appropriées dans les circuits correspondants.

2.1.1.1 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

$$\underline{M}_{(1)} = \frac{\underline{U}_{(1)B}}{\underline{I}_{(1)A}} \quad \underline{M}_{(2)} = \frac{\underline{U}_{(2)B}}{\underline{I}_{(2)A}} \quad (4)$$

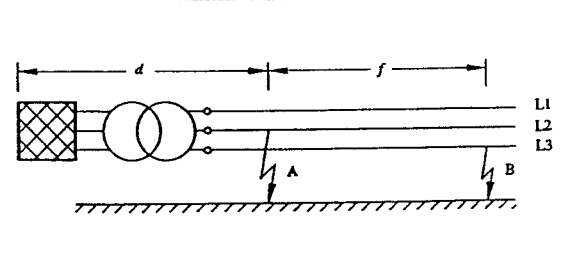
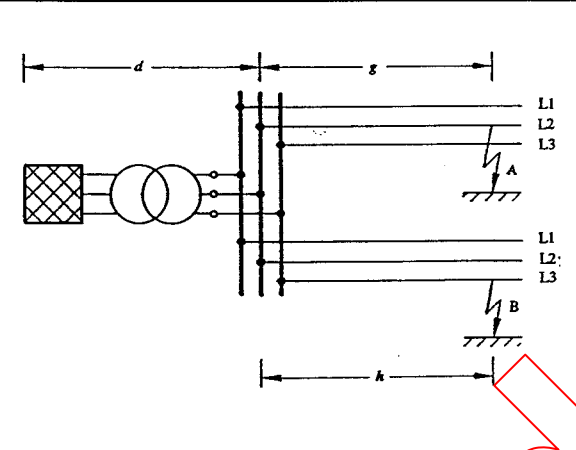
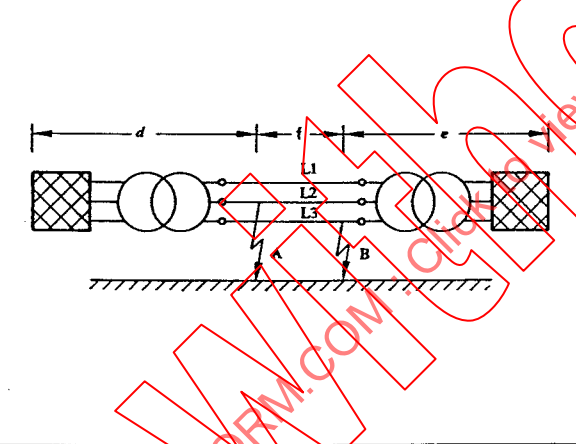
The coupling impedances $\underline{M}_{(1)}$ and $\underline{M}_{(2)}$ may also be determined at the short-circuit location B instead of the location A by using

$$\underline{M}_{(1)} = \frac{\underline{U}_{(1)A}}{\underline{I}_{(1)B}} \quad \underline{M}_{(2)} = \frac{\underline{U}_{(2)A}}{\underline{I}_{(2)B}} \quad (5)$$

2.1.1.2 Simple cases of two separate simultaneous single phase line-to-earth short circuits

In simple cases the two separate simultaneous single phase 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 equation (6) to (8), shown in table 1, are derived from equation (2). The indices in equation (6) to (8) refer to the relevant impedances in the respective circuits.

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

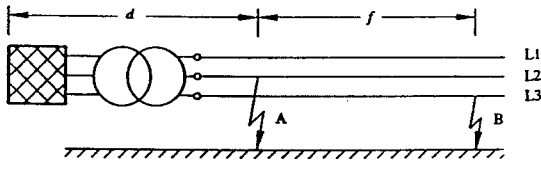
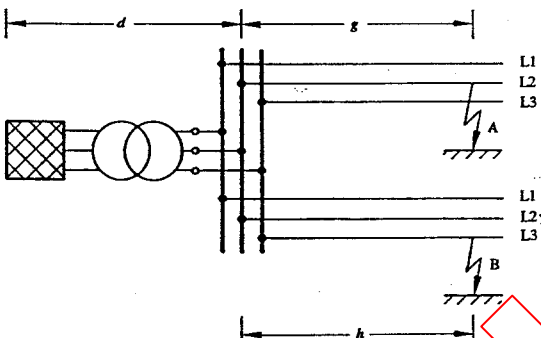
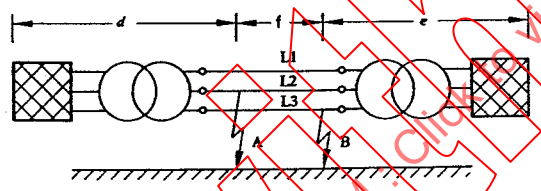
a)		ligne alimentée en antenne $I''_{kEE} = \frac{3cU_n}{ 6Z_{(1)d} + 2Z_{(1)f} + Z_{(0)f} } \quad (6)$
b)		deux lignes alimentées en antenne $I''_{kEE} = \frac{3cU_n}{ 6Z_{(1)d} + 2(Z_{(1)g} + Z_{(1)h}) + Z_{(0)g} + Z_{(0)h} } \quad (7)$
c)		ligne à double alimentation $I''_{kEE} = \frac{3cU_n}{\left \frac{6Z_{(1)d} Z_{(1)e} + 2 Z_{(1)f} (Z_{(1)d} + Z_{(1)e})}{Z_{(1)d} + Z_{(1)f} + Z_{(1)e}} + Z_{(0)f} \right } \quad (8)$
Pour $Z_{(0)}$, la remarque à la suite de l'équation (3) doit être prise en considération. Le facteur de tension c doit être pris dans le tableau I de la CEI 909.		

2.1.2 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 909 à l'aide de

$$i_{pEE} = \kappa \sqrt{2} I''_{kEE} \quad (9)$$

Table 1 – Calculation of initial line-to-earth currents in a simple case

a) 	single-fed radial line $I''_{kEE} = \frac{3cU_n}{ 6Z_{(1)d} + 2Z_{(1)f} + Z_{(0)f} } \quad (6)$
b) 	two single-fed radial lines $I''_{kEE} = \frac{3cU_n}{ 6Z_{(1)d} + 2(Z_{(1)g} + Z_{(1)h}) + Z_{(0)g} + Z_{(0)h} } \quad (7)$
c) 	double-fed single lines $I''_{kEE} = \frac{3cU_n}{\left \frac{6Z_{(1)d}Z_{(1)e} + 2Z_{(1)f}(Z_{(1)d} + Z_{(1)e)})}{Z_{(1)d} + Z_{(1)f} + Z_{(1)e}} + Z_{(0)f} \right } \quad (8)$
For $Z_{(0)}$, the remark after equation (3) shall be considered. The voltage factor c shall be taken from table I of IEC 909.	

2.1.2 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 909 using

$$i_{pEE} = \kappa \sqrt{2} I''_{kEE} \quad (9)$$

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

$$I_{kEE} = I_{bEE} = I''_{kEE} \quad (10)$$

2.1.3 Répartition des courants de court-circuits à la terre pendant deux courants de court-circuits monophasés simultanés séparés à la terre

Si deux court-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 $r \cdot 3I_{(0)} = r \cdot I''_{kEE}$ est la seule source active de courant alimentant le système homopolaire en A et B; toutes les autres sources sont négligées.

