IEC 60909-3

Edition 3.0 2009-03

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

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

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



IEC 60909-3:2009

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS

Not for Resale

THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2009 IEC, Geneva, Switzerland

All rights reserved. Unless otherwise specified, 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 either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester.
If you have any questions about IEC copyright or have an enquiry about obtaining additional rights to this publication, please contact the address below or your local IEC member National Committee for further information.

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, 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 la CEI ou du Comité national de la CEI du pays du demandeur.
Si vous avez des questions sur le copyright de la CEI ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de la CEI de votre pays de résidence.

IEC Central Office
3, rue de Varembé
CH-1211 Geneva 20
Switzerland
Email: inmail@iec.ch
Web: www.iec.ch

About the IEC

The International Electrotechnical Commission (IEC) is the leading global organization that prepares and publishes International Standards for all electrical, electronic and related technologies.

About IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC. Please make sure that you have the latest edition, a corrigenda or an amendment might have been published.

- Catalogue of IEC publications: www.iec.ch/searchpub
The IEC on-line Catalogue enables you to search by a variety of criteria (reference number, text, technical committee,…). It also gives information on projects, withdrawn and replaced publications.
- IEC Just Published: www.iec.ch/online_news/justpub
Stay up to date on all new IEC publications. Just Published details twice a month all new publications released. Available on-line and also by email.
- Electropedia: www.electropedia.org
The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing more than 20 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary online.
- Customer Service Centre: www.iec.ch/webstore/custserv
If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please visit the Customer Service Centre FAQ or contact us:
Email: csc@iec.ch
Tel.: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00

A propos de la CEI

La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est la première organisation mondiale qui élabore et publie des normes internationales pour tout ce qui a trait à l'électricité, à l'électronique et aux technologies apparentées.

A propos des publications CEI

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu. Veuillez vous assurer que vous possédez l'édition la plus récente, un corrigendum ou amendement peut avoir été publié.

- Catalogue des publications de la CEI: www.iec.ch/searchpub/cur_fut-f.htm
Le Catalogue en-ligne de la CEI vous permet d'effectuer des recherches en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,…). Il donne aussi des informations sur les projets et les publications retirées ou remplacées.
- Just Published CEI: www.iec.ch/online_news/justpub
Restez informé sur les nouvelles publications de la CEI. Just Published détaille deux fois par mois les nouvelles publications parues. Disponible en-ligne et aussi par email.
- Electropedia: www.electropedia.org
Le premier dictionnaire en ligne au monde de termes électroniques et électriques. Il contient plus de 20 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans les langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International en ligne.
- Service Clients: www.iec.ch/webstore/custserv/custserv_entry-f.htm
Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions, visitez le FAQ du Service clients ou contactez-nous:
Email: csc@iec.ch
Tél.: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

IEC 60909-3

Edition 3.0 2009-03

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

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

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

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

COMMISSION ELECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX XA

ICS 17.220.01; 29.240.20

ISBN 2-8318-1027-8

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

® Registered trademark of the International Electrotechnical Commission
® de la Commission Electrotechnique Internationale

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS

Not for Resale

CONTENTS

FOREWORD 5
1 Scope and object 7
2 Normative references 8
3 Terms and definitions 8
4 Symbols 10
5 Calculation of currents during two separate simultaneous line-to-earth short circuits 12
5.1 Initial symmetrical short-circuit current 12
5.1.1 Determination of $\underline{\boldsymbol{M}}_{(1)}$ and $\underline{\boldsymbol{M}}_{(2)}$ 12
5.1.2 Simple cases of two separate simultaneous line-to-earth short circuits 13
5.2 Peak short-circuit current, symmetrical short circuit breaking current and steady-state short-circuit current 13
5.3 Distribution of the currents during two separate simultaneous line-to-earth short circuits 14
6 Calculation of partial short-circuit currents flowing through earth in case of an unbalanced short circuit 14
6.1 General 14
6.2 Line-to-earth short circuit inside a station 15
6.3 Line-to-earth short circuit outside a station 16
6.4 Line-to-earth short circuit in the vicinity of a station 18
6.4.1 Earth potential $\underline{U}_{\mathrm{ET}n}$ at the tower n outside station B 19
6.4.2 Earth potential of station B during a line-to earth short circuit at the tower n 19
7 Reduction factor for overhead lines with earth wires 20
8 Calculation of current distribution and reduction factor in case of cables with metallic sheath or shield earthed at both ends 21
8.1 Overview 21
8.2 Three-core cable 22
8.2.1 Line-to-earth short circuit in station B 22
8.2.2 Line-to-earth short circuit on the cable between station A and station B 23
8.3 Three single-core cables 26
8.3.1 Line-to-earth short circuit in station B 26
8.3.2 Line-to-earth short circuit on the cable between station A and station B 26
Annex A (informative) Example for the calculation of two separate simultaneous line-to-earth short-circuit currents 30
Annex B (informative) Examples for the calculation of partial short-circuit currents through earth 33
Annex C (informative) Example for the calculation of the reduction factor r_1 and the current distribution through earth in case of a three-core cable 43
Annex D (informative) Example for the calculation of the reduction factor r_3 and the current distribution through earth in case of three single-core cables 48

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Figure 1 – Driving point impedance $\underline{Z}_P$ of an infinite chain, composed of the earth wire impedance $\underline{Z}_Q = \underline{Z}'_Q d_T$ and the footing resistance R_T of the towers, with equal distances d_T between the towers 9

Figure 2 – Driving point impedance $\underline{Z}_{Pn}$ of a finite chain with n towers, composed of the earth wire impedance $\underline{\boldsymbol{Z}}_{\mathbf{Q}} = \underline{\boldsymbol{Z}}'_{\mathbf{Q}} d_{\mathbf{T}}$, the footing resistance R_T of the towers, with equal distances d_T between the towers and the earthing impedance $\underline{Z}_{EB}$ of station B from Equation (29) 10

Figure 3 – Characterisation of two separate simultaneous line-to earth short circuits and the currents $I''_{\mathbf{kEE}}$ 12

Figure 4 – Partial short-circuit currents in case of a line-to-earth short circuit inside station B 15

Figure 5 – Partial short-circuit currents in case of a line-to-earth short circuit at a tower T of an overhead line 16

Figure 6 – Distribution of the total current to earth $\underline{\boldsymbol{I}}_{ETtot}$ 17

Figure 7 – Partial short–circuit currents in the case of a line-to-earth short circuit at a tower n of an overhead line in the vicinity of station B 18

Figure 8 – Reduction factor r for overhead lines with non-magnetic earth wires depending on soil resistivity ρ 21

Figure 9 – Reduction factor of three-core power cables 23

Figure 10 – Reduction factors for three single-core power cables 27

Figure A.1 – Two separate simultaneous line-to-earth short circuits on a single fed overhead line (see Table 1) 30

Figure B.1 – Line-to-earth short circuit inside station B – System diagram for stations A, B and C 34

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 34

Figure B.3 – Line-to-earth short circuit outside stations B and C at the tower T of an overhead line – System diagram for stations A, B and C 36

Figure B.4 – Line-to-earth short circuit outside stations B and C at the tower T of an overhead line – Positive-, negative- and zero-sequence systems with connections at the short-circuit location F 37

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 = 1, 2, 3, ... in the vicinity of station B 42

Figure C.1 – Example for the calculation of the cable reduction factor and the current distribution through earth in a 10-kV-network, U_n = 10 kV; c = 1,1; f = 50 Hz 44

Figure C.2 – Short-circuit currents and partial short-circuit currents through earth for the example in Figure C.1 45

Figure C.3 – Example for the calculation of current distribution in a 10-kV-network with a short circuit on the cable between A and B (data given in C.2.1 and Figure C.1) 46

Figure C.4 – Line-to-earth short-circuit currents, partial currents in the shield and partial currents through earth 47

Figure D.1 – Example for the calculation of the reduction factor and the current distribution in case of three single-core cables and a line-to-earth short circuit in station B 49

Figure D.2 – Positive-, negative- and zero-sequence system of the network in Figure D.1 with connections at the short-circuit location (station B) 50

Figure D.3 – Current distribution for the network in Figure D.1, depending on the length, ℓ, of the single-core cables between the stations A and B 51

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Figure D.4 – Example for the calculation of the reduction factors r_3 and the current distribution in case of three single-core cables and a line-to-earth short circuit between the stations A and B 52

Figure D.5 – Positive-, negative- and zero-sequence system of the network in Figure D.4 with connections at the short-circuit location (anywhere between the stations A and B) 52

Figure D.6 – Current distribution for the cable in Figure D.4 depending on ℓ_A, $R_{EF} \to \infty$ 54

Figure D.7 – Current distribution for the cable in Figure D.4 depending on ℓ_A, R_{EF} = 5 Ω 56

Table 1 – Calculation of initial line-to-earth short-circuit currents in simple cases 13

Table 2 – Resistivity of the soil and equivalent earth penetration depth 20

Table C.1 – Results for the example in Figure C.1 45

Table C.2 – Results for the example in Figure C.3, $\ell = 5$ km 47

Table C.3 – Results for the example in Figure C.3, $\ell = 10$ km 47

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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 International Standard is to be read in conjunction with IEC 60909-0.

This third edition cancels and replaces the second edition published in 2003. This edition constitutes a technical revision.

The main changes with respect to the previous edition are listed below:

– New procedures are introduced for the calculation of reduction factors of the sheaths or shields and in addition the current distribution through earth and the sheaths or shields of three-core cables or of three single-core cables with metallic non-magnetic sheaths or shields earthed at both ends;
– The information for the calculation of the reduction factor of overhead lines with earth wires are corrected and given in the new Clause 7;

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

– A new Clause 8 is introduced for the calculation of current distribution and reduction factor of three-core cables with metallic sheath or shield earthed at both ends;

– The new Annexes C and D provide examples for the calculation of reduction factors and current distribution in case of cables with metallic sheath and shield earthed at both ends.

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

FDIS	Report on voting
73/148/FDIS	73/149/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.

A list of all parts of the IEC 60909 series, published under the general title *Short-circuit currents in three-phase a.c. systems*, can be found on the IEC website.

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until the maintenance result date indicated on the IEC web site under "http://webstore.iec.ch" in the data related to the specific publication. At this date, the publication will be

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

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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 and object

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 a.c. 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) and the towers of overhead lines.

Procedures are given for the calculation of reduction factors of overhead lines with one or two earth wires.

The 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 fault currents 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, earth wires of overhead lines and sheaths or shields of cables leading to conservative results with sufficient accuracy. For this purpose, the short-circuit currents are determined by considering an equivalent voltage source at the short-circuit location with all other voltage sources set to zero. Resistances of earth grids in stations or footing resistances of overhead line towers are neglected, when calculating the short-circuit currents at the short-circuit location.

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 standard.

The calculation of the short-circuit currents 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. The procedure is suitable for determination by manual methods or digital computation. This does not exclude the use of special methods, for example the super-position 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.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

2 Normative references

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*

IEC/TR 60909-2:2008, *Short-circuit currents in three-phase a.c. systems – Part 2: Data of electrical equipment for short-circuit current calculations*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the following terms and 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 a.c. network 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 at both short-circuit locations with the same magnitude

3.3
partial short-circuit current through earth $I_{E\delta}$
r.m.s. value of the current flowing through earth in a fictive line in the equivalent earth penetration depth δ

NOTE In case of overhead lines remote from the short-circuit location and the earthing system of a station, where the distribution of the current between earthed conductors and earth is nearly constant, the current through earth depends on the reduction factor of the overhead line (Figures 4 and 5). In case of cables with metallic sheaths or shields, earthed at both ends in the stations A and B, current through earth between the stations A and B (Figures 9a) and 10a)), respectively between the short-circuit location and the stations A or B (Figures 9b) and 10b)).

3.4
total current to earth I_{ETtot} at the short-circuit location on the tower T of an overhead line
r. m. s. value of the current flowing to earth through the footing resistance of an overhead line tower far away from a station connected with the driving point impedances of the overhead line at both sides, see Figure 5

3.5
total current to earth I_{EBtot} at the short-circuit location in the station B
r.m.s. value of the current flowing to earth through the earthing system of a station B (power station or substation) with connected earthed conductors (earth wires of overhead lines or sheaths or shields or armouring of cables or other earthed conductors as for instance metallic water pipes), see Figure 4

3.6
current to earth I_{ETn}
r.m.s. value of the current flowing to earth causing the potential rise at an overhead line tower n in the vicinity of a station

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

3.7
current to earth I_{EBn}
r.m.s. value of the current flowing to earth causing the potential rise U_{EBn} of a station B, in case of a line-to-earth short circuit at an overhead line tower n in the vicinity of the station B

3.8
reduction factor r
for overhead lines, which determines the part of the line-to-earth short-circuit current flowing through the earth remote from the short-circuit location and the earthing systems of the stations

3.9
reduction factor r_1
for three-core cables with metallic sheath or shield earthed at both ends

3.10
reduction factor r_3
for three single-core cables with metallic sheaths or shields earthed at both ends

3.11
driving point impedance $\underline{Z}_P$ of an infinite chain
composed of the earth-wire impedance $\underline{Z}_Q$ between two towers with earth return and the footing resistance R_T of the overhead line towers (Figure 1):

$$\underline{Z}_P = 0{,}5\underline{Z}_Q + \sqrt{(0{,}5\underline{Z}_Q)^2 + R_T\,\underline{Z}_Q} \qquad (1)$$

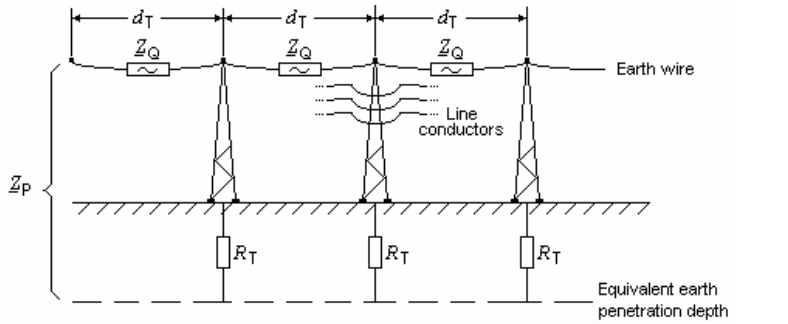


Figure 1 – Driving point impedance $\underline{Z}_P$ of an infinite chain, composed of the earth wire impedance $\underline{Z}_Q = \underline{Z}'_Q d_T$ and the footing resistance R_T of the towers, with equal distances d_T between the towers

The driving point impedance $\underline{Z}_P$ 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 (19).