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

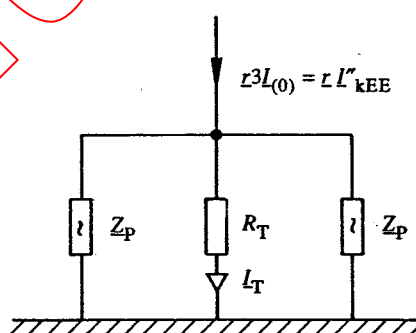
$$I_T = r \cdot I''_{kEE} \frac{Z_p}{Z_p + 2R_T} \quad (11)$$

où

r est le facteur de réduction de la ligne aérienne, selon 3.1.4;

R_T est la résistance de pied de pylône;

Z_p est l'impédance d'entrée selon 1.3.6.



CEI 817/95

Figure 3 – Répartition du courant de court-circuit partiel à travers la terre $r \cdot 3I_{(0)}$ sur les pylônes A et B

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

$$I_{kEE} = I_{bEE} = I''_{kEE} \quad (10)$$

2.1.3 Distribution of line-to-earth short-circuit currents during two separate simultaneous single phase 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 $\epsilon \cdot 3I_{(0)} = \epsilon \cdot I''_{kEE}$ as the only active current source feeding the zero-sequence system in A and B; all other sources are disregarded.

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 to earth in figure 3 becomes

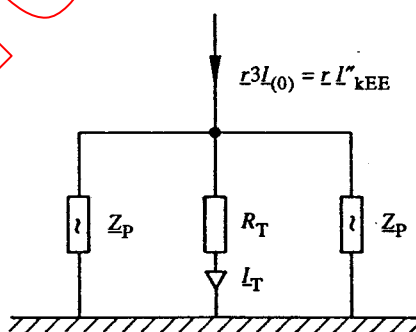
$$I_T = \epsilon \cdot I''_{kEE} \frac{Z_p}{Z_p + 2R_T} \quad (11)$$

where

ϵ is the reduction factor of the overhead line according to 3.1.4;

R_T is the footing resistance of the tower;

Z_p is the driving point impedance according to 1.3.6.



IEC 817/95

Figure 3 – Distribution of the partial short-circuit current $\epsilon \cdot 3I_{(0)}$ through earth on the towers A and B

Section 3: Courants de court-circuit partiels s'écoulant à travers la terre dans le cas d'un court-circuit déséquilibré

3.1 Méthode de calcul

3.1.1 Généralités

Les paragraphes 3.1.2 et 3.1.3 traitent des courants de court-circuit 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 ou gaines conductrices, écrans et armures de câbles), dans le cas de courts-circuits monophasés à la terre. Ce type de court-circuit est le défaut se produisant le plus fréquemment dans les réseaux haute-tension mis directement à la terre. Il conduit aux courants de court-circuit partiels à la terre les plus élevés si $Z_{(0)}$ est supérieur à $Z_{(1)}$.

Lorsque $Z_{(0)}$ est inférieur à $Z_{(1)}$ et dans le cas d'un court-circuit biphasé à la terre, le courant à travers la terre I''_{KE2E} doit être pris en considération conformément à la CEI 909.

De plus les postes A, B et C sont supposés être séparés par plus que deux fois la distance "loin du poste" D_F selon l'équation (16).

Pour le calcul du courant de court-circuit maximal conformément à la CEI 909, les impédances des pylônes, avec ou sans câble de garde, et les impédances des réseaux de terre et des autres connections 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.

3.1.2 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.

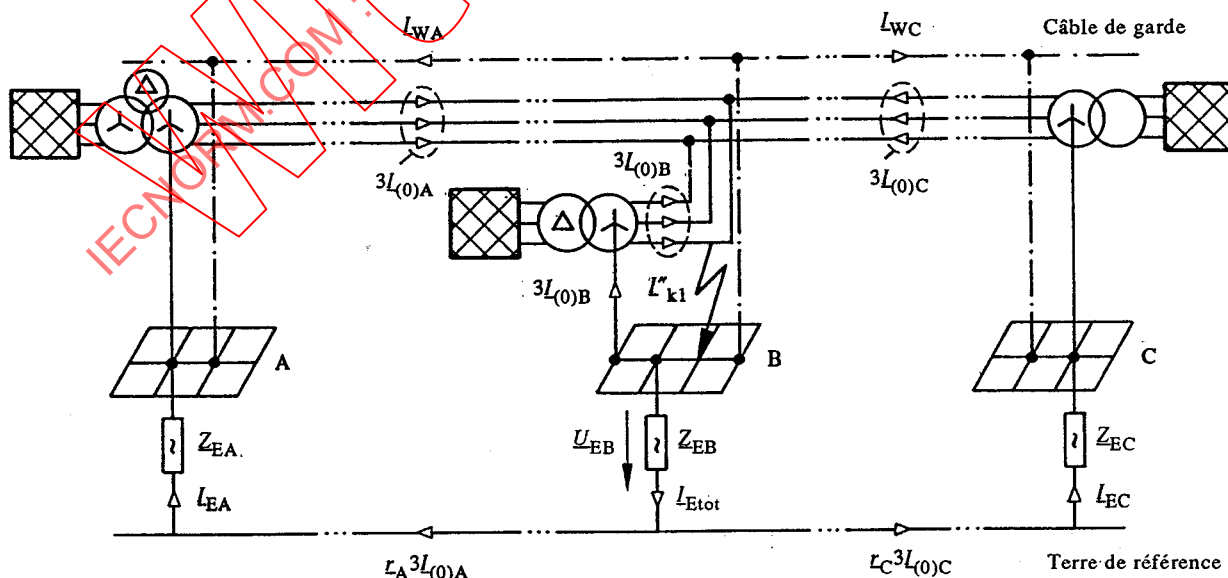


Figure 4 – Courants de court-circuit partiels dans le cas d'un court-circuit monophasé à la terre dans le poste B

Section 3: Partial short-circuit currents flowing through earth in the case of an unbalanced short circuit

3.1 Calculation method

3.1.1 General

Subclauses 3.1.2 and 3.1.3 deal with partial short-circuit currents flowing through earth and earthed conductors (e.g. earthing systems, earth wires of overhead lines resp. 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 system fault. It leads to the greatest partial earth short-circuit currents 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 909.

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 (16).

For calculation of the maximum short-circuit current according to IEC 909, the tower impedances 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.

3.1.2 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.

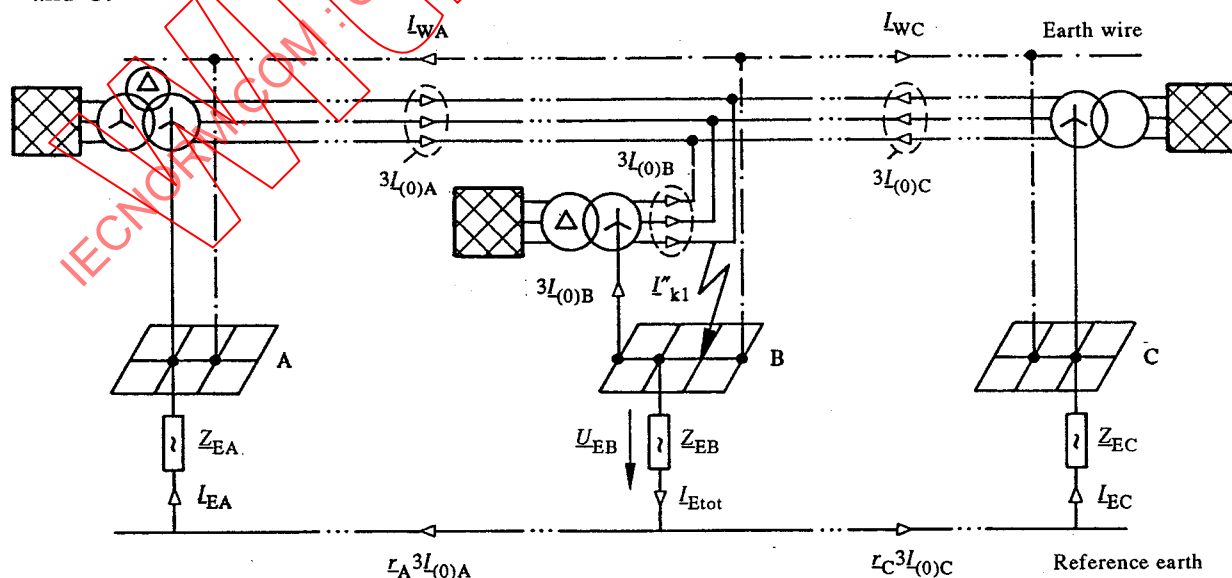


Figure 4 – Partial short-circuit currents in the case of a line-to-earth short circuit inside the station B

Un ou plusieurs des transformateurs du poste B sont directement mis à la terre. 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

$$I''_{k1} = 3I_{(0)A} + 3I_{(0)B} + 3I_{(0)C} \quad (12)$$

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:

$$I_{Etot} = \Sigma L \cdot 3I_{(0)} \quad (13a)$$

c'est-à-dire selon la figure 4

$$I_{Etot} = L_A \cdot 3I_{(0)A} + L_C \cdot 3I_{(0)C} \quad (13b)$$

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

$$Z_E = \frac{1}{\frac{1}{R_E} + \Sigma \frac{1}{Z_p} + \Sigma \frac{1}{Z_u}} \quad (14)$$

où

R_E est la résistance du réseau de terre;

Z_p est l'impédance d'entrée selon 1.3.6;

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

Le potentiel de la terre au poste B est

$$U_{EB} = Z_{EB} \cdot I_{Etot} \quad (15)$$

Les équations (13a) et (13b) supposent que la distance entre le poste B et les postes A et C est supérieure à la distance "loin du poste" D_F avec

$$D_F = 3\sqrt{R_T} \frac{d_T}{\text{Re} \{\sqrt{Z_W}\}} \quad (16)$$

où

R_T est la résistance de pied des pylônes;

d_T est la distance entre pylônes;

$\text{Re}\{\sqrt{Z_W}\}$ 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'équation (24).

Autrement le courant total à la terre I_{Etot} est réduit par une fraction trop importante du courant de double court-circuit monophasé à la terre s'écoulant vers le poste le plus proche A ou C par les câbles de garde. La répartition des courants 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 L_A et L_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.

One or more of the transformers in station B are directly earthed. 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:

$$I''_{k1} = 3I_{(0)A} + 3I_{(0)B} + 3I_{(0)C} \quad (12)$$

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

$$I_{Etot} = \Sigma L \cdot 3I_{(0)} \quad (13a)$$

i.e. in figure 4

$$I_{Etot} = r_A \cdot 3I_{(0)A} + r_C \cdot 3I_{(0)C} \quad (13b)$$

The earthing impedance of a station is

$$Z_E = \frac{1}{\frac{1}{R_E} + \Sigma \frac{1}{Z_P} + \Sigma \frac{1}{Z_U}} \quad (14)$$

where

R_E is the resistance of earth grid;

Z_P is the driving point impedance according to 1.3.6;

Z_U is the input impedance of sheaths, shielding or armouring of cables.

The earth potential at the station B is:

$$U_{EB} = Z_{EB} \cdot I_{Etot} \quad (15)$$

Equations (13a) and (13b) suppose, that the distance from the station B to the stations A and C is longer than the far-from-station distance D_F with

$$D_F = 3\sqrt{R_T} \frac{d_T}{\text{Re} \{\sqrt{Z_W}\}} \quad (16)$$

where

R_T is the tower footing resistance;

d_T is the tower distance;

$\text{Re}\{\sqrt{Z_W}\}$ 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 (24).

Otherwise the 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. The division of the short-circuit currents 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.

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

$$L_{WA} = (1 - r_A) 3 L_{(0)A} \quad (17a)$$

$$L_{WC} = (1 - r_C) 3 L_{(0)C} \quad (17b)$$

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

3.1.3 Court-circuit monophasé à la terre en dehors d'un 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.

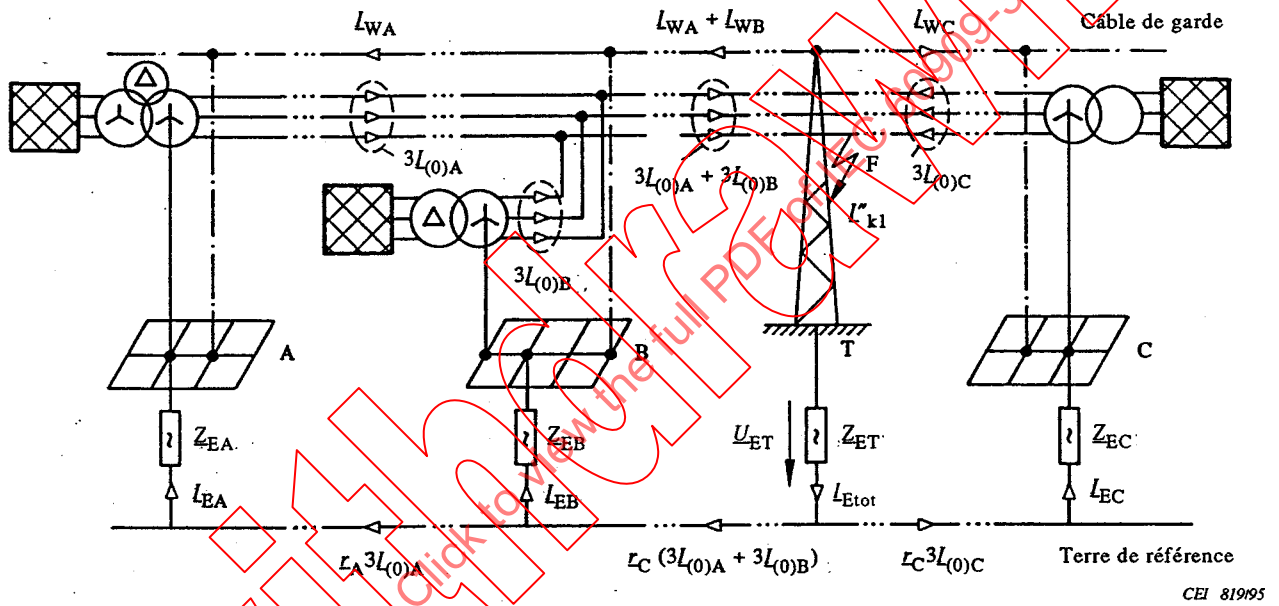


Figure 5 - Courants de court-circuit partiels dans le cas d'un court-circuit monophasé à la terre sur un pylône d'une ligne aérienne

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

$$I''_{k1} = 3 L_{(0)A} + 3 L_{(0)B} + 3 L_{(0)C} \quad (18)$$

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

$$Z_{ET} = \frac{1}{\frac{1}{R_T} + \frac{2}{Z_P}} \quad (19)$$

où

R_T est la résistance de pied de pylône;

Z_P est l'impédance d'entrée de la ligne selon 1.3.6.