3.12
driving point impedance Z_{Pn} of a finite chain
with n towers of an overhead line as given in Figure 2 and with the impedance $\underline{Z}_{EB}$ at the end, calculated according to Equation (2).

$$\underline{Z}_{Pn} = \frac{\underline{Z}_P(\underline{Z}_{EB} + \underline{Z}_P)\underline{k}^n + (\underline{Z}_P - \underline{Z}_Q)(\underline{Z}_{EB} - \underline{Z}_P + \underline{Z}_Q)\underline{k}^{-n}}{(\underline{Z}_{EB} + \underline{Z}_P)\underline{k}^n - (\underline{Z}_{EB} - \underline{Z}_P + \underline{Z}_Q)\underline{k}^{-n}} \qquad (2)$$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

with

$$\underline{k} = 1 + \frac{\underline{Z}_{\mathrm{P}}}{R_{\mathrm{T}}} \tag{3}$$

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

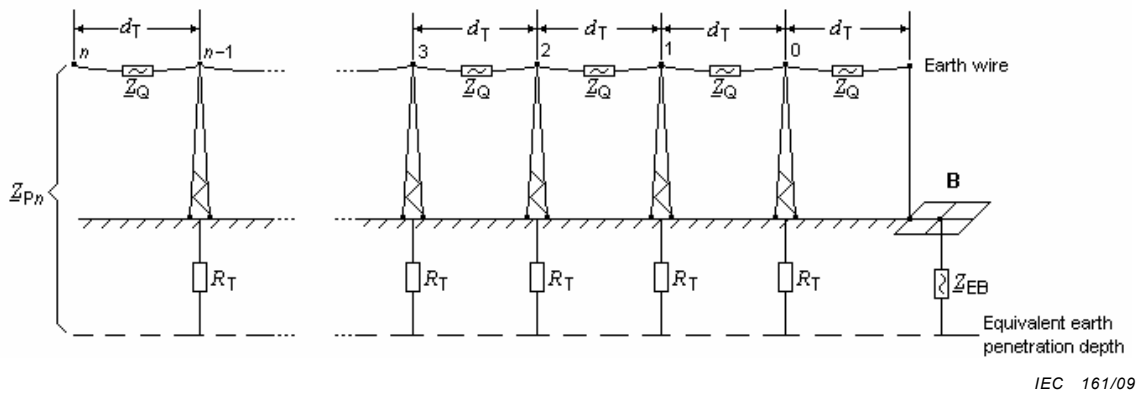


Figure 2 – Driving point impedance $\underline{Z}_{\mathrm{P}n}$ of a finite chain with n towers, composed of the earth wire impedance $\underline{Z}_{\mathrm{Q}} = \underline{Z}'_{\mathrm{Q}} d_{\mathrm{T}}$, the footing resistance R_{T} of the towers, with equal distances d_{T} between the towers and the earthing impedance $\underline{Z}_{\mathrm{EB}}$ of station B from Equation (29)

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 in the text and equations of this standard.

$cU_{\mathrm{n}} / \sqrt{3}$	Equivalent voltage source (IEC 60909-0)
D_{F}	Far-from-station distance (Equation (19))
d_{T}	Distance between two towers
d_{L1L2}	Distance between the line conductors L1 and L2
d_{Q1Q2}	Distance between the earth wires Q1 and Q2
I_{bEE}	Short circuit breaking current in case of two separate simultaneous line-to-earth short circuits
I_{E}	Current flowing to earth (I_{EA}, I_{EB}, I_{EC} and I_{ET} in the Figures 4, 5, 7)
$I_{\mathrm{EB}n}$	Current to earth in station B with a short-circuited tower n in the vicinity of station B (Figure 7)
I_{EBtot}	Total current to earth in the station B if a short circuit with earth connection occurs in station B (Figure 4)
$I_{\mathrm{ET}n}$	Current to earth at the short-circuited tower n in the vicinity of a station (Figure 7)
I_{ETtot}	Total current to earth at a short-circuited tower T far away from stations (see Figure 5)
I''_{kEE}	Initial symmetrical short-circuit current in case of two separate simultaneous line-to-earth short circuits
I''_{kE2E}	Initial symmetrical short-circuit current flowing to earth in the case of a line-to-line short circuit with earth connection (IEC 60909-0)

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

$I_{E\delta}$ Partial short-circuit current flowing through earth (for instance in Figure 4: $\underline{I}_{E\delta A} = \underline{r}_A \times 3\underline{I}_{(0)A}$ or in Figure 9b): Current $\underline{I}_{E\delta A}$ flowing back to the station A according to Equation (45))

I_Q Earth wire current

I_S Current in the sheath or shield of a cable (in case of three single-core cables: I_{S1}, I_{S2} and I_{S3})

I_T Partial short-circuit current through the footing resistance R_T of an overhead line tower

i_{pEE} Peak short-circuit current in case of two separate simultaneous line-to-earth short circuits

$M_{(1)}, M_{(2)}$ Coupling impedances in the positive- and the negative-sequence system

R_{EA}, R_{EB} Resistance of the earth grid in the station A or B

R_{EF} Resistance to earth at the short-circuit location of a cable (Figure 9b) or 10b))

R_T Footing resistance of an overhead line tower

r Reduction factor for overhead line with earth wires

r_1 Reduction factor of the sheath or shield of a three-core cable (Figure 9a))

r_3 Reduction factor of the sheaths or shields of three single core cables (Figure 10a))

r_Q Earth wire radius

r_S Radius of the metallic sheath or shield of a cable (medium value)

$Z_{(1)A}, Z_{(1)B}$ Positive-sequence short-circuit impedance of a three-phase a.c. system at the connection point A, B (Annex 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_{EB} Earthing impedance of a station B according to Equation (29)

Z_{EBtot} Total earthing impedance of a station B according to Equation (17)

Z_{ET} Earthing impedance of the short-circuited tower according to Equation (28)

Z_{ETtot} Total earthing impedance of the short-circuited tower according to Equation (23)

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)

$Z_Q = Z'_Q d_T$ Earth-wire impedance between two towers with earth return

Z'_Q Earth-wire impedance per unit length with earth return

Z'_{QL} Mutual impedance per unit length between earth wire and line conductors with earth return

Z'_S Impedance per unit length of a metallic sheath or shield with earth return

Z'_{SL} Mutual impedance per unit length between the sheath (or the shield) and a core inside the sheath (or the shield) of a cable with earth return

Z_U Input impedance of sheaths, shields or armouring of cables or other metallic pipes or pipelines (Equation (17))

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

δ Equivalent earth penetration depth (Equation (36))

μ_0 Magnetic constant, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Vs/Am

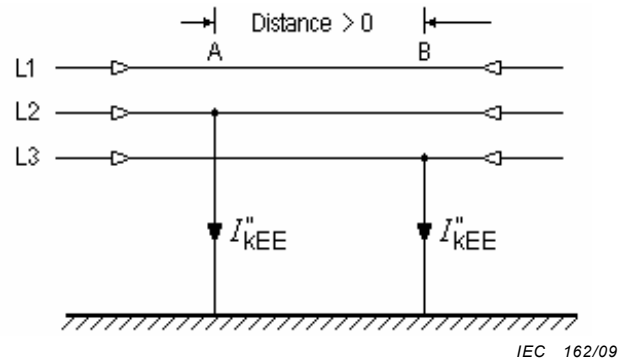
ρ Resistivity of the soil

α Angular frequency, $\alpha = 2\pi f$ (f = 50 Hz or 60 Hz)

5 Calculation of currents during two separate simultaneous line-to-earth short circuits

5.1 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 a finite distance between them. It is assumed that the locations A and B are far from stations.



NOTE The direction of current arrows is chosen arbitrarily.

Figure 3 – Characterisation of two separate simultaneous line-to earth short circuits and the currents I''_{kEE}

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

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

NOTE For derivation of Equation (4) see ITU-T – *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*, 1999.

In 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

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

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

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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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

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

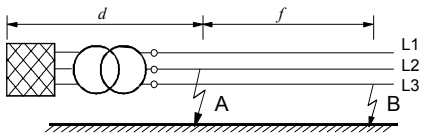
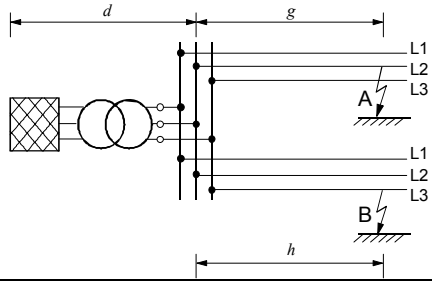
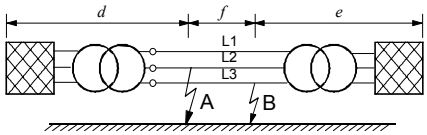
The coupling impedances may also be determined at the short-circuit location B instead of A

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

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

In simple cases, the current I''_{kEE} can be calculated as shown in Table 1, if $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$ and $\underline{M}_{(1)} = \underline{M}_{(2)}$ (far-from-generator short circuit). Equations (8) to (10) are derived from Equation (5). The indices in these equations refer to the relevant impedances in the respective network.

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

a)		Single-fed radial line $I''_{kEE} = \dfrac{3cU_n}{\lvert 6\underline{Z}_{(1)d} + 2\underline{Z}_{(1)f} + \underline{Z}_{(0)f} \rvert}$ (8)
b)		Two single-fed radial lines $I''_{kEE} = \dfrac{3cU_n}{\lvert 6\underline{Z}_{(1)d} + 2(\underline{Z}_{(1)g} + \underline{Z}_{(1)h}) + \underline{Z}_{(0)g} + \underline{Z}_{(0)h} \rvert}$ (9)
c)		Double-fed single line $I''_{kEE} = \dfrac{3cU_n}{\left\lvert \dfrac{6\underline{Z}_{(1)d}\underline{Z}_{(1)e} + 2\underline{Z}_{(1)f}(\underline{Z}_{(1)d} + \underline{Z}_{(1)e})}{\underline{Z}_{(1)d} + \underline{Z}_{(1)f} + \underline{Z}_{(1)e}} + \underline{Z}_{(0)f} \right\rvert}$ (10)
The voltage factor, c, shall be taken from Table 1 of IEC 60909-0.		

5.2 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:

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

$$i_{pEE} = \kappa\sqrt{2}I''_{kEE} \tag{11}$$

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

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

$$I_{kEE} = I_{bEE} = I''_{kEE} \tag{12}$$

5.3 Distribution of the 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 through earth can be calculated assuming $\underline{I}_{E\delta} = \underline{r}\,\underline{I}''_{kEE}$, with $\underline{I}''_{kEE}$ as the only active current source and $\underline{r}$ as the reduction factor of an overhead line with earth wire (Equation 33). For the short circuit at a tower (short-circuit location A or B) far from stations, the current I_T through the footing resistance R_T of the tower is

$$\underline{I}_T = \underline{r}\,\underline{I}''_{kEE}\,\frac{\underline{Z}_P}{\underline{Z}_P + 2R_T} \tag{13}$$

$\underline{Z}_P$ is the driving point impedance of an infinite chain according to Equation (1).

NOTE Equation (13) can be derived from Figure 6 if $\underline{I}_{ETtot}$ is replaced by $\underline{r}\cdot\underline{I}''_{kEE}$.

In case of two separate line-to-earth short circuits at overhead lines without earth wire (for instance in medium-voltage networks), the current through earth is equal to the short-circuit current I''_{kEE}.

6 Calculation of partial short-circuit currents flowing through earth in case of an unbalanced short circuit

6.1 General

The following subclauses deal with partial short-circuit currents flowing through earth and earthed conductors (as earthing systems and earth wires of overhead lines) in the case of a line-to-earth short circuit. This type of short circuit in solidly earthed high-voltage networks is the most frequently occurring unbalanced short circuit. I''_{k1} leads to the highest short-circuit current to earth compared with the line-to-line short circuit with earth connection if $Z_{(0)} > Z_{(1)}$ (see Figure 10 of IEC 60909-0 in case of $Z_{(2)} = Z_{(1)}$). For $Z_{(0)} < Z_{(1)}$, the current to earth I''_{kE2E} in case of a line-to-line short circuit with earth connection, shall be considered according to IEC 60909-0.

For the calculation of short-circuit currents according to IEC 60909-0, the tower impedances with or without earth wire and the earth grid impedances and other connections to earth shall 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. Moreover, it

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

is assumed that the stations A, B and C are separated by more than twice the far-from-station distance, D_F, according to Equation (19).

6.2 Line-to-earth short circuit inside a station

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

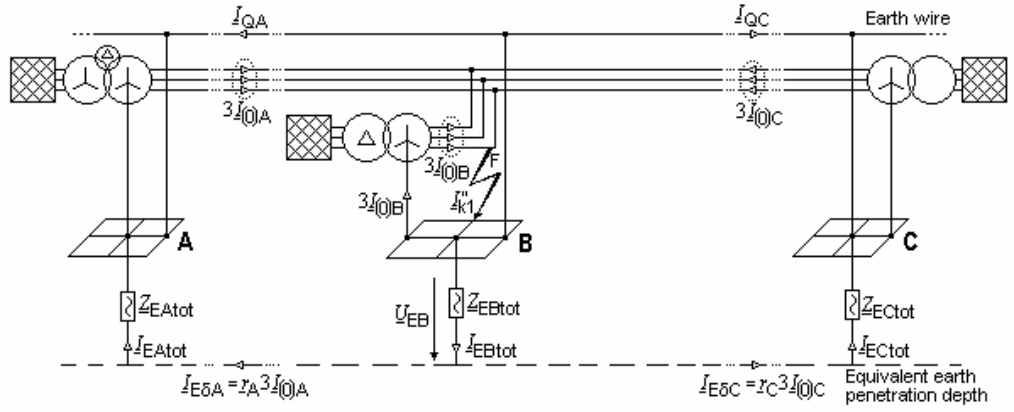


Figure 4 – Partial short-circuit currents in case of a line-to-earth short circuit inside station B

The line-to-earth short-circuit current $\underline{I}''_{k1}$ in Figure 4 is equal to three times the zero-sequence currents flowing to the short-circuit location F:

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

The current $3\underline{I}_{(0)B}$ is flowing back to the transformer-star point via the earth grid in station B and therefore does not lead to a potential rise at the station B. The currents $3\underline{I}_{(0)A}$ and $3\underline{I}_{(0)C}$ are flowing back to the stations A and C through the earth and the earth wires between the station B and the stations A and C. For a far-from-station distance we have (see Figure 4):

$$3\underline{I}_{(0)A} = \underline{I}_{E\delta A} + \underline{I}_{QA} = \underline{r}_A 3\underline{I}_{(0)A} + (1-\underline{r}_A)3\underline{I}_{(0)A} \tag{15a}$$

$$3\underline{I}_{(0)C} = \underline{I}_{E\delta C} + \underline{I}_{QC} = \underline{r}_C 3\underline{I}_{(0)C} + (1-\underline{r}_C)3\underline{I}_{(0)C} \tag{15b}$$

$\underline{r}_A$ and $\underline{r}_B$ are the reduction factors of the earth wires between B and A and between B and C respectively.