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

$$I_{WA} = (1 - \epsilon_A) 3 I_{(0)A} \quad (17a)$$

$$I_{WC} = (1 - \epsilon_C) 3 I_{(0)C} \quad (17b)$$

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

3.1.3 Line-to-earth short circuit 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.

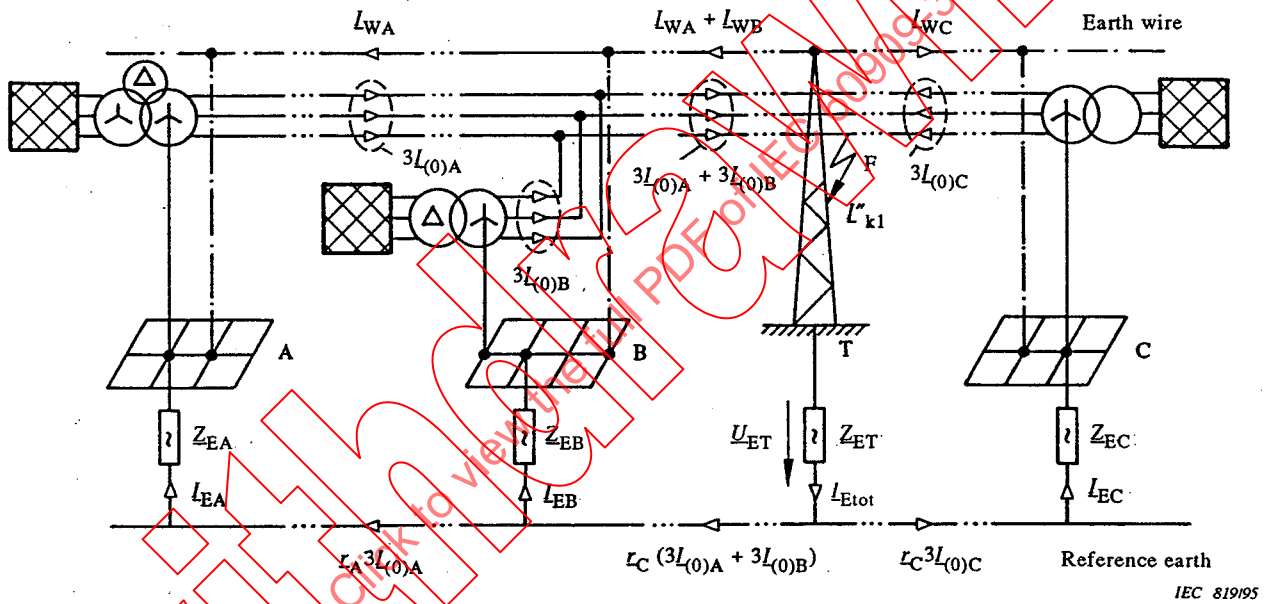


Figure 5 – Partial short-circuit currents in the case of a line-to-earth short circuit at a tower of an overhead line

The line-to-earth short-circuit current I'_{k1} is given by

$$I'_{k1} = 3 I_{(0)A} + 3 I_{(0)B} + 3 I_{(0)C} \quad (18)$$

The total earth impedance of the short-circuited tower connected to an overhead earth wire at the fault location is given by

$$Z_{ET} = \frac{1}{\frac{1}{R_T} + \frac{2}{Z_p}} \quad (19)$$

where

R_T is the footing resistance of the tower;

Z_p is the driving point impedance of the overhead line according to 1.3.6.

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

$$I_{\text{Etot}} = r_C (3 I_{(0)A} + 3 I_{(0)B}) + r_C \cdot 3 I_{(0)C} = r_C \cdot I''_{k1} \quad (20)$$

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

$$\underline{U}_{\text{ET}} = \underline{Z}_{\text{ET}} \cdot I_{\text{Etot}} \quad (21)$$

Si sur une ligne comportant un câble de garde, un court-circuit monophasé à la terre se produit sur un pylône dans le voisinage d'un poste, une grande partie du courant de court-circuit monophasé à la terre peut revenir au poste par le câble de garde. La partie du courant s'écoulant par la terre peut, dans ce cas, être inférieure à celle calculée à l'aide de l'équation (20). Le calcul nécessite une attention particulière lorsque la distance entre le poste B et le pylône où se situe le court-circuit est faible, par rapport à la distance "loin du poste" D_F .

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

$$I_{\text{EB}} = r_C (3 I_{(0)A} + 3 I_{(0)B}) + r_A 3 I_{(0)A} \quad (22)$$

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

3.1.4 Facteur de réduction des lignes aériennes et des câbles

Les équations suivantes s'appliquent aux lignes aériennes avec câbles de garde. Elles sont également valables 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

$$\underline{r} = \frac{I_{\text{Etot}}}{3 I_{(0)}} = 1 - \frac{\underline{Z}'_{\text{WL}}}{\underline{Z}'_{\text{W}}} \quad (23)$$

$\underline{Z}'_{\text{WL}}$ et $\underline{Z}'_{\text{W}}$ dépendent de la résistivité du sol ρ , de la distance entre les câbles de garde et les conducteurs de phase et du rayon équivalent du conducteur r_{WW} pour un ou plusieurs conducteurs.

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

$$I_{\text{Etot}} = r_C (3 I_{(0)A} + 3 I_{(0)B}) + r_C \cdot 3 I_{(0)C} = r_C \cdot I''_{k1} \quad (20)$$

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

$$U_{\text{ET}} = Z_{\text{ET}} \cdot I_{\text{Etot}} \quad (21)$$

If on a line with an earth wire, a line-to-earth short circuit occurs on a tower in the vicinity of a station, a large fraction of the line-to-earth short-circuit current may flow back to the station via the earth wire. The fraction flowing through the earth, in this case, may be smaller than that, calculated from equation (20). Determination needs special consideration, when the distance between the station B and the short-circuited tower T is small, compared with the far-from-station distance D_F .

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

$$I_{\text{EB}} = r_C (3 I_{(0)A} + 3 I_{(0)B}) - r_A \cdot 3 I_{(0)A} \quad (22)$$

The earth current I_{EB} for a line-to-earth short circuit occurring on the overhead line may be greater than for a line-to-earth short circuit inside the station B.

3.1.4 Reduction factor for overhead lines and cables

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

$$r = \frac{I_{\text{Etot}}}{3 I_{(0)}} = 1 - \frac{Z'_{\text{WL}}}{Z'_{\text{W}}} \quad (23)$$

Z'_{WL} and Z'_{W} are dependent on soil resistivity ρ , distance between the earth wire and the line conductors and equivalent conductor radius r_{WW} for one or more conductors.