The total current to earth in station B (short-circuit location) is:

$$\underline{I}_{EBtot} = \underline{r}_A 3\underline{I}_{(0)A} + \underline{r}_C 3\underline{I}_{(0)C} \tag{16}$$

The current $\underline{I}_{EBtot}$ passes the total earthing impedance of station B:

$$\underline{Z}_{EBtot} = \frac{1}{\frac{1}{R_{EB}} + \sum_i \frac{1}{\underline{Z}_{Pi}} + \sum_i \frac{1}{\underline{Z}_{Ui}}} \tag{17}$$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

where

R_{EB} is the resistance of the earth grid in station B;

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

$\underline{Z}_U$ is the input impedance of sheaths, shields or armouring of a cables or other metallic pipes or pipelines.

The current through $\underline{Z}_{EBtot}$ leads to the earth potential $\underline{U}_{EB}$ at the station B:

$$\underline{U}_{EB} = \underline{Z}_{EBtot}\,\underline{I}_{EBtot} \tag{18}$$

The far-from-station distance (far from the short-circuit location) is calculated as follows:

$$D_F = 3\sqrt{R_T}\,\frac{d_T}{\mathrm{Re}\left\{\sqrt{\underline{Z}_Q}\right\}} \tag{19}$$

where

R_T is the tower footing resistance;

d_T is the distance between towers;

$\mathrm{Re}\left\{\sqrt{\underline{Z}_Q}\right\}$ is the real part of the square root of the earth wire impedance $\underline{Z}_Q = \underline{Z}'_Q d_T$ with $\underline{Z}'_Q$ from Equation (34).

NOTE 1 If the stations A or C are nearer than D_F to station B, the total current $\underline{I}_{EBtot}$ is reduced by an additional part of the currents $\underline{r}_A 3\underline{I}_{(0)A}$ or $\underline{r}_C 3\underline{I}_{(0)C}$ flowing back to the nearest station A or C via earth wires.

NOTE 2 Special considerations may be necessary in the case of double-circuit lines or parallel lines with coupled zero-sequence system.

6.3 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.

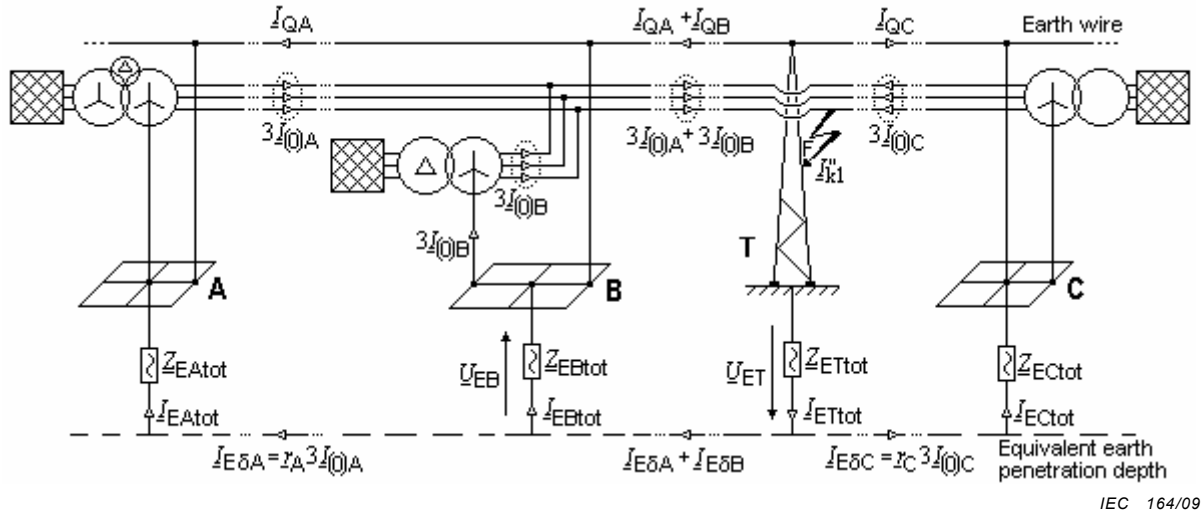


Figure 5 – Partial short-circuit currents in case of a line-to-earth short circuit at a tower T of an overhead line

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

The line-to-earth short-circuit current $\underline{I}''_{k1}$ in Figure 5 is equal to three times the zero-sequence currents flowing to the short-circuit location F:

$$\underline{I}''_{k1} = 3\underline{I}_{(0)A} + 3\underline{I}_{(0)B} + 3\underline{I}_{(0)C} \tag{20}$$

The three currents $3\underline{I}_{(0)A}$, $3\underline{I}_{(0)B}$ and $3\underline{I}_{(0)C}$ in Figure 5 are flowing back to the stations A, B and C through the earth and the earth wires of the overhead lines between the stations:

$$3\underline{I}_{(0)A} + 3\underline{I}_{(0)B} = \underline{I}_{E\delta A} + \underline{I}_{E\delta B} + \underline{I}_{QA} + \underline{I}_{QB} = \underline{r}_C\left(3\underline{I}_{(0)A} + 3\underline{I}_{(0)B}\right) + (1 - \underline{r}_C)\left(3\underline{I}_{(0)A} + 3\underline{I}_{(0)B}\right) \tag{21}$$

and as already known from Figure 4 and the Equations (15):

$$3\underline{I}_{(0)A} = \underline{I}_{E\delta A} + \underline{I}_{QA} = \underline{r}_A 3\underline{I}_{(0)A} + (1 - \underline{r}_A)3\underline{I}_{(0)A}$$

$$3\underline{I}_{(0)C} = \underline{I}_{E\delta C} + \underline{I}_{QC} = \underline{r}_C 3\underline{I}_{(0)C} + (1 - \underline{r}_C)3\underline{I}_{(0)C}$$

$\underline{r}_A$ and $\underline{r}_B$ are the reduction factors of the earth wires between B and A and between B and C respectively.

The total current to earth at the tower T (short-circuit location), far away from stations B and C (distance higher than D_F) is:

$$\underline{I}_{ETtot} = \underline{I}_{E\delta A} + \underline{I}_{E\delta B} + \underline{I}_{E\delta C} = \underline{r}_C\left(3\underline{I}_{(0)A} + 3\underline{I}_{(0)B} + 3\underline{I}_{(0)C}\right) = \underline{r}_C\underline{I}''_{k1} \tag{22}$$

This current passes the total earthing impedance of the short-circuited tower T connected to the earth wire of the overhead line $\overline{BC}$ according to Figure 6:

$$\underline{Z}_{ETtot} = \frac{1}{\frac{1}{R_T} + \frac{2}{\underline{Z}_P}} \tag{23}$$

R_T is the footing resistance of the tower and $\underline{Z}_P$ the driving point impedance according to Figure 1.

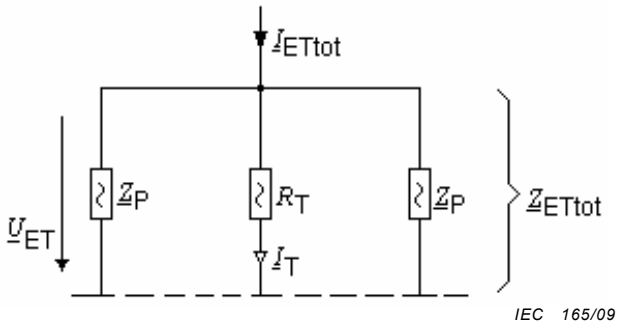


Figure 6 – Distribution of the total current to earth $\underline{I}_{ETtot}$

$\underline{I}_T$ is found from Equation (13), if $\underline{r}\,\underline{I}''_{kEE}$ is replaced by $\underline{r}_C\underline{I}''_{k1}$.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

The current through $\underline{Z}_{\mathrm{ETtot}}$ leads to the earth potential $\underline{U}_{\mathrm{ET}}$ at the short-circuited tower (see Figure 6).

$$\underline{U}_{\mathrm{ET}} = \underline{Z}_{\mathrm{ETtot}}\,\underline{I}_{\mathrm{ETtot}} = R_{\mathrm{T}}\,\underline{I}_{\mathrm{T}} \tag{24}$$

If the line-to-earth short circuit occurs on a tower in the vicinity of station B, then the earth potential may be higher than the result found with Equation (24). A determination needs special consideration as given in 6.4.

The current to earth in station B in the case of a line-to-earth short circuit at the tower T (distance higher than D_{F} from station B) is according to Figure 5 found from:

$$\underline{I}_{\mathrm{EBtot}} = \underline{r}_{\mathrm{C}}\left(3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} + 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}}\right) - \underline{r}_{\mathrm{A}}\,3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} \tag{25}$$

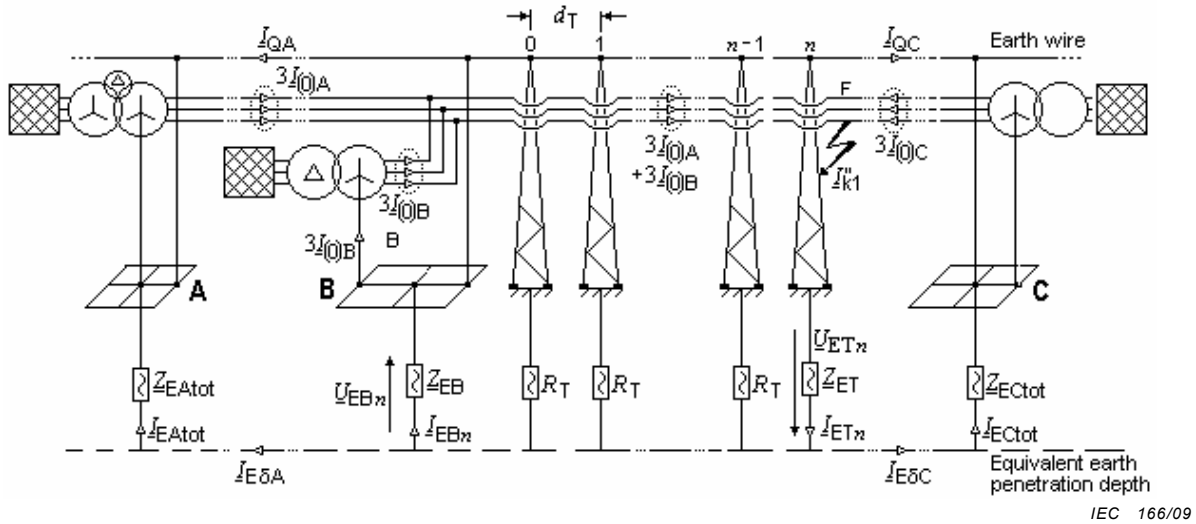
The earth potential of station B with the current $\underline{I}_{\mathrm{EBtot}}$ from Equation (25) becomes in this case:

$$\underline{U}_{\mathrm{EB}} = \underline{Z}_{\mathrm{EBtot}}\,\underline{I}_{\mathrm{EBtot}} \tag{26}$$

If the line-to-earth short circuit occurs on a tower in the vicinity of station B, then the current to earth in station B may be higher than $\underline{I}_{\mathrm{EBtot}}$ found from Equation (16) in case of a line-to-earth short circuit in station B (Figure 4). A determination needs special conditions as given in 6.4.

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

If the line-to earth short circuit occurs at a tower in the vicinity (distance smaller than D_{F}) of a station (Figure 7), then the earth potential $\underline{U}_{\mathrm{EB}n}$ (additional index n to point out that the line to-earth short circuit occurs at a tower n = 0, 1, 2, 3 ... outside the station) may be higher than $\underline{U}_{\mathrm{EB}}$ calculated with Equation (18). In this case, the earth potential $\underline{U}_{\mathrm{ET}n}$ of the short-circuited tower n in the vicinity of station B is also higher than the earth potential $\underline{U}_{\mathrm{ET}}$ for a tower far outside station B calculated with Equation (24).



IEC 166/09

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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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

6.4.1 Earth potential $\underline{U}_{ETn}$ at the tower n outside station B

The current $\underline{I}_{ETn}$ (Figure 7) at the short-circuited tower in the vicinity of station B flowing through $\underline{Z}_{ET}$ according to Equation (28) is found from the superposition of two terms, the first one depending on the current to earth $\underline{r}_C \underline{I}''_{k1}$ at the short-circuit location and the second one depending on the current $\underline{r}_C 3\underline{I}_{(0)B}$ flowing back through earth to the star point of the transformer in station B.

$$\underline{I}_{ETn} = \underline{r}_C \underline{I}''_{k1} \frac{\underline{Z}_{Pn}}{\underline{Z}_{Pn} + \underline{Z}_{ET}} - \underline{r}_C 3\underline{I}_{(0)B} \frac{\underline{Z}_{EB}}{\underline{Z}_{EB} + \underline{Z}_P} \cdot \frac{1}{\underline{k}^n} \tag{27}$$

with

$$\underline{Z}_{ET} = \frac{1}{\frac{1}{R_T} + \frac{1}{\underline{Z}_P}} \tag{28}$$

and

$$\underline{Z}_{EB} = \frac{1}{\frac{1}{R_{EB}} + \frac{1}{\underline{Z}_P}} \tag{29}$$

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:

$$\underline{U}_{ETn} = \underline{Z}_{ET} \underline{I}_{ETn} \tag{30}$$

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

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

$$\underline{I}_{EBn} = \underline{r}_C I''_{k1} \frac{\underline{Z}_{ET}}{\underline{Z}_{ET} + \underline{Z}_{Pn}} \cdot \frac{2\underline{Z}_P - \underline{Z}_Q}{(\underline{Z}_{EB} + \underline{Z}_P)\underline{k}^n - (\underline{Z}_{EB} - \underline{Z}_P + \underline{Z}_Q)\underline{k}^{-n}} - \underline{r}_C 3\underline{I}_{(0)B} \frac{\underline{Z}_P}{\underline{Z}_{EB} + \underline{Z}_P} \tag{31}$$

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

$$\underline{U}_{EBn} = \underline{Z}_{EB} \underline{I}_{EBn} \tag{32}$$

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

7 Reduction factor for overhead lines with earth wires

The reduction factor of overhead lines with earth wires can be calculated as follows:

$$\underline{r} = \frac{\underline{I}_{E\delta}}{3\underline{I}_{(0)}} = 1 - \frac{\underline{Z}'_{QL}}{\underline{Z}'_{Q}} \tag{33}$$

$\underline{Z}'_{Q}$ and $\underline{Z}'_{QL}$ shall be calculated with the Equations (34) and (35). The result depends on the soil resistivity ρ, the distance d_{QL} between the earth wire and the line conductors and the equivalent earth wire radius, r_{QQ}, for one or more earth wires.

Table 2 – Resistivity of the soil and equivalent earth penetration depth

Soil types	Soil 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	5 150 ... 9 330	4 670 ... 8520
Stony soil	1 000 ... 3 000	2 950 ... 5110	2 690 ... 4 670
Pebbles, dry sand	200 ... 1 200	1 320 ... 3 230	1 200 ... 2 950
Calcareous soil, wet sand	70 ... 200	780 ... 1 320	710 ... 1 200
Farmland	50 ... 100	660 ... 1 320	600 ... 850
Clay, loam	10 ... 50	295 ... 660	270 ... 600
Marshy soil	<20	<420	<380

The earth wire impedance per unit length with earth return is

$$\underline{Z}'_{Q} = \frac{R'_{Q}}{\nu} + \omega\frac{\mu_0}{8} + \mathrm{j}\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\left(\frac{\mu_r}{4\nu} + \ln\frac{\delta}{r_{QQ}}\right) \tag{34}$$

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

$$\underline{Z}'_{QL} = \omega\frac{\mu_0}{8} + \mathrm{j}\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\ln\frac{\delta}{d_{QL}} \tag{35}$$

The equivalent earth penetration depth δ depends on the soil type as given in Table 2 and can be found as follows:

$$\delta = \frac{1{,}851}{\sqrt{\omega\frac{\mu_0}{\rho}}} \tag{36}$$

The following definitions apply:

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

d_{Q1Q2} Distance between the two earth wires Q1 and Q2

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

r_Q Earth wire radius

r_{QQ} Equivalent earth wire radius

for one earth wire: $r_{QQ} = r_Q$

for two earth wires: $r_{QQ} = \sqrt{r_Q d_{Q1Q2}}$

ν Number of earth wires ($\nu = 1, 2$)

d_{QL} Mean geometric distance between the earth wire and the line conductors

for one earth wire: $d_{QL} = \sqrt[3]{d_{QL1} d_{QL2} d_{QL3}}$

for two earth wires $d_{QL} = \sqrt[6]{d_{Q1L1} d_{Q1L2} d_{Q1L3} d_{Q2L1} d_{Q2L2} d_{Q2L3}}$

μ_r Relative permeability of the earth wire material

Aluminium core steel reinforced (ACSR) wires with one layer of aluminium: $\mu_r = 5...10$;

Other ACSR wires: $\mu_r \approx 1$;

Steel wires: $\mu_r \approx 75$.

According to Equation (34) and (35), the reduction factor of usual ACSR earth wires depends on the soil resistivity ρ. Figure 8 shows reduction factors for non-magnetic earth wires of different overhead lines with nominal voltages 60 kV to 220 kV.

In case of overhead lines with one or two earth wires of steel, the magnitude of the reduction factor becomes about 0,95 and 0,90 respectively.

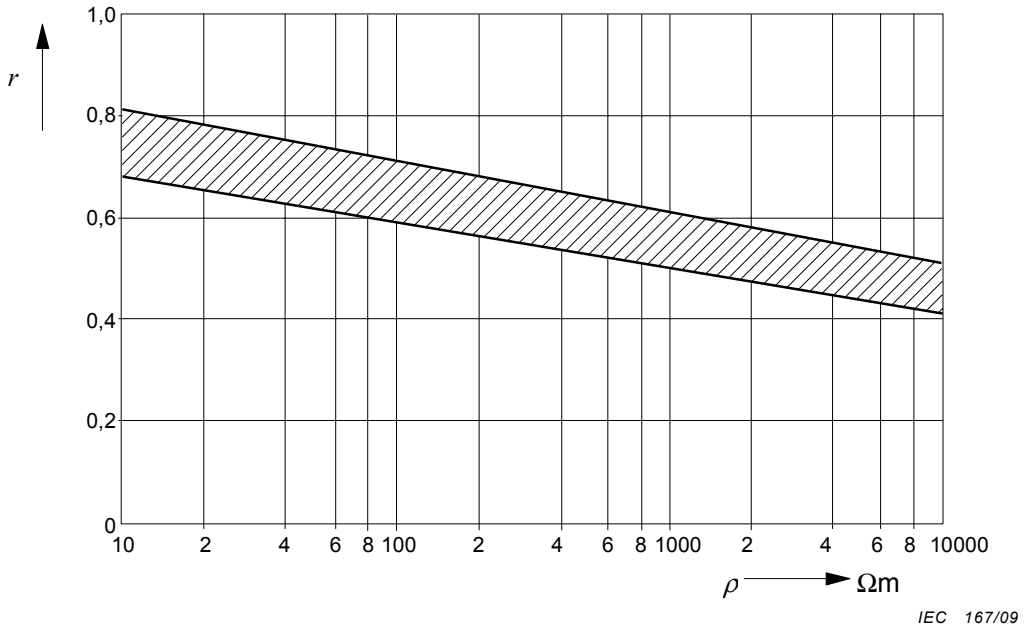


Figure 8 – Reduction factor *r* for overhead lines with non-magnetic earth wires depending on soil resistivity ρ

8 Calculation of current distribution and reduction factor in case of cables with metallic sheath or shield earthed at both ends

8.1 Overview

The reduction factor of power cables with metallic sheath, shield and armouring earthed at both ends depends on the type of cable: Three-core cable with a common sheath, three single-core cables with three sheaths or shields and, in some cases, with additional

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

armouring, the cross-section of the metallic sheath(s) or shield(s) in compliance with national techniques and standards.

Reduction factor of cables with steel armouring shall be given from the manufacturer (see IEC/TR 60909-2).

It is anticipated in this standard that the cables have an outer thermoplastic sheath (see IEC/TR 60909-2).

8.2 Three-core cable

Figure 9 gives the configurations dealt with in case of a three-core cable with metallic sheath or shield earthed at both ends and an outer thermoplastic sheath isolating the cable against the surrounding soil.

8.2.1 Line-to-earth short circuit in station B

In the case of Figure 9a), if the cable is fed from side A only with a line-to-earth short-circuit current $\underline{I}''_{k1} = 3\underline{I}_{(0)A}$ in station B, the reduction factor $\underline{r}_1$ gives that part $\underline{I}_{E\delta A} = \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)A}$ of the line-to-earth short-circuit current, that is flowing back through earth by the induction effect.

$$\underline{r}_1 = \frac{\underline{I}_{E\delta A}}{3I_{(0)A}} = 1 - \frac{\underline{Z}'_{SL}}{\underline{Z}'_S} = \frac{R'_S}{R'_S + \omega\frac{\mu_0}{8} + j\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\ln\frac{\delta}{r_S}} \tag{37}$$

$\underline{Z}'_S$ is the impedance of the metallic (non magnetic) sheath (or shield) per unit length with earth return:

$$\underline{Z}'_S = R'_S + \omega\frac{\mu_0}{8} + j\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\ln\frac{\delta}{r_S} \tag{38}$$

$\underline{Z}'_{SL}$ is the mutual impedance between the sheath and one of the cores (inside the sheath, independently of the position) per unit length with earth return:

$$\underline{Z}'_{SL} = \omega\frac{\mu_0}{8} + j\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\ln\frac{\delta}{r_S} \tag{39}$$

where

R'_S Resistance per unit length of the sheath or shield (copper, aluminium, lead); $R'_S = 1/(\kappa \cdot q_S)$ with $q_S \approx 2\pi r_S d_S$ where d_S is the thickness of the sheath or shield

r_S Medium radius of the sheath or shield;

δ Equivalent earth penetration depth (Table 2 or Equation (36)).

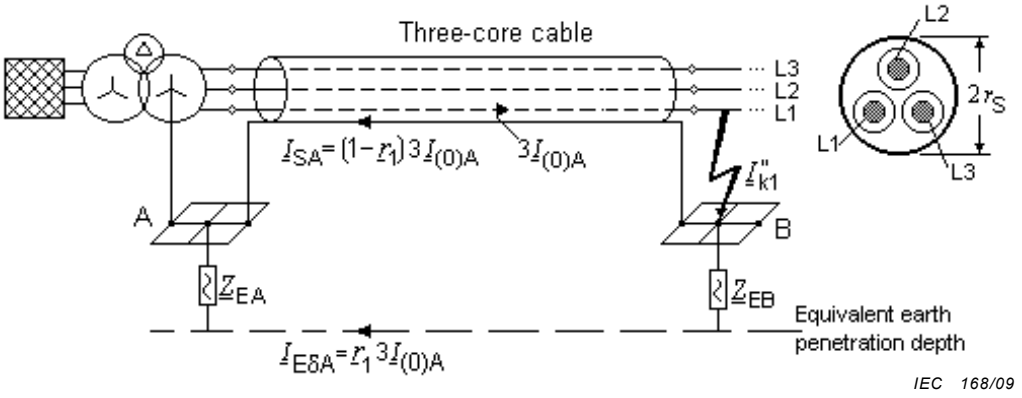
The current in the sheath or shield in Figure 9a) is calculated as follows:

$$\underline{I}_{SA} = (1 - \underline{r}_1)\, 3\underline{I}_{(0)A} \tag{40}$$

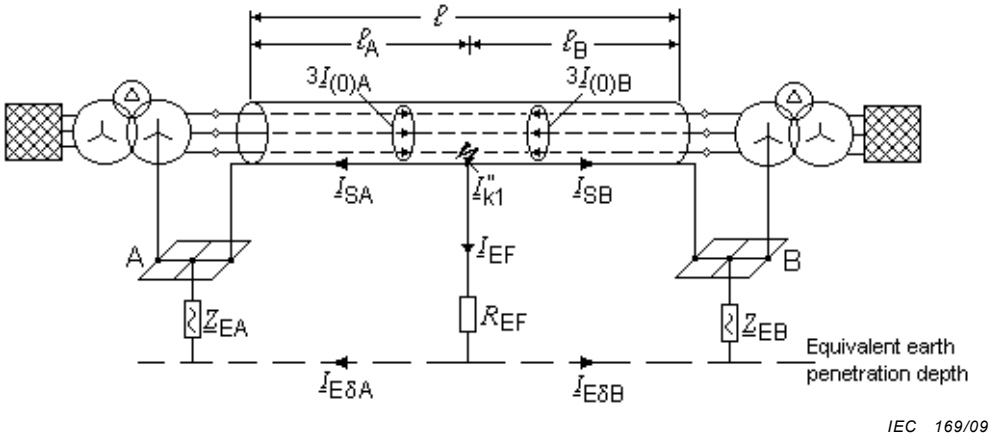
The current through earth in Figure 9a) is found with:

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

$$\underline{I}_{\mathrm{E}\delta\mathrm{A}} = \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} \tag{41}$$



a) Feeding from station A only and line-to-earth short circuit in station B



$$(\underline{I}''_{\mathrm{k1}} = 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} + 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}};\ 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} = \underline{I}_{\mathrm{SA}} + \underline{I}_{\mathrm{E}\delta\mathrm{A}};\ 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}} = \underline{I}_{\mathrm{SB}} + \underline{I}_{\mathrm{E}\delta\mathrm{B}})$$

b) Feeding from stations A and B and line-to-earth short circuit on the cable between the stations A and B

Figure 9 – Reduction factor of three-core power cables

8.2.2 Line-to-earth short circuit on the cable between station A and station B

In case of a line-to-earth short circuit on the cable between the stations A and B the currents in the sheath or shield in Figure 9b) are calculated as follows:

$$\underline{I}_{\mathrm{SA}} = (1-\underline{r}_1)3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} + \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} \frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{A}}} + \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}} \frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{A}}} \tag{42}$$

$$\underline{I}_{\mathrm{SB}} = (1-\underline{r}_1)3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}} + \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}} \frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{B}}} + \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} \frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{B}}} \tag{43}$$

The current to earth at the short-circuit location is given as:

$$\underline{I}_{\mathrm{EF}} = \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} \frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{R_{\mathrm{EF}}} + \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}} \frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{R_{\mathrm{EF}}} \tag{44}$$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

The currents through earth in Figure 9b) are found with:

$$\underline{I}_{\mathrm{E}\delta\mathrm{A}} = \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} \frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{B}}} + \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} \frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{R_{\mathrm{EF}}} - \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}} \frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{A}}} \tag{45}$$

$$\underline{I}_{\mathrm{E}\delta\mathrm{B}} = \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}} \frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{A}}} + \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}} \frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{R_{\mathrm{EF}}} - \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} \frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{B}}} \tag{46}$$

with

$$\underline{Z}_{\mathrm{EStot}} = \frac{1}{\dfrac{1}{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{A}}} + \dfrac{1}{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{B}}} + \dfrac{1}{R_{\mathrm{EF}}}} = \frac{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{A}}\ell_{\mathrm{B}}}{\ell + \dfrac{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{A}}\ell_{\mathrm{B}}}{R_{\mathrm{EF}}}} \tag{47}$$

The reduction factor $\underline{r}_1$ is given in Equation (37).

The given equations are valid for a cable length of at least $\ell \approx \delta/2$ ($\ell \approx 0{,}5$ km in case of $\rho = 100\ \Omega$m) between the stations A and B in Figure 9a), and distances ℓ_{A} and ℓ_{B} between the short-circuit location and the adjacent stations A and B in Figure 9b), for at least $\ell \approx \delta/2$ in Case 2 according to 8.2.2.2.

Because in normal cases the resistance R_{EF} at the short-circuit location against reference earth is not known, the two cases $R_{\mathrm{EF}} \rightarrow \infty$ (there is no connection at the short-circuit location between the metallic sheath (shield) of the cable and the surrounding soil) and $R_{\mathrm{EF}} \rightarrow$ Min. have to be taken into account.

8.2.2.1 Case 1: $R_{\mathrm{EF}} - \infty$

In case of $R_{\mathrm{EF}} \rightarrow \infty$, it is anticipated that the outer thermoplastic sheath is not destroyed by the short-circuit current or by the arc at the short-circuit location. The following expressions are found from the Equations (42) and (43):

$$\underline{I}_{\mathrm{SA}} = (1 - \underline{r}_1)3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} + \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} \frac{\ell_{\mathrm{B}}}{\ell} + \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}} \frac{\ell_{\mathrm{B}}}{\ell} \tag{42a}$$

$$\underline{I}_{\mathrm{SB}} = (1 - \underline{r}_1)3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}} + \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}} \frac{\ell_{\mathrm{A}}}{\ell} + \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} \frac{\ell_{\mathrm{A}}}{\ell} \tag{43a}$$

In this case the Equations (45) and (46) lead to:

$$\underline{I}_{\mathrm{E}\delta\mathrm{A}} = \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} \frac{\ell_{\mathrm{A}}}{\ell} - \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}} \frac{\ell_{\mathrm{B}}}{\ell} \tag{45a}$$

$$\underline{I}_{\mathrm{E}\delta\mathrm{B}} = \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}} \frac{\ell_{\mathrm{B}}}{\ell} - \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} \frac{\ell_{\mathrm{A}}}{\ell} \tag{46a}$$

The line-to-earth short-circuit current at the short-circuit location between A and B shall be calculated with the zero-sequence impedance per unit length $\underline{Z}'_{(0)\mathrm{S}}$ of the cable for a current

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

return only through the sheath or shield (see IEC/TR 60909-2 and the information about the calculation of this value given in IEC/TR 60909-2, Equations (30) and (31)).