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

Types de sol	Résistivité ρ en Ωm	Profondeur équivalente de pénétration dans la terre δ en m	
		à 50 Hz	à 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

Le facteur de réduction peut être évalué à partir de la figure 6 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

$$\underline{Z}'_W = R'_W + \frac{\omega\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{\mu_r}{4n} + \ln \frac{\delta}{r_{WW}} \right] \quad (24)$$

avec

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

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

$$\underline{Z}'_{WL} = \frac{\omega\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\delta}{d_{WL}} \quad (25)$$

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

$$\delta = \frac{1,85}{\sqrt{\frac{\omega\mu_0}{\rho}}} \quad (26)$$

Les définitions suivantes s'appliquent:

R'_W Résistance linéique du câble de garde

r_W Rayon du câble de garde

d_W Distance entre les câbles de garde

r_{WW} Rayon équivalent du câble de garde

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

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

n Nombre de câbles de garde

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

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

Soil types	Resistivity ρ in Ωm	Equivalent earth penetration depth δ in 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
Farm land	50 ... 100	660 ... 930	600 ... 850
Clay, loam	10 ... 50	295 ... 660	270 ... 600
Marshy soil	<20	<415	<380

The reduction factor can be estimated from figure 6 using table 2. For detailed calculations of the reduction factor the following equations can be used.

The earth wire impedance per unit length is

$$\underline{Z}'_{\text{W}} = R'_{\text{W}} + \frac{\omega\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\frac{\mu_r}{4n} + \ln \frac{\delta}{r_{\text{WW}}} \right] \quad (24)$$

with

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

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

$$\underline{Z}'_{\text{WL}} = \frac{\omega\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\delta}{d_{\text{WL}}} \quad (25)$$

with the equivalent earth penetration depth according to table 2

$$\delta = \frac{1,85}{\sqrt{\frac{\omega\mu_0}{\rho}}} \quad (26)$$

The following definitions apply

R'_{W} Earth wire resistance per unit length

r_{W} Earth wire radius

d_{W} Distance between earth wires

r_{WW} Equivalent earth wire radius

for 1 earth wire: $r_{\text{WW}} = r_{\text{W}}$

for 2 earth wires: $r_{\text{WW}} = \sqrt{r_{\text{W}} \cdot d_{\text{W}}}$

n Number of earth wires

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

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

pour deux câbles de garde: $d_{WL} = \sqrt[6]{d_{WL1L1} \cdot d_{WL1L2} \cdot d_{WL1L3} \cdot d_{WL2L1} \cdot d_{WL2L2} \cdot d_{WL2L3}}$

ω Pulsation: $\omega = 2\pi f$

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

μ_r Perméabilité relative du câble de garde

Câbles aluminium-acier (Al-Ac) avec une couche d'aluminium: $\mu_r \approx 5 \dots 10$

Autres câbles Al-Ac: $\mu_r \approx 1$

Câbles d'acier: $\mu_r \approx 75$

ρ Résistivité du sol selon le tableau 2

D'après les équations (23) à (25), la facteur de réduction des câbles de garde Al-Ac usuels dépend de la résistivité du sol. La figure 6 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.

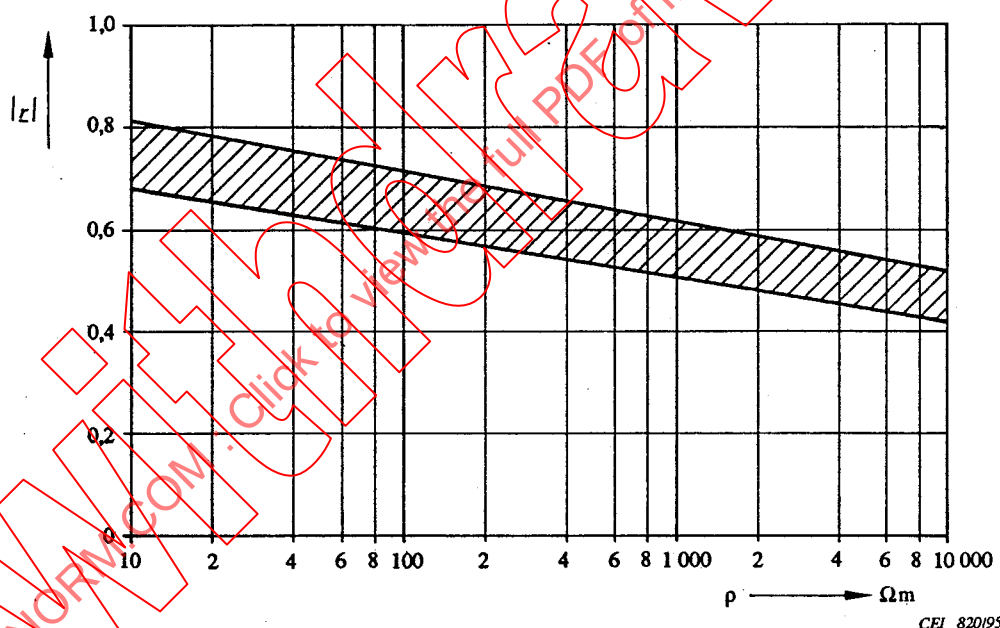


Figure 6 – Valeur absolue $|L|$ du facteur de réduction pour des câbles de garde non magnétiques en fonction de la résistivité ρ du sol

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.

Pour des câbles unipolaires, le facteur de réduction r est donné par

$$r = \frac{I_{Etot}}{3 I_{(0)}} \approx \frac{R'_S}{Z'_S} \quad (27)$$

R'_S et Z'_S dépendent du métal de la gaine, des armures et du diamètre du conducteur.

La calcul de Z'_S est à l'étude.

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

for 2 earth wires: $d_{WL} = \sqrt[6]{d_{WL11} \cdot d_{WL12} \cdot d_{WL13} \cdot d_{WL21} \cdot d_{WL22} \cdot d_{WL23}}$

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

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

According to equation (23) to (25), the reduction factor of usual ACSR earth wires depends on earth resistivity. As example, figure 6 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 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.

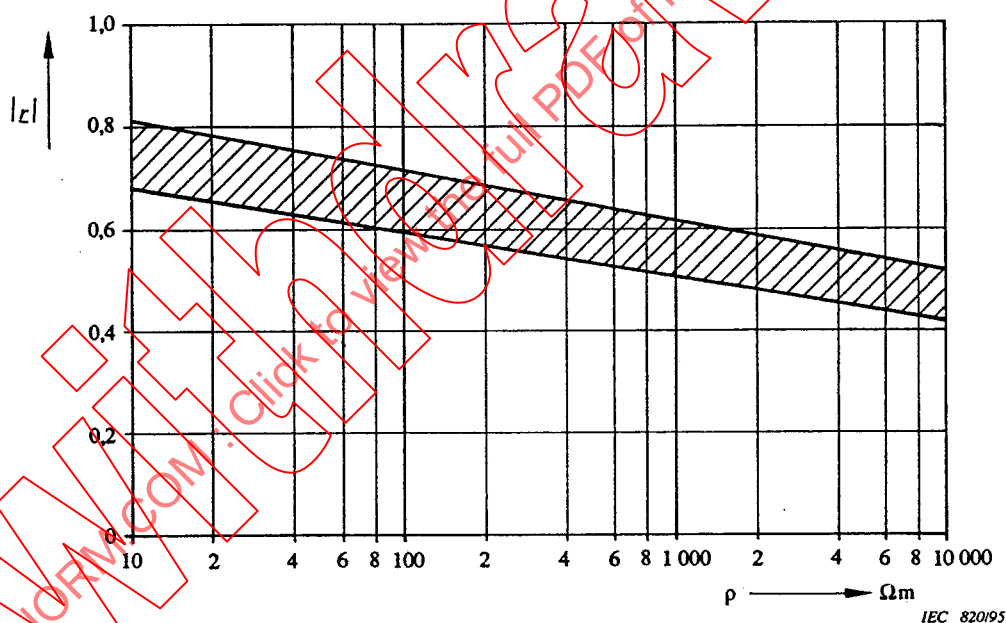


Figure 6 – The magnitude $|r|$ of the reduction factor for non-magnetic earth wires in relation to soil resistivity ρ

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 manufacturer's handbooks.