The highest current through the sheath or shield will occur, if the short–circuit location is near the station A or the station B and if the short circuit in Figure 9b) is fed from both sides.

$$\underline{I}_{\mathrm{SA\,max}} = 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}}\,(\ell_{\mathrm{A}} = 0) + \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}}(\ell_{\mathrm{A}} = 0) \tag{42b}$$

$$\underline{I}_{\mathrm{SB\,max}} = 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}}(\ell_{\mathrm{A}} = \ell) + \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}}(\ell_{\mathrm{A}} = \ell) \tag{43b}$$

The highest current through earth is also found if the short circuit occurs near the station A or B:

$$\underline{I}_{\mathrm{E\delta A\,max}} = \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}}(\ell_{\mathrm{A}} = \ell) \tag{45b}$$

$$\underline{I}_{\mathrm{E\delta B\,max}} = \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}}(\ell_{\mathrm{A}} = 0) \tag{46b}$$

8.2.2.2 Case 2: R_{EF} = 5 Ω

The value $R_{\mathrm{EF}} = 5\,\Omega$ is to be seen as a conservative hypothesis, because the area of the connection to the surrounding soil is small even if the thermoplastic outer sheath is destroyed. When fixing this value, it is anticipated, that the short-circuit location is outside the stations A and B and that no metallic rods or pipes are in the neighbourhood of the short-circuit location.

In this case, the line-to-earth short-circuit current $\underline{I}''_{\mathrm{k1}}$ at the short-circuit location between A and B shall be calculated with the zero-sequence impedance $\underline{Z}'_{(0)\mathrm{SE}}$ for a current return through the sheath or shield of the cable and the earth (see IEC/TR 60909-2).

The currents in the sheath or shield and through the earth shall be calculated with Equations (42), (43) and (45), (46).

The highest current through the sheath or the shield can be calculated with Equations (42b) and (43b).

If the highest values for the currents through earth are searched for, use the highest line-to-earth short-circuit current fed from one side of the cable only and neglect the current fed from the other side. In this case Equations (45) and (46) lead to:

$$\underline{I}_{\mathrm{E\delta A max}} = \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}}\left(\frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{B}}} + \frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{R_{\mathrm{EF}}}\right) \tag{45c}$$

$$\underline{I}_{\mathrm{E\delta B max}} = \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}}\left(\frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{A}}} + \frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{R_{\mathrm{EF}}}\right) \tag{46c}$$

Calculations with the above equations may lead to higher currents through earth than those found with Equations (45b) or (46b).

NOTE Clause C.2 gives an example for the calculations, if the highest currents through earth are searched for.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---
Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

If the cable has an additional iron armouring (for instance in the case of a lead sheath), the manufacturer shall give the reduction factor (depending on the current through the sheath) found for instance from measurements. See for information IEC/TR 60909-2.

8.3 Three single-core cables

As given under 8.2, in this case also a distinction shall be made between a line-to-earth short circuit in station B, if the short-current is fed from station A (Figure 10a)) or if the short circuit is on the cable at a location between the station A and B (Figure 10b)).

8.3.1 Line-to-earth short circuit in station B

In case of three single-core cables in Figure 10a), with three sheaths (shields) earthed and connected at both ends, the reduction factor $\underline{r}_3$ shall be calculated as follows:

$$\underline{r}_3 = 1 - \frac{\underline{I}_{S1} + \underline{I}_{S2} + \underline{I}_{S3}}{3\underline{I}_{(0)}} = \frac{R'_S}{R'_S + 3 \cdot \omega \frac{\mu_0}{8} + \mathrm{j}3 \cdot \omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\delta}{\sqrt[3]{r_S d_{L1L2} d_{L1L3}}}} \tag{48}$$

The distances d_{L1L2} and d_{L1L3} according to Figure 10a) shall be used for a triangular and a flat configuration. The result found from Equation (48) is the exact result for a triangular configuration. For a flat configuration the result of Equation (48) can be used as a sufficient approximation for this standard, independently if the line-to-earth short-circuit current will occur in an outer cable or the central cable of the flat configuration.

The sum of the currents through the three sheaths or shields according to Figure 10a) is calculated as follows:

$$\underline{I}_{SA} = \underline{I}_{S1A} + \underline{I}_{S2A} + \underline{I}_{S3A} = (1 - \underline{r}_3)\, 3\underline{I}_{(0)A} \tag{49}$$

The current through earth, flowing back to station A of Figure 10a), is found with the reduction factor $\underline{r}_3$ from Equation (48):

$$\underline{I}_{E\delta A} = \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)A} \tag{50}$$

8.3.2 Line-to-earth short circuit on the cable between station A and station B

In case of a line-to-earth short circuit on the cable between the stations A and B, fed from both sides in Figure 10b), currents generally are flowing in the three line conductors and in the three sheaths or shields of the single core cables.

The sum of the currents in the three sheaths or shields are calculated as follows:

$$\underline{I}_{SA} = (1 - \underline{r}_3)\, 3\underline{I}_{(0)A} + \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)A} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}'_S \ell_A} + \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)B} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}'_S \ell_A} \tag{51}$$

$$\underline{I}_{SB} = (1 - \underline{r}_3)\, 3\underline{I}_{(0)B} + \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)B} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}'_S \ell_B} + \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)A} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}'_S \ell_B} \tag{52}$$

The current to earth at the short circuit location is given as:

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

$$\underline{I}_{\mathrm{EF}} = \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} \frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{R_{\mathrm{EF}}} + \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}} \frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{R_{\mathrm{EF}}} \tag{53}$$

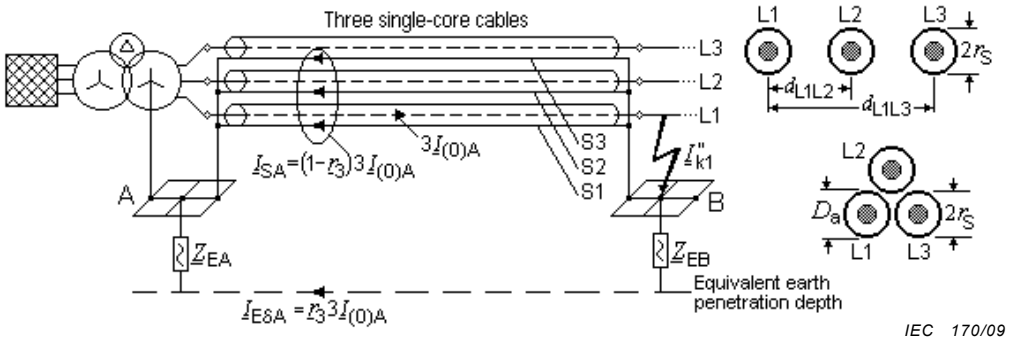
The currents through earth are found with:

$$\underline{I}_{\mathrm{E}\delta\mathrm{A}} = \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} \frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{B}}} + \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} \frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{R_{\mathrm{EF}}} - \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}} \frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{A}}} \tag{54}$$

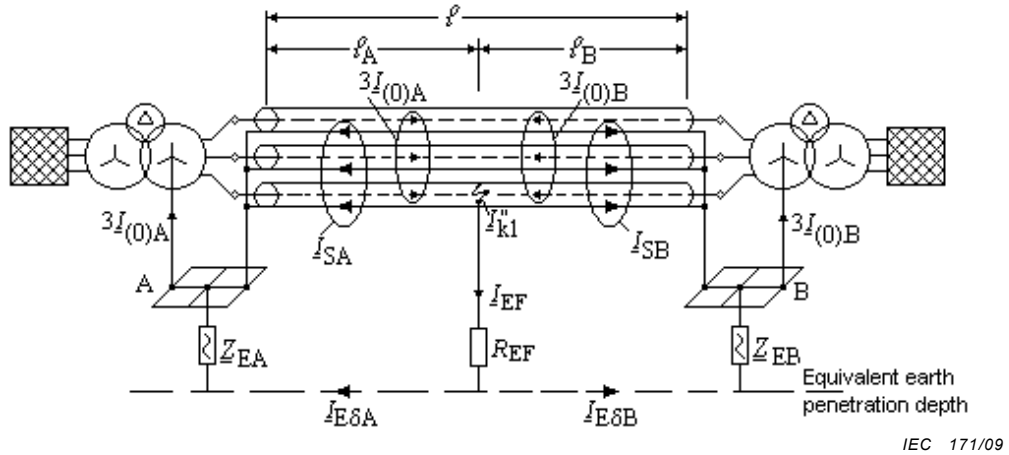
$$\underline{I}_{\mathrm{E}\delta\mathrm{B}} = \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}} \frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{A}}} + \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}} \frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{R_{\mathrm{EF}}} - \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} \frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{B}}} \tag{55}$$

with $\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}$ according to Equation (47).

In this case $\underline{Z}'_{\mathrm{S}}$ is the self impedance per unit length of one of the three sheaths or shields, calculated with Equation (38).



a) Feeding from station A only and line-to-earth short circuit in station B



$$\left(\underline{I}''_{\mathrm{k1}} = 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} + 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}};\ 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} = \underline{I}_{\mathrm{SA}} + \underline{I}_{\mathrm{E}\delta\mathrm{A}};\ 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}} = \underline{I}_{\mathrm{SB}} + \underline{I}_{\mathrm{E}\delta\mathrm{B}}\right)$$

b) Feeding from stations A and B and line-to-earth short circuit on the cable between the stations A and B

Figure 10 – Reduction factors for three single-core power cables

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Because in normal cases the resistance R_{EF} at the short-circuit location against reference earth is not known, the two cases $R_{EF} \rightarrow \infty$ (there is no connection at the short-circuit location between the metallic sheath or shield of the cable and the surrounding soil) and $R_{EF} \rightarrow$ Min. have to be taken into account.

8.3.2.1 Case 1: $R_{EF} \rightarrow \infty$

In case of $R_{EF} \rightarrow \infty$, it is anticipated that the outer thermoplastic sheath is not destroyed by the short-circuit current or by the arc at the short-circuit location. The following expressions are found from Equations (51) and (52):

$$\underline{I}_{SA} = (1-\underline{r}_3)3\underline{I}_{(0)A} + \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)A}\frac{\ell_B}{\ell} + \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)B}\frac{\ell_B}{\ell} \quad (51a)$$

$$\underline{I}_{SB} = (1-\underline{r}_3)3\underline{I}_{(0)B} + \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)B}\frac{\ell_A}{\ell} + \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)A}\frac{\ell_A}{\ell} \quad (52a)$$

In this case the Equations (54) and (55) lead to:

$$\underline{I}_{E\delta A} = \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)A}\frac{\ell_A}{\ell} - \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)B}\frac{\ell_B}{\ell} \quad (54a)$$

$$\underline{I}_{E\delta B} = \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)B}\frac{\ell_B}{\ell} - \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)A}\frac{\ell_A}{\ell} \quad (55a)$$

The line-to-earth short-circuit current at the short-circuit location between A and B shall be calculated with the zero-sequence impedance $\underline{Z}'_{(0)S}$ of the cable system for a current return only through the sheaths or shields (see IEC/TR 60909-2).

The highest current through the sheath or shield, S1, will occur, if the short-circuit location is near the station A or the station B and if the short circuit in Figure 10b) is fed from both sides.

$$\underline{I}_{S1Amax} \approx 3\underline{I}_{(0)A}(\ell_A = 0) + (2 + \underline{r}_3)\underline{I}_{(0)B}(\ell_A = 0) \quad (51b)$$

$$\underline{I}_{S1Bmax} \approx 3\underline{I}_{(0)B}(\ell_A = \ell) + (2 + \underline{r}_3)\underline{I}_{(0)A}(\ell_A = \ell) \quad (52b)$$

The highest currents through earth are also found if the short circuit occurs near the station A or B.

$$\underline{I}_{E\delta A\,max} = \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)A}(\ell_A = \ell) \quad (54b)$$

$$\underline{I}_{E\delta B\,max} = \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)B}(\ell_A = 0) \quad (55b)$$

8.3.2.2 Case 2: $R_{EF} = 5\,\Omega$

The value $R_{EF} = 5\ \Omega$ is to be seen as a conservative hypothesis, see 8.2.2.2.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

The line-to-earth short-circuit current $\underline{I}''_{k1}$ at the short-circuit location between A and B shall be calculated with the zero-sequence impedance per unit length $\underline{Z}'_{(0)SE}$ for a current return through the sheaths or shields of the cable and the earth (see IEC/TR 60909-2).

The sum of the currents in the sheaths or shields and the currents through earth shall be calculated with Equations (51), (52) and (54), (55).

The highest currents through the sheath or shield, S1, can be found with Equations (51b) and (52b).

If the highest values for the currents through earth are searched for, use the highest line-to-earth short-circuit current fed from one side of the cable only and neglect the current fed from the other side. In this case, Equations (54) and (55) lead to:

$$\underline{I}_{E\delta Amax} = \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)A}(\ell_A = \ell)\left(\frac{\underline{Z}_{EStot}(\ell_A = \ell)}{\underline{Z}'_S \ell_B} + \frac{\underline{Z}_{EStot}(\ell_A = \ell)}{R_{EF}}\right) = \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)A}(\ell_A = \ell) \quad (54c)$$

$$\underline{I}_{E\delta Bmax} = \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)B}(\ell_A = 0)\left(\frac{\underline{Z}_{EStot}(\ell_A = 0)}{\underline{Z}'_S \ell_A} + \frac{\underline{Z}_{EStot}(\ell_A = 0)}{R_{EF}}\right) = \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)B}(\ell A = 0) \quad (55c)$$

NOTE Annex D gives an example for the calculation of the currents flowing through earth.

If the cables should have additional iron armouring, the manufacturer shall give the reduction factor and the current distribution.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Annex A
(informative)

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

A.1 Overview

Two separate simultaneous line-to-earth short circuits on a single fed overhead line are shown in Figure A.1.