For single-core cables the reduction factor r is given by

$$r = \frac{I_{Etot}}{3 I_{(0)}} \approx \frac{R'_S}{Z'_S} \quad (27)$$

R'_S and Z'_S depend on sheath metal, armour, conductor diameter.

Calculation of Z'_S is under consideration.

Annexe A (informative)

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

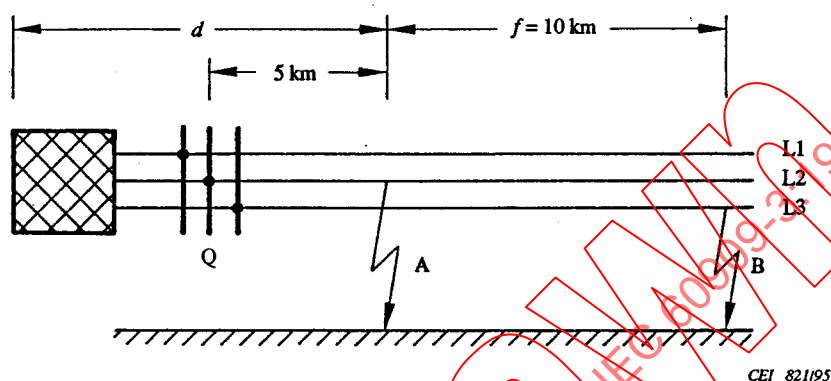


Figure A.1 - Deux court-circuits monophasés simultanés séparés à la terre sur une ligne alimentée en antenne, voir tableau 1

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 dans le poste d'alimentation (voir CEI 909)

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

Ligne aérienne:

conducteurs

$3 \times 1 \times 166/88 \text{ mm}^2 \text{ Al-Ac}$

câble de garde

$1 \times 49 \text{ mm}^2 \text{ Ac, diamètre } 9 \text{ mm}$

$$\rho = \frac{1}{7} \Omega \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}, \mu_r = 75$$

distance moyenne géométrique entre le câble de garde et

les conducteurs de phase

$$d_{WL} = 6 \text{ m}$$

impédance linéique de la ligne:

directe

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

homopolaire

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

Annex A (informative)

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

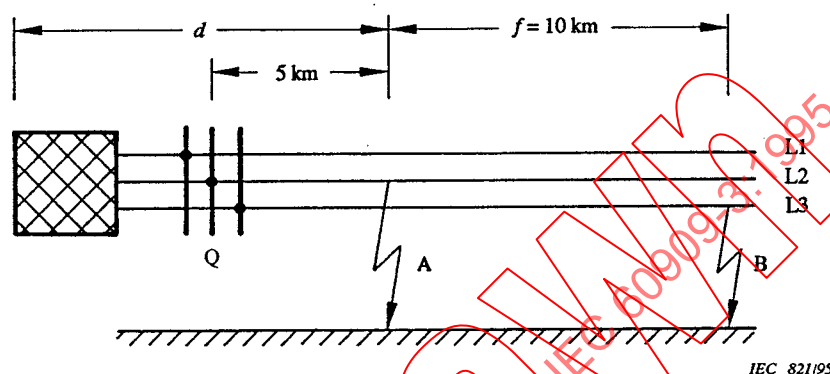


Figure A.1 - Two separate simultaneous single phase line-to-earth short circuits on a single fed radial line, see table 1

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: $Z_Q = (1,5 + j 15) \Omega$

Initial symmetrical short-circuit current in the feeding station (see IEC 909)

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

Overhead line:

conductors

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

earth wire

$1 \times 49 \text{ mm}^2 \text{ steel, diameter 9 mm}$

$$\rho = \frac{1}{7} \Omega \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}, \mu_r = 75$$

geometric mean distance between
the earth wire and the line conductors

$$d_{WL} = 6 \text{ m}$$

line impedance per unit length:

positive-sequence

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

zero-sequence

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

résistivité du sol rocheux	$\rho = 1\,000\ \Omega\text{m}$
profondeur équivalente de pénétration dans le sol	$\delta = 2\,940\ \text{m}$, selon tableau 2
résistance de pied de pylône	$R_T = 10\ \Omega$
distance entre pylônes	$d_T = 300\ \text{m}$

A.2 Calculs

Impédance linéique du câble de garde par unité de longueur conformément à l'équation (24)

$$\begin{aligned}\underline{Z}'_W &= \frac{1000}{7 \times 49} \frac{\Omega\text{mm}^2}{\text{mm}^2\text{km}} + 0,05 \frac{\Omega}{\text{km}} + j\,314\ \text{s}^{-1} \times \frac{4\pi \cdot 10^{-4}}{2\pi} \frac{\Omega\text{s}}{\text{km}} \left[\frac{75}{4} + \ln \frac{2\,940\ \text{m}}{4,5\ \text{mm}} \right] \\ &= (2,97 + j\,2,02) \frac{\Omega}{\text{km}}\end{aligned}$$

Impédance mutuelle linéique entre le câble de garde et les conducteurs de phase parallèles, avec retour commun par la terre, conformément à l'équation (25)

$$\underline{Z}'_{WL} = 0,05 \frac{\Omega}{\text{km}} + j\,314\ \text{s}^{-1} \times \frac{4\pi \cdot 10^{-4}}{2\pi} \frac{\Omega\text{s}}{\text{km}} \ln \frac{2\,940\ \text{m}}{6\ \text{m}} = (0,05 + j\,0,39) \frac{\Omega}{\text{km}}$$

Facteur de réduction du câble de garde conformément à l'équation (23)

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

Impédance d'entrée conformément à l'équation (1)

$$\begin{aligned}\underline{Z}_p &= \frac{(2,97 + j\,2,02) \frac{\Omega}{\text{km}}}{2} \times 0,3\ \text{km} \times \left[1 + \sqrt{1 + \frac{4 \times 10\ \Omega}{(2,97 + j\,2,02) \frac{\Omega}{\text{km}} \times 0,3\ \text{km}}} \right] = \\ &= (3,6 + j\,1,3) \Omega\end{aligned}$$

Pour le calcul du courant maximal de deux court-circuits monophasés simultanés séparés à la terre, les impédances des pylônes sont négligées.

L'équation (6) du tableau 1 donne

$$\underline{I}''_{KEE} = \frac{3 \times 1,1 \times 66\ \text{kV}}{(14,1 + 3,4 + 3,2) \Omega + j(102 + 8 + 14) \Omega} = (285 - j\,1\,709)\ \text{A}$$

$$I''_{KEE} = 1\,733\ \text{A}.$$

stony soil resistivity

$$\rho = 1000 \, \Omega\text{m}$$

equivalent earth penetration depth

$$\delta = 2\,940 \, \text{m} \text{ from table 2}$$

tower footing resistance

$$R_T = 10 \, \Omega$$

tower distance

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

A.2 Calculations

Earth wire impedance per unit length according to equation (24)

$$\begin{aligned} Z'_w &= \frac{1000}{7 \times 49} \frac{\Omega\text{mm}^2}{\text{mm}^2\text{km}} + 0,05 \frac{\Omega}{\text{km}} + j \, 314 \, \text{s}^{-1} \times \frac{4\pi \cdot 10^{-4}}{2\pi} \frac{\Omega\text{s}}{\text{km}} \left[\frac{75}{4} + \ln \frac{2\,940 \, \text{m}}{4,5 \, \text{mm}} \right] \\ &= (2,97 + j \, 2,02) \frac{\Omega}{\text{km}} \end{aligned}$$

Mutual impedance per unit length between the earth wire and the parallel line conductors with common earth return according to equation (25)

$$Z'_{WL} = 0,05 \frac{\Omega}{\text{km}} + j \, 314 \, \text{s}^{-1} \times \frac{4\pi \cdot 10^{-4}}{2\pi} \frac{\Omega\text{s}}{\text{km}} \times \ln \frac{2\,940 \, \text{m}}{6 \, \text{m}} = (0,05 + j \, 0,39) \frac{\Omega}{\text{km}}$$

Reduction factor of earth wire according to equation (23)

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

Driving point impedance according to equation (1)

$$\begin{aligned} Z_p &= \frac{(2,97 + j \, 2,02)}{2} \frac{\Omega}{\text{km}} \times 0,3 \, \text{km} \times \left[1 + \sqrt{1 + \frac{4 \times 10 \, \Omega}{(2,97 + j \, 2,02) \, \Omega/\text{km} \times 0,3 \, \text{km}}} \right] = \\ &= (3,6 + j \, 1,3) \, \Omega \end{aligned}$$

For calculation of the maximum two separate simultaneous single phase line-to-earth short-circuit current, the tower impedances are disregarded.

Equation (6) of table 1 gives

$$I''_{KEE} = \frac{3 \times 1,1 \times 66 \, \text{kV}}{(14,1 + 3,4 + 3,2) \, \Omega + j \, (102 + 8 + 14) \, \Omega} = (285 - j \, 1\,709) \, \text{A}$$

$$I''_{KEE} = 1\,733 \, \text{A}.$$

où

$$6Z_{(1)d} = 6[(1,5 + j 15) \Omega + 5 \text{ km } (0,17 + j 0,40) \frac{\Omega}{\text{km}}] = (14,1 + j 102) \Omega$$

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

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

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'équation (11)

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

Withdrawn
IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60909-3:1995

where

$$6Z_{(1)d} = 6[(1,5 + j 15) \Omega + 5 \text{ km}(0,17 + j 0,40) \frac{\Omega}{\text{km}}] = (14,1 + j 102) \Omega$$

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

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

The current to earth through the tower footing resistances at the short-circuit locations A and B is determined according to equation (11)

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

Withdrawn
IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60909-3:1995

Annexe B (informative)

Exemples de calcul de courants de court-circuit partiels à travers la terre

Un réseau à 132 kV et à 50 Hz est figuré sur les figures B1 et B3. 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

$$\underline{Z}_A = (0 + j 6,4) \, \Omega$$

impédance homopolaire du transformateur

$$\underline{Z}_{(0)A} = (0 + j 12) \, \Omega$$

Poste B:

impédance de court-circuit

$$\underline{Z}_B = (0 + j 7,6) \, \Omega$$

impédance homopolaire du transformateur

$$\underline{Z}_{(0)B} = (0 + j 7) \, \Omega$$

résistance du réseau de terre

$$R_{EB} = 5 \, \Omega$$

Poste C:

impédance de court-circuit

$$\underline{Z}_C = (0 + j 21) \, \Omega$$

impédance homopolaire du transformateur

$$\underline{Z}_{(0)C} = (0 + j 20,3) \, \Omega$$

Ligne aérienne:

conducteurs de phase $3 \times 2 \times 240/40 \, \text{mm}^2 \, \text{Al-Ac}$

câble de garde $1 \times 240/40 \, \text{mm}^2 \, \text{Al-Ac}$

impédance directe linéique par phase

$$\underline{Z}'_{(1)} = (0,06 + j 0,298) \, \Omega/\text{km}$$

impédance homopolaire linéique par phase

$$\underline{Z}'_{(0)} = (0,272 + j 1,48) \, \Omega/\text{km}$$

résistivité du sol

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

profondeur équivalente de pénétration dans le sol

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

impédance linéique du câble de garde

$$\underline{Z}'_w = (0,17 + j 0,801) \, \Omega/\text{km}$$

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

$$d_T = 400 \, \text{m}$$

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 figure B1 and B3. 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 $3 \times 2 \times 240/40 \text{ mm}^2$ ACSR