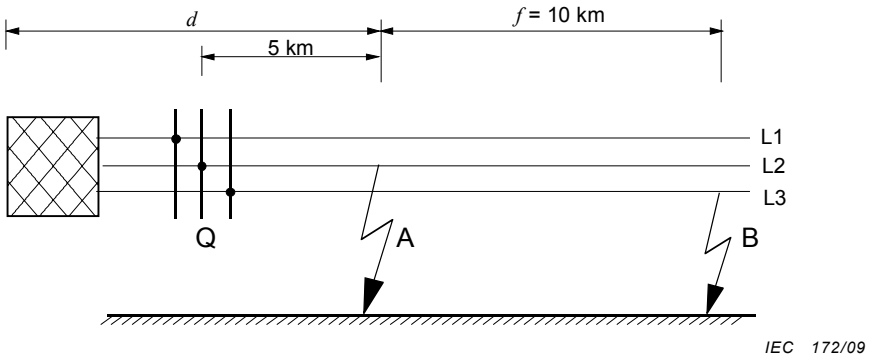


Figure A.1 – Two separate simultaneous line-to-earth short circuits on a single fed overhead line (see Table 1)

A.2 Data

Nominal voltage: U_n = 66 kV

Nominal frequency: 50 Hz

Network with isolated or resonant earthed neutral

Network impedance at the feeder connection point Q: $\underline{Z}_{(1)Q} = (1{,}5 + \mathrm{j}15)\,\Omega$

Initial symmetrical short-circuit current at Q (see IEC 60909-0):

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

Overhead line:

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

Earth wire $1 \times 49\ \mathrm{mm}^2$ steel, $r_Q = 4{,}5$ mm, $R'_Q = 2{,}92\ \Omega/\mathrm{km}$, $\mu_r = 75$

Mean geometric distance between the earth wire and the line conductors: $d_{QL} = 6$ m

Line impedance per unit length:

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

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

Stony soil resistivity $\rho = 1\,000\ \Omega\mathrm{m}$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Equivalent earth penetration depth $\acute{\iota} = 2\,950$ m from Table 2 or Equation (36)

Tower footing resistance $R_T = 10\ \Omega$

Tower distance $d_T = 300$ m

A.3 Calculations

Earth-wire impedance per unit length with earth return according to Equation (34) with $\nu = 1$:

$$\underline{Z}'_Q = 2{,}92\frac{\Omega}{\text{km}} + 0{,}0493\frac{\Omega}{\text{km}} + \text{j}314\text{s}^{-1}\frac{4\pi\cdot 10^{-4}\ \text{Vs}}{2\pi\ \text{Akm}}\left(\frac{75}{4} + \ln\frac{2950\,\text{m}}{4{,}5\,\text{mm}}\right) = (2{,}969 + \text{j}2{,}020)\frac{\Omega}{\text{km}}$$

Mutual impedance per unit length between the earth wire and the line conductors with earth return according to Equation (35):

$$\underline{Z}'_{QL} = 0{,}0493\frac{\Omega}{\text{km}} + \text{j}314\text{s}^{-1}\frac{4\pi\cdot 10^{-4}\ \text{Vs}}{2\pi\ \text{Akm}}\ln\frac{2950\,\text{m}}{6\,\text{m}} = (0{,}049 + \text{j}0{,}389)\frac{\Omega}{\text{km}}$$

Reduction factor of the earth wire according to Equation (33):

$$\underline{r} = 1 - \frac{\underline{Z}'_{QL}}{\underline{Z}'_Q} = 1 - \frac{(0{,}049 + \text{j}0{,}389)\Omega/\text{km}}{(2{,}969 + \text{j}2{,}020)\Omega/\text{km}} = 0{,}928 - \text{j}0{,}082\,; \quad r = 0{,}931$$

Driving point impedance according to Equation (1) with:

$$\underline{Z}_Q = \underline{Z}'_Q d_T = (2{,}97 + \text{j}2{,}02)(\Omega/\text{km})\cdot 0{,}3\text{km}:$$

$$\underline{Z}_P = 0{,}5\cdot(0{,}891 + \text{j}0{,}606)\Omega + \sqrt{[0{,}5\cdot(0{,}891 + \text{j}0{,}606)]^2 + 10\cdot(0{,}891 + \text{j}0{,}606)\ \Omega} = (3{,}610 + \text{j}1{,}303)\Omega$$

Equation (8) from Table 1 leads to:

$$\underline{I}''_{kEE} = \frac{3\cdot 1{,}1\cdot 66\,\text{kV}}{(14{,}1 + 3{,}4 + 3{,}2)\Omega + \text{j}(102 + 8 + 14)\Omega} = (0{,}285 - \text{j}1{,}709)\ \text{kA}\,; \qquad I''_{kEE} = 1{,}732\ \text{kA}$$

where

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

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

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

The current to earth through the footing resistance, R_T, of the tower at the short-circuit locations A or B is determined with Equation (13):

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

$$\underline{I}_{\mathrm{T}} = (0{,}928 - \mathrm{j}0{,}082)(0{,}285 - \mathrm{j}1{,}709)\,\mathrm{kA}\,\frac{(3{,}610 + \mathrm{j}1{,}303)\,\Omega}{(3{,}610 + \mathrm{j}1{,}303)\,\Omega + 2 \cdot 10\,\Omega} = (0{,}094 - \mathrm{j}0{,}244)\,\mathrm{kA}\,;$$

$$I_{\mathrm{T}} = 0{,}262\,\mathrm{kA}$$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Annex B
(informative)

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

B.1 Overview

A 132-kV-network, 50 Hz, 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.2 Data

Station A:

Short-circuit impedance	$\underline{Z}_{A} = (0 + j6{,}4)\,\Omega$
Zero-sequence impedance of the transformer	$\underline{Z}_{(0)A} = (0 + j12)\,\Omega$

Station B:

Short-circuit impedance	$\underline{Z}_{B} = (0 + j7{,}6)\,\Omega$
Zero-sequence impedance of the transformer	$\underline{Z}_{(0)B} = (0 + j7)\,\Omega$
Resistance of earth grid	$R_{EB} = 5\,\Omega$

Station C:

Short-circuit impedance	$\underline{Z}_{C} = (0 + j21)\,\Omega$
Zero-sequence impedance of the transformer	$\underline{Z}_{(0)C} = (0 + j20{,}3)\,\Omega$

Overhead 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	$\underline{Z}'_{(1)L} = \underline{Z}'_{L} = (0{,}06 + j0{,}298)\ \Omega/\text{km}$
Zero-sequence line impedance per unit length	$\underline{Z}'_{(0)L} = (0{,}272 + j1{,}48)\ \Omega/\text{km}$
Soil resistivity	$\rho = 1000\ \Omega\text{m}$
Equivalent earth penetration depth	$\delta = 2950$ m from Table 2
Earth-wire impedance per unit length	$\underline{Z}'_{Q} = (0{,}17 + j0{,}801)\ \Omega/\text{km}$
Earth-wire reduction factor	$\underline{r}_{A} = \underline{r}_{C} = \underline{r} = 0{,}6 - j0{,}03 \approx 0{,}6$
Tower footing resistance	$R_{T} = 10\ \Omega$
Tower distance	$d_{T} = 400$ m
Length of overhead line between A and B	$\ell_1 = 40$ km
Length of overhead line between B and C	$\ell_2 = 100$ km

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

B.3 Line-to-earth short circuit in a station

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

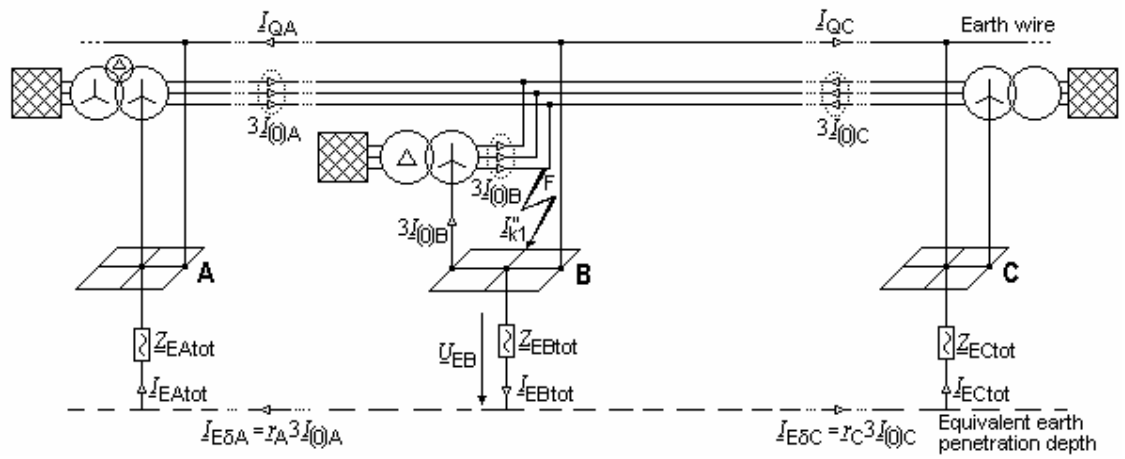


Figure B.1 – Line-to-earth short circuit inside station B – System diagram for stations A, B and C

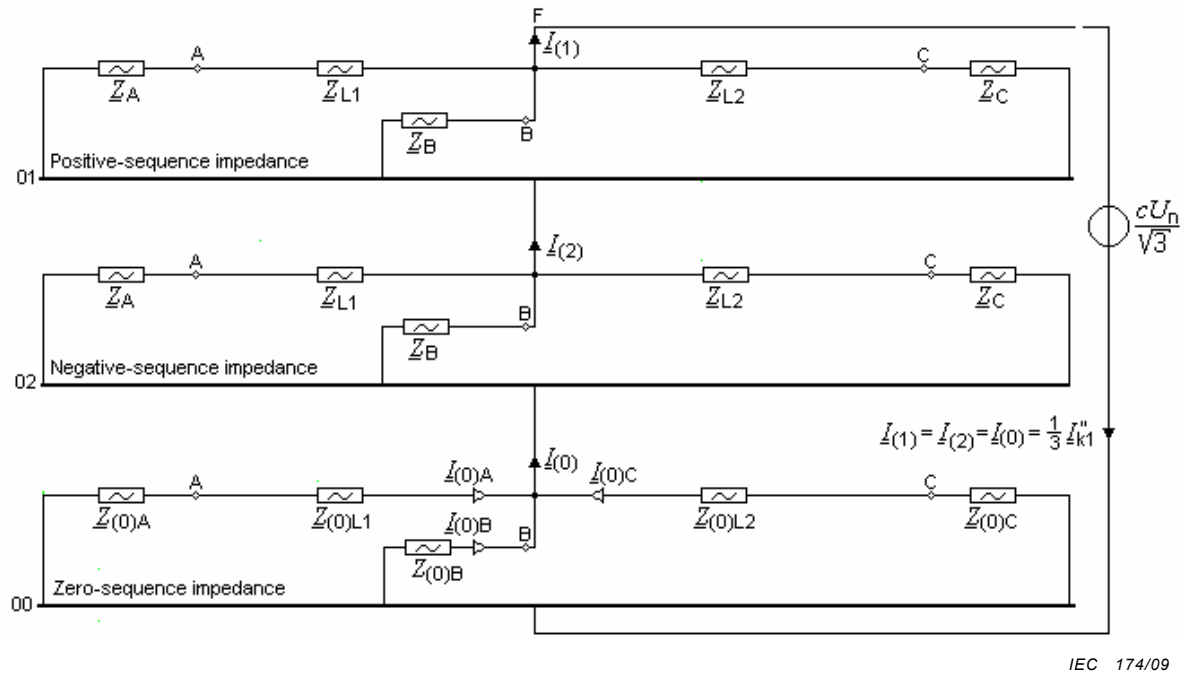


Figure B.2 – Line-to-earth short circuit inside station B – Positive-, negative- and zero-sequence systems with connections at the short-circuit location F within station B

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

$$\underline{I}''_{k1} = \frac{\sqrt{3}\cdot 1{,}1\cdot 132\,\text{kV}}{2(0{,}222 + \text{j}4{,}876)\Omega + (0{,}115 + \text{j}6{,}157)\Omega} = (0{,}555 - \text{j}15{,}789)\,\text{kA};$$

$$I''_{k1} = 15{,}799\,\text{kA}$$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

where

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

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

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

$$\underline{I}_{(0)} = \frac{1}{3}\underline{I}''_{k1} = (0{,}185 - j5{,}263)\text{kA}$$

The partial zero-sequence currents in Figure B.2 are:

$\underline{I}_{(0)A} = (0{,}0753 - j0{,}4439)\text{kA}$; $I_{(0)A} = 0{,}450\text{kA}$
$\underline{I}_{(0)B} = (0{,}0763 - j4{,}6319)\text{kA}$; $I_{(0)B} = 4{,}633\text{kA}$
$\underline{I}_{(0)C} = (0{,}0334 - j0{,}1872)\text{kA}$; $I_{(0)C} = 0{,}190\text{kA}$

The total current $\underline{I}_{EBtot}$ flowing to earth through $\underline{Z}_{EBtot}$ at the short-circuit location in station B (Figure B.1) is calculated with Equation (16), if $\underline{r}_A = \underline{r}_C = \underline{r}$:

$\underline{I}_{EBtot} = \underline{r} \cdot 3(\underline{I}_{(0)A} + \underline{I}_{(0)C}) = 0{,}6 \cdot 3(0{,}1088 - j0{,}6311)\text{kA} = (0{,}1958 - j1{,}1360)\text{kA}$;
$I_{EBtot} = 1{,}1528\text{kA}$

The driving point impedance for calculation of $\underline{Z}_{EBtot}$ is found with $\underline{Z}_Q = \underline{Z}'_Q d_T$ from Equation (1):

$$\underline{Z}_P = 0{,}5(0{,}068 + j0{,}3204)\Omega + \sqrt{[0{,}5(0{,}068 + j0{,}3204)]^2 + 10(0{,}068 + j0{,}3204)}\ \Omega = (1{,}4369 + j1{,}306)\Omega$$

The total earth impedance $\underline{Z}_{EBtot}$ of station B with two outgoing overhead lines is calculated with Equation (17):

$$\underline{Z}_{EBtot} = \frac{1}{\frac{1}{5\Omega} + \frac{2}{(1{,}4369 + j1{,}306)\Omega}} = (0{,}6845 + j\,0{,}4928)\Omega$$

The earth potential of station B is found with Equation (18):

$$\underline{U}_{EB} = (0{,}6845 + j0{,}4928)\Omega\,(0{,}1958 - j1{,}1360)\text{kA} = (0{,}6938 - j0{,}6811)\text{kV}\ ; \quad U_{EB} = 0{,}9722\text{kV}$$

The far-from-station distance D_F (Equation (19)) is:

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

$$D_F = 3\sqrt{R_T}\,\frac{d_T}{\mathrm{Re}\left\{\sqrt{\underline{Z}_Q}\right\}} = 3\sqrt{10\,\Omega}\,\frac{0{,}4\,\mathrm{km}}{\mathrm{Re}\left\{\sqrt{(0{,}068 + \mathrm{j}0{,}3204)\,\Omega}\right\}} = 8{,}53\,\mathrm{km}$$

In a distance longer than D_F, i.e. in a distance remote from the stations, the earth–wire currents are found from the relations given in Equations (15).

$$\underline{I}_{QA} = (1-\underline{r})3\underline{I}_{(0)A} = 0{,}4 \cdot 3 \cdot (0{,}0753 - \mathrm{j}0{,}4439)\,\mathrm{kA} = (0{,}0904 - \mathrm{j}0{,}5327)\,\mathrm{kA}\ ;$$

$$I_{QA} = 0{,}540\,\mathrm{kA}$$

$$\underline{I}_{QC} = (1- \underline{r})3\underline{I}_{(0)C} = 0{,}4 \cdot 3 \cdot (0{,}0334 - \mathrm{j}0{,}1873)\,\mathrm{kA} = (0{,}0401 - \mathrm{j}0{,}2247)\,\mathrm{kA}\ ;$$

$$I_{QC} = 0{,}288\,\mathrm{kA}$$

The currents through earth remote from the stations A and B as well as B and C are:

$$I_{E\delta A} = r \cdot 3I_{(0)A} = 0{,}6 \cdot 3 \cdot 0{,}450\,\mathrm{kA} = 0{,}810\,\mathrm{kA}$$

$$I_{E\delta C} = r \cdot 3I_{(0)C} = 0{,}6 \cdot 3 \cdot 0{,}190\,\mathrm{kA} = 0{,}342\,\mathrm{kA}$$

B.4 Line-to-earth short circuit outside a station

The line-to-earth short circuit shall occur far outside the stations at an overhead line tower T between B and C in Figure B.3. Distances $\ell_{2a} = 60$ km and $\ell_{2b} = 40$ km.

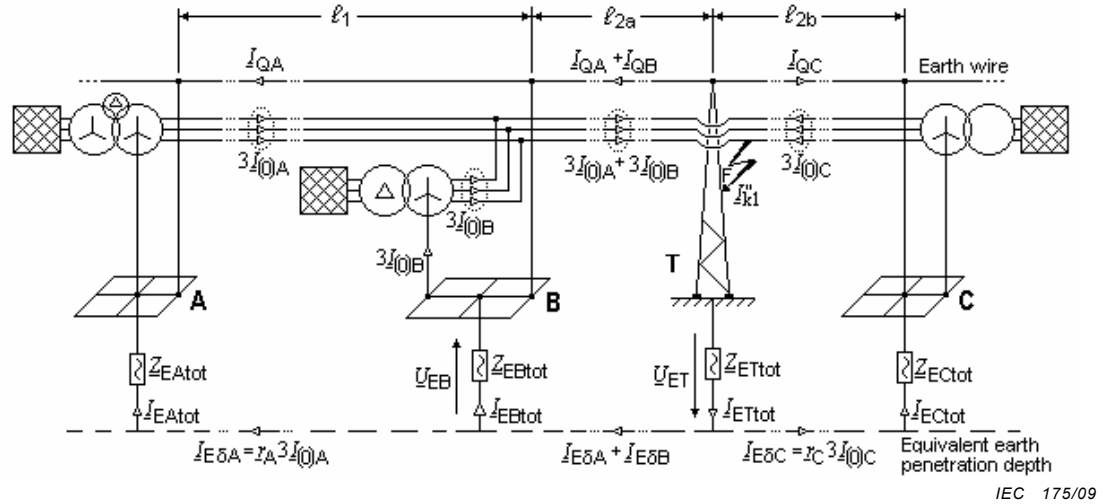


Figure B.3 – Line-to-earth short circuit outside stations B and C at the tower T of an overhead line – System diagram for stations A, B and C

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

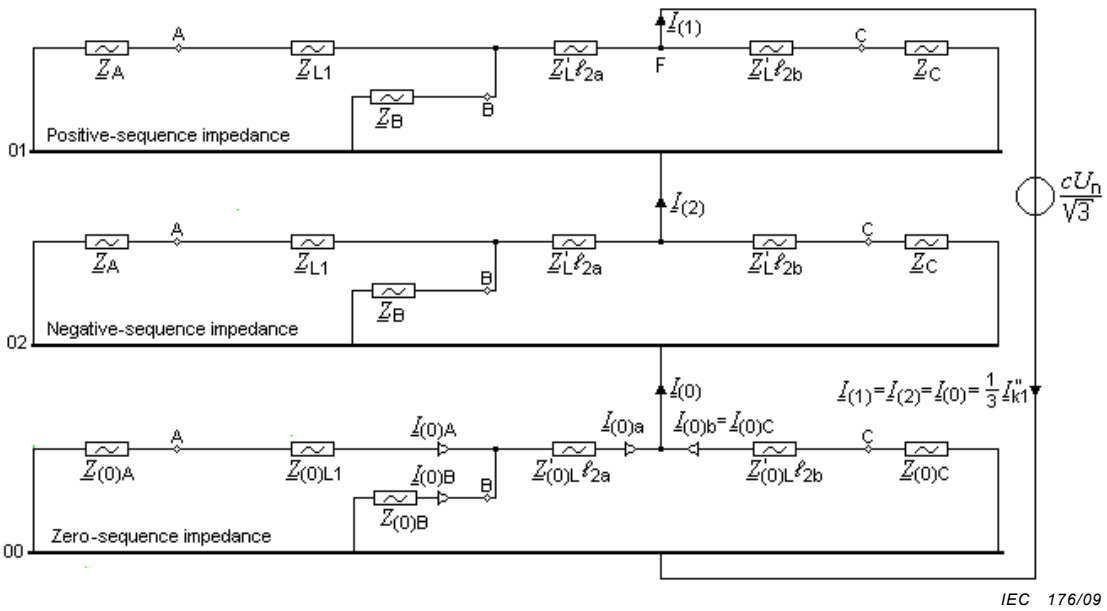


Figure B.4 – Line-to-earth short circuit outside stations B and C at the tower T of an overhead line – Positive-, negative- and zero-sequence systems with connections at the short-circuit location F

The line-to-earth short-circuit current can be calculated with IEC 60909-0, Equation (52), using Figure B.4.

$$\underline{I}''_{k1} = \frac{\sqrt{3}\cdot 1{,}1\cdot 132\,\text{kV}}{2(1{,}7145 + \text{j}13{,}6602)\Omega + (6{,}6262 + \text{j}43{,}3324)\Omega} = (0{,}4965 - \text{j}3{,}4889)\,\text{kA}$$

where

$$\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)} = \frac{1}{\dfrac{1}{\underline{Z}'_{\text{L}}\ell_{2b} + \underline{Z}_{\text{C}}} + \dfrac{1}{\underline{Z}'_{\text{L}}\ell_{2a} + \dfrac{1}{\dfrac{1}{\underline{Z}_{\text{B}}} + \dfrac{1}{\underline{Z}_{\text{L1}} + \underline{Z}_{\text{A}}}}}} = (1{,}7145 + \text{j}13{,}6602)\Omega$$

$$\underline{Z}_{(0)} = \frac{1}{\dfrac{1}{\underline{Z}'_{(0)\text{L}}\ell_{2b} + \underline{Z}_{(0)\text{C}}} + \dfrac{1}{\underline{Z}'_{(0)\text{L}}\ell_{2a} + \dfrac{1}{\dfrac{1}{\underline{Z}_{(0)\text{B}}} + \dfrac{1}{\underline{Z}_{(0)\text{L1}} + \underline{Z}_{(0)\text{A}}}}}} = (6{,}6262 + \text{j}43{,}3324)\Omega$$

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

$$\underline{I}_{(0)} = \frac{1}{3}\underline{I}''_{k1} = (0{,}1655 - \text{j}1{,}1630)\,\text{kA}$$

The partial zero-sequence currents $\underline{I}_{(0)\text{a}}$ and $\underline{I}_{(0)\text{b}}$ on the left and right side of the short-circuit location F in Figure B.4 are found as follows:

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

$$\underline{I}_{(0)a} = \underline{I}_{(0)} \frac{\underline{Z}'_{(0)L}\ell_{2b} + \underline{Z}_{(0)C}}{\underline{Z}'_{(0)L}\ell_{2b} + \underline{Z}_{(0)C} + \underline{Z}'_{(0)L}\ell_{2a} + \dfrac{1}{\dfrac{1}{\underline{Z}_{(0)B}} + \dfrac{1}{\underline{Z}_{(0)L1} + \underline{Z}_{(0)A}}}} = (0{,}0851 - \mathrm{j}0{,}5263)\,\mathrm{kA}$$

$$\underline{I}_{(0)b} = \underline{I}_{(0)} - \underline{I}_{(0)a} = (0{,}0804 - \mathrm{j}0{,}6367)\,\mathrm{kA} = \underline{I}_{(0)C}; \quad I_{(0)C} = 0{,}6417\,\mathrm{kA}$$

The partial zero-sequence currents $\underline{I}_{(0)A}$ and $\underline{I}_{(0)B}$ are found from $\underline{I}_{(0)a}$:

$$\underline{I}_{(0)A} = \underline{I}_{(0)a} \frac{\underline{Z}_{(0)B}}{\underline{Z}_{(0)A} + \underline{Z}_{(0)B} + \underline{Z}_{(0)L1}} = (0{,}0139 - \mathrm{j}0{,}0452)\,\mathrm{kA};$$

$$I_{(0)A} = 0{,}0473\,\mathrm{kA}$$

$$\underline{I}_{(0)B} = \underline{I}_{(0)a} \frac{\underline{Z}_{(0)A} + \underline{Z}_{(0)L1}}{\underline{Z}_{(0)A} + \underline{Z}_{(0)B} + \underline{Z}_{(0)L1}} = (0{,}0712 - \mathrm{j}0{,}4811)\,\mathrm{kA};$$

$$I_{(0)B} = 0{,}4864\,\mathrm{kA}$$

The total current to earth at the short-circuited tower in Figure B.3 is calculated with Equation (22):

$$\underline{I}_{\mathrm{ETtot}} = \underline{r}\,\underline{I}''_{\mathrm{k1}} = 0{,}6 \cdot (0{,}4965 - \mathrm{j}3{,}4889)\,\mathrm{kA} = (0{,}2979 - \mathrm{j}2{,}0933)\,\mathrm{kA};$$

$$I_{\mathrm{ETtot}} = 2{,}114\,\mathrm{kA}$$

With the tower footing resistance R_{T} and the driving point impedance as calculated in Clause B.3, the total earth impedance $\underline{Z}_{\mathrm{ETtot}}$ is found according to Equation (23):

$$\underline{Z}_{\mathrm{ETtot}} = \frac{1}{\dfrac{1}{10\,\Omega} + \dfrac{2}{(1{,}437 + \mathrm{j}1{,}306)\,\Omega}} = (0{,}7048 + \mathrm{j}0{,}5663)\,\Omega;$$

$$\underline{Z}_{\mathrm{ETtot}} = 0{,}9041\,\Omega$$

The earth potential at the tower is calculated with Equation (24):

$$\underline{U}_{\mathrm{ET}} = \underline{Z}_{\mathrm{ETtot}}\,\underline{I}_{\mathrm{ETtot}} = (0{,}7048 + \mathrm{j}0{,}5653)\,\Omega \cdot (0{,}2979 - \mathrm{j}2{,}0933)\,\mathrm{kA} = (1{,}3954 - \mathrm{j}1{,}3067)\,\mathrm{kV};$$

$$U_{\mathrm{ET}} = 1{,}912\,\mathrm{kV}$$

The currents in the stations A, B and C are:

$$\underline{I}_{\mathrm{EAtot}} = \underline{r}3\underline{I}_{(0)A} = 0{,}6 \cdot 3 \cdot 0{,}0473\,\mathrm{kA} = 0{,}0851\mathrm{kA}$$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

$$\underline{I}_{\mathrm{EBtot}} = \underline{r}3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}} = 0{,}6 \cdot 3 \cdot 0{,}4864\,\mathrm{kA} = 0{,}8754\,\mathrm{kA}$$

$$\underline{I}_{\mathrm{ECtot}} = \underline{r}3\underline{I}_{(0)\mathrm{C}} = 0{,}6 \cdot 3 \cdot 0{,}6417\,\mathrm{kA} = 1{,}1551\mathrm{kA}$$

The earth potential of station B for example is found as follows:

$$\underline{U}_{\mathrm{EB}} = \underline{Z}_{\mathrm{EBtot}} \cdot \underline{r} \cdot 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}} = (0{,}6845 + \mathrm{j}0{,}4928)\Omega \cdot 0{,}6 \cdot 3 \cdot (0{,}0712 - \mathrm{j}0{,}4811)\mathrm{kA} = (0{,}5145 - \mathrm{j}0{,}5296)\mathrm{kV}$$

$$U_{\mathrm{EB}} = 0{,}7383\,\mathrm{kV}$$

The currents in the earth wires and through the earth at a longer distance from the stations and the short-circuited tower (Figure B.3) are:

$$\underline{I}_{\mathrm{QA}} = (1 - \underline{r})3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} = 0{,}4 \cdot 3 \cdot (0{,}0139 - \mathrm{j}0{,}0452)\mathrm{kA} = (0{,}0167 - \mathrm{j}0{,}0542)\mathrm{kA}\,;$$

$$I_{\mathrm{QA}} = 0{,}0567\,\mathrm{kA}$$

$$\underline{I}_{\mathrm{QA}} + \underline{I}_{\mathrm{QB}} = (1 - \underline{r})3(\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} + \underline{I}_{(0)\mathrm{B}}) = 0{,}4 \cdot 3 \cdot (0{,}0851 - \mathrm{j}0{,}5263)\mathrm{kA} = (0{,}1021 - \mathrm{j}0{,}6316)\mathrm{kA}\,;$$

$$\left|\underline{I}_{\mathrm{QA}} + \underline{I}_{\mathrm{QB}}\right| = 0{,}6397\,\mathrm{kA}\,;$$

$$\underline{I}_{\mathrm{QC}} = (1 - \underline{r})3\underline{I}_{(0)\mathrm{C}} = 0{,}4 \cdot 3 \cdot (0{,}0804 - \mathrm{j}0{,}6367)\mathrm{kA} = (0{,}0965 - \mathrm{j}0{,}7640)\mathrm{kA}\,;$$

$$I_{\mathrm{QC}} = 0{,}7701\mathrm{kA}$$

$$I_{\mathrm{E}\delta\mathrm{A}} = r3I_{(0)\mathrm{A}} = 0{,}6 \cdot 3 \cdot 0{,}0473\,\mathrm{kA} = 0{,}0851\mathrm{kA}$$

$$I_{\mathrm{E}\delta\mathrm{A}} + I_{\mathrm{E}\delta\mathrm{B}} = r3\left|\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} + \underline{I}_{(0)\mathrm{B}}\right| = 0{,}6 \cdot 3 \cdot 0{,}5331\,\mathrm{kA} = 0{,}9596\,\mathrm{kA}$$

$$I_{\mathrm{E}\delta\mathrm{C}} = r3I_{(0)\mathrm{C}} = 0{,}6 \cdot 3 \cdot 0{,}6417\,\mathrm{kA} = 1{,}1551\mathrm{kA}$$

B.5 Line-to-earth short circuit in the vicinity of a station

As an example, the line-to-earth short-circuit current and the earth potentials shall be calculated, if the short circuit occurs at a tower T with the number n = 10 at the overhead line between the stations B and C at a distance of 4,4 km from station B (see Figure 7).

The line-to-earth short-circuit current is calculated according to IEC 60909-0, Equation (52) using Figure B.4 with changed line lengths.

$$\underline{I}''_{\mathrm{k1}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1{,}1 \cdot 132\,\mathrm{kV}}{2(0{,}4449 + \mathrm{j}5{,}9037)\Omega + (1{,}2412 + \mathrm{j}11{,}9481)\Omega} = (0{,}9421 - \mathrm{j}10{,}5022)\mathrm{kA}\,;$$

$$I''_{\mathrm{k1}} = 10{,}5444\,\mathrm{kA}$$

where

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

$$\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)} = \frac{1}{\dfrac{1}{\underline{Z}'_{\mathrm{L}}(\ell_2 - 11\cdot d_{\mathrm{T}}) + \underline{Z}_{\mathrm{C}}} + \dfrac{1}{\underline{Z}'_{\mathrm{L}}\cdot 11\cdot d_{\mathrm{T}} + \dfrac{1}{\dfrac{1}{\underline{Z}_{\mathrm{B}}} + \dfrac{1}{\underline{Z}_{\mathrm{L1}} + \underline{Z}_{\mathrm{A}}}}}} = (0{,}4449 + \mathrm{j}5{,}9037)\,\Omega$$

$$\underline{Z}_{(0)} = \frac{1}{\dfrac{1}{\underline{Z}'_{(0)\mathrm{L}}(\ell_2 - 11\cdot d_{\mathrm{T}}) + \underline{Z}_{(0)\mathrm{C}}} + \dfrac{1}{\underline{Z}'_{(0)\mathrm{L}}\cdot 11\cdot d_{\mathrm{T}} + \dfrac{1}{\dfrac{1}{\underline{Z}_{(0)\mathrm{B}}} + \dfrac{1}{\underline{Z}_{(0)\mathrm{L1}} + \underline{Z}_{(0)\mathrm{A}}}}}} = (1{,}2412 + \mathrm{j}11{,}9481)\,\Omega$$

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

$$\underline{I}_{(0)} = \frac{1}{3}\underline{I}''_{\mathrm{k1}} = (0{,}3141 - \mathrm{j}3{,}5007)\,\mathrm{kA}$$

The partial zero-sequence currents $\underline{I}_{(0)\mathrm{a}}$ and $\underline{I}_{(0)\mathrm{b}}$ on the left and right side of the tower T (n=10) are found as follows:

$$\underline{I}_{(0)\mathrm{a}} = \underline{I}_{(0)}\frac{\underline{Z}'_{(0)\mathrm{L}}(\ell_2 - 11\cdot d_{\mathrm{T}}) + \underline{Z}_{(0)\mathrm{C}}}{\underline{Z}'_{(0)\mathrm{L}}(\ell_2 - 11\cdot d_{\mathrm{T}}) + \underline{Z}_{(0)\mathrm{C}} + \underline{Z}'_{(0)\mathrm{L}}\cdot 11\cdot d_{\mathrm{T}} + \dfrac{1}{\dfrac{1}{\underline{Z}_{(0)\mathrm{B}}} + \dfrac{1}{\underline{Z}_{(0)\mathrm{L1}} + \underline{Z}_{(0)\mathrm{A}}}}} = (0{,}2767 - \mathrm{j}3{,}2458)\,\mathrm{kA}$$

$\underline{I}_{(0)\mathrm{b}} = \underline{I}_{(0)} - \underline{I}_{(0)\mathrm{a}} = (0{,}03731 - \mathrm{j}0{,}2549)\,\mathrm{kA} = \underline{I}_{(0)\mathrm{C}}$;

$I_{(0)\mathrm{C}} = 0{,}2577\,\mathrm{kA}$

The partial zero-sequence currents $\underline{I}_{(0)\mathrm{A}}$ and $\underline{I}_{(0)\mathrm{B}}$ are found from $\underline{I}_{(0)\mathrm{a}}$:

$$\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} = \underline{I}_{(0)\mathrm{a}}\frac{\underline{Z}_{(0)\mathrm{B}}}{\underline{Z}_{(0)\mathrm{A}} + \underline{Z}_{(0)\mathrm{B}} + \underline{Z}_{(0)\mathrm{L1}}} = (0{,}0640 - \mathrm{j}0{,}2817)\,\mathrm{kA}\,;$$

$I_{(0)\mathrm{A}} = 0{,}2888\,\mathrm{kA}$

$$\underline{I}_{(0)\mathrm{B}} = \underline{I}_{(0)\mathrm{a}}\frac{\underline{Z}_{(0)\mathrm{A}} + \underline{Z}_{(0)\mathrm{L1}}}{\underline{Z}_{(0)\mathrm{A}} + \underline{Z}_{(0)\mathrm{B}} + \underline{Z}_{(0)\mathrm{L1}}} = (0{,}2128 - \mathrm{j}2{,}9642)\,\mathrm{kA}\,;$$

$I_{(0)\mathrm{B}} = 2{,}9718\,\mathrm{kA}$

The factor $\underline{k}$ can be calculated from Equation (3):

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

$$\underline{k} = 1 + \frac{\underline{Z}_{\mathrm{P}}}{R_{\mathrm{T}}} = 1 + \frac{(1{,}4369 + \mathrm{j}1{,}3060)\,\Omega}{10\,\Omega} = (1{,}1437 + \mathrm{j}0{,}1306)$$

The earthing impedance of station B in this case is calculated with Equation (29):

$$\underline{Z}_{\mathrm{EB}} = \frac{1}{\frac{1}{R_{\mathrm{B}}} + \frac{1}{\underline{Z}_{\mathrm{P}}}} = \frac{1}{\frac{1}{5\,\Omega} + \frac{1}{(1{,}4370 + \mathrm{j}1{,}3060)\,\Omega}} = (1{,}2698 + \mathrm{j}0{,}7568)\,\Omega$$

The driving point impedance of the finite chain for n=10 is found from Equation (2):

$$\underline{Z}_{\mathrm{P10}} = (1{,}4294 + \mathrm{j}1{,}3200)\,\Omega\,; \quad Z_{\mathrm{P10}} = 1{,}9457\,\Omega$$

The earthing impedance for the short-circuited tower is to be calculated with Equation (28):

$$\underline{Z}_{\mathrm{ET}} = \frac{1}{\frac{1}{R_{\mathrm{T}}} + \frac{1}{\underline{Z}_{\mathrm{P}}}} = \frac{1}{\frac{1}{10\,\Omega} + \frac{1}{(1{,}4370 + \mathrm{j}1{,}3060)\,\Omega}} = (1{,}3690 + \mathrm{j}0{,}9856)\,\Omega$$

The current $\underline{I}_{\mathrm{ET10}}$ flowing through $\underline{Z}_{\mathrm{ET}}$ at the tower n = 10 is found with Equation (27):

$$\underline{I}_{\mathrm{ET10}} = \underline{r}\underline{I}''_{\mathrm{k1}} \frac{\underline{Z}_{\mathrm{P10}}}{\underline{Z}_{\mathrm{P10}} + \underline{Z}_{\mathrm{ET}}} - \underline{r}3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}} \frac{\underline{Z}_{\mathrm{EB}}}{\underline{Z}_{\mathrm{EB}} + \underline{Z}_{\mathrm{P}}} \cdot \frac{1}{\underline{k}^{10}} = 0{,}6\,(0{,}9421 - \mathrm{j}10{,}5022)\,\mathrm{kA}\,\frac{(1{,}4294 + \mathrm{j}1{,}3200)\,\Omega}{(2{,}798 + \mathrm{j}2{,}306)\,\Omega}$$

$$- 0{,}6 \cdot 3 \cdot (0{,}2128 - \mathrm{j}2{,}9642)\,\mathrm{kA}\,\frac{(1{,}2697 + \mathrm{j}0{,}7568)\,\Omega}{(2{,}7067 + \mathrm{j}2{,}0628)\,\Omega} \cdot \frac{1}{(1{,}1437 + \mathrm{j}0{,}1306)^{10}} = (1{,}0194 - \mathrm{j}3{,}1417)\,\mathrm{kA}$$

$$I_{\mathrm{ET10}} = 3{,}3029\,\mathrm{kA}$$

The earth potential at the short-circuited tower is given according to Equation (30):

$$\underline{U}_{\mathrm{ET10}} = \underline{Z}_{\mathrm{ET}}\,\underline{I}_{\mathrm{ET10}} = (4{,}4918 + \mathrm{j}3{,}2961)\,\mathrm{kV}\,;$$

$$U_{\mathrm{ET10}} = 5{,}5714\,\mathrm{kV}$$

The current passing $\underline{Z}_{\mathrm{EB}}$ in this case of a line-to-earth short circuit at the tower (n=10) in the vicinity of station B is found with Equation (31):

$$\underline{I}_{\mathrm{EB10}} = \underline{r}\underline{I}''_{\mathrm{k1}} \frac{\underline{Z}_{\mathrm{ET}}}{\underline{Z}_{\mathrm{ET}} + Z_{\mathrm{P10}}} \cdot \frac{2\underline{Z}_{\mathrm{P}} + \underline{Z}_{\mathrm{Q}}}{(\underline{Z}_{\mathrm{EB}} + \underline{Z}_{\mathrm{P}})\underline{k}^{10} - (\underline{Z}_{\mathrm{EB}} - \underline{Z}_{\mathrm{P}} + \underline{Z}_{\mathrm{Q}})\underline{k}^{-10}} - \underline{r}\,3\,\underline{I}_{(0)\mathrm{B}} \frac{\underline{Z}_{\mathrm{P}}}{\underline{Z}_{\mathrm{EB}} + \underline{Z}_{\mathrm{P}}}$$

$$= 0{,}6\,(0{,}9421 - \mathrm{j}10{,}5022)\,\mathrm{kA}\,\frac{(1{,}3690 + \mathrm{j}0{,}9856)\,\Omega}{(2{,}7984 + \mathrm{j}2{,}3056)\,\Omega}\,(0{,}1185 - \mathrm{j}0{,}2323)$$

$$- 0{,}6 \cdot 3 \cdot (0{,}2128 - \mathrm{j}2{,}9642)\,\mathrm{kA}\,\frac{(1{,}4370 + \mathrm{j}1{,}3060)\,\Omega}{(2{,}7067 + \mathrm{j}2{,}0628)\,\Omega} = (1{,}1557 - \mathrm{j}2{,}6487)\,\mathrm{kA}\,;$$

$$I_{\mathrm{EB10}} = 2{,}8899\,\mathrm{kA}$$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

The earth potential of the station B is calculated with Equation (32):

$$\underline{U}_{\mathrm{EB10}} = \underline{Z}_{\mathrm{EB}}\,\underline{I}_{\mathrm{EB10}} = (-3{,}4720 + \mathrm{j}2{,}4884)\,\mathrm{kV};$$

$$U_{\mathrm{EB10}} = 4{,}272\,\mathrm{kV}$$

Figure B.5 shows the earth potentials $U_{\mathrm{ET}n}$ related to $U_{\mathrm{ET}} = 1{,}912\,\mathrm{kV}$ from Clause B.4 and $U_{\mathrm{EB}n}$ related to the earth potential $U_{\mathrm{EB}} = 0{,}972\,\mathrm{kV}$ from Clause B.3.

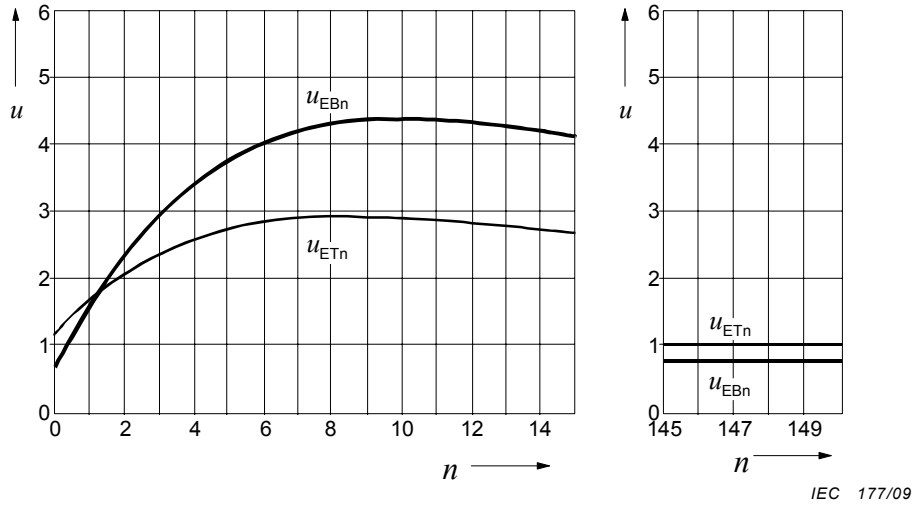


Figure B.5 – Earth potentials $u_{\mathrm{ET}n} = U_{\mathrm{Et}n}/U_{\mathrm{ET}}$ with U_{ET} = 1,912 kV and $u_{\mathrm{EB}n} = U_{\mathrm{Eb}n}/U_{\mathrm{EB}}$ with U_{EB} = 0,972 kV, if the line-to-earth short circuit occurs at the towers n = 1, 2, 3, ... in the vicinity of station B

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Annex C
(informative)

Example for the calculation of the reduction factor r_1 and the current distribution through earth in case of a three-core cable

C.1 Overview

A 10-kV-cable-connection between the stations A and B is given through a three-core cable with a copper shield earthed at both ends in a 10-kV-network with direct earthing (the star point of a feeding transformer is earthed at the medium-voltage side).

C.2 Line-to-earth short circuit at the end of the cable

C.2.1 Data

Cable: 6/10 kV NA2XS2Y 3×150/25

Aluminium cores: q_{L} = 150 mm