earth wire $1 \times 240/40 \text{ mm}^2$ ACSR

positive-sequence line impedance per unit length

$$\underline{Z}'_{(1)} = (0,06 + j 0,298) \Omega/\text{km}$$

zero-sequence line impedance per unit length

$$\underline{Z}'_{(0)} = (0,272 + j 1,48) \Omega/\text{km}$$

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

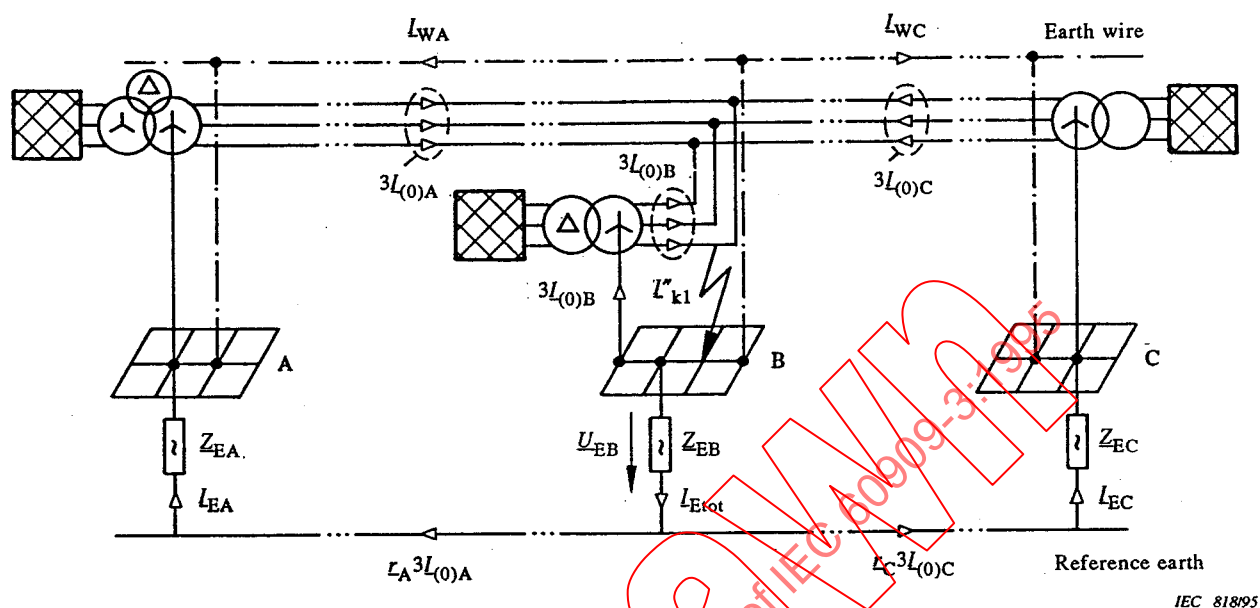
$$R_T = 10 \Omega$$

tower distance

$$d_T = 400 \text{ m}$$

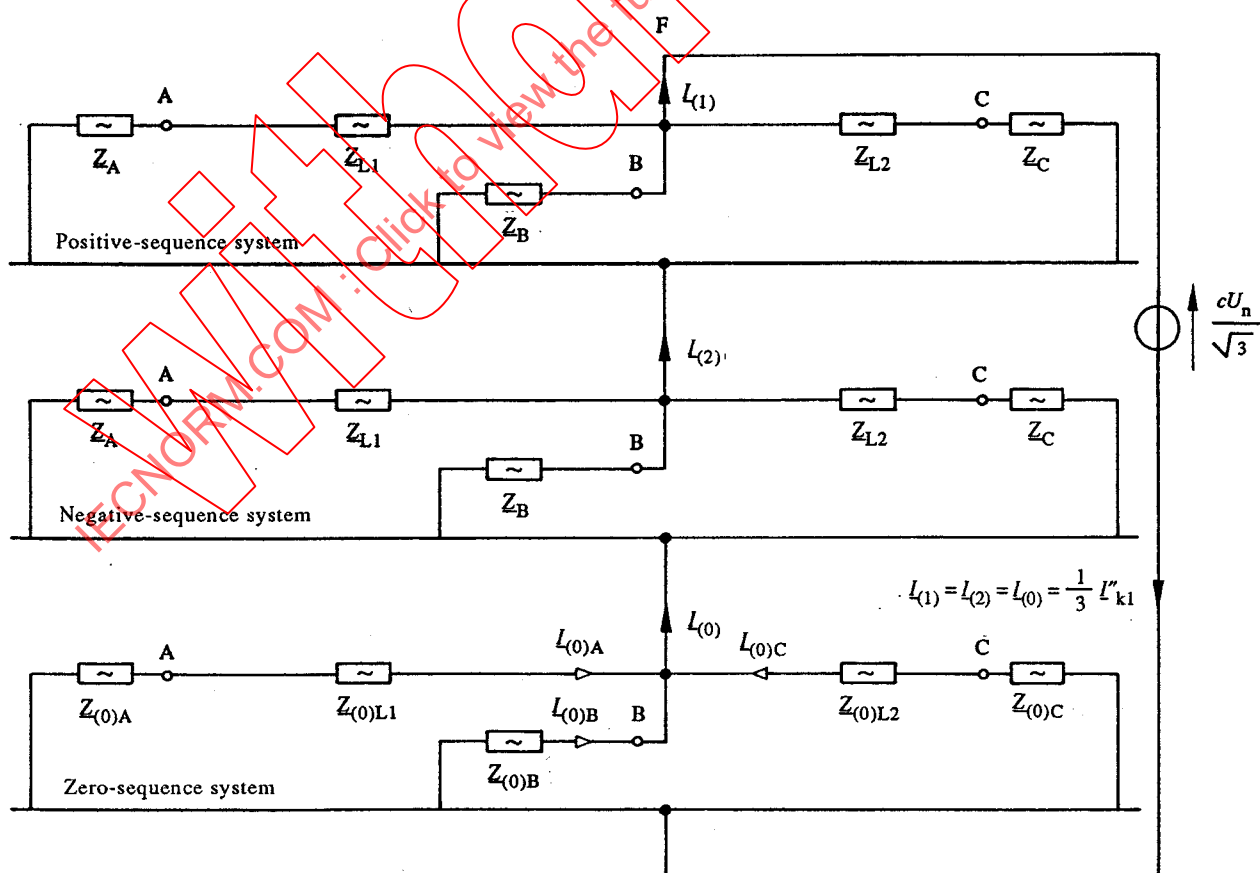
B.2 Case 1: Calculation of a line-to-earth short-circuit current in a station

A line-to-earth short circuit occurs inside the station B as shown in figure B1.



IEC 81895

Figure B1 – Line-to-earth short circuit inside the station B.
System diagram for stations A, B and C



IEC 822/95

Figure B2 – Line-to-earth short circuit inside the station B. Positive-, negative- and zero-sequence systems with connections at the short-circuit location F within the station B

Le courant de court-circuit initial I''_{k1} peut être calculé d'après l'équation (29) de la CEI 909 à l'aide de la figure B1.

$$I''_{k1} = \frac{\sqrt{3} \times 1,1 \times 132 \text{ kV}}{2 \cdot (0,222 + j 4,876) \Omega + (0,115 + j 6,157) \Omega} = (555 - j 15789) \text{ A}$$

où

$$Z_{(1)} = Z_{(2)} = (0,222 + j 4,876) \Omega$$

$$Z_{(0)} = (0,115 + j 6,157) \Omega$$

La composante homopolaire est donnée par

$$I_{(0)} = \frac{1}{3} I''_{k1} = (185 - j 5263) \text{ A}$$

$I_{(0)}$ est la somme des courants de court-circuit partiels $I_{(0)A}$, $I_{(0)B}$ et $I_{(0)C}$

où

$$I_{(0)A} = (75 - j 444) \text{ A} = 450 \text{ A } e^{-j80,4^\circ}$$

$$I_{(0)B} = (76 - j 4632) \text{ A} = 4633 \text{ A } e^{-j89,1^\circ}$$

$$I_{(0)C} = (34 - j 187) \text{ A} = 190 \text{ A } e^{-j80,0^\circ}$$

Le courant total à travers la terre à l'emplacement F du court-circuit est, conformément aux équations (13a) et (13b)

$$I_{\text{Etot}} = 3 \cdot 0,6 \cdot (109 - j 631) \text{ A} = 1153 \text{ A } e^{-j80,2^\circ}$$

La distance "loin du poste" D_F est, conformément à l'équation (16)

$$D_F = 3 \times \sqrt{10 \Omega} \times \frac{400 \text{ m}}{\text{Re} \{ \sqrt{(0,068 + j 0,320) \Omega} \}} = 8,54 \text{ km}$$

Loin des postes, c'est à dire à une distance supérieure à la distance "loin du poste" D_F , les courants dans le câble de garde des lignes aériennes sont, conformément aux équations (17a) et (17b)

$$I_{WA} = 0,4 \times 3 \times (75 - j 444) \text{ A} = (90 - j 533) \text{ A} = 541 \text{ A } e^{-j80,4^\circ}$$

$$I_{WC} = 0,4 \times 3 \times (34 - j 187) \text{ A} = (41 - j 224) \text{ A} = 228 \text{ A } e^{-j79,6^\circ}$$

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

$$I_{EA} = 0,6 \times 3 \times 450 \text{ A} = 810 \text{ A}$$

$$I_{EC} = 0,6 \times 3 \times 190 \text{ A} = 342 \text{ A}$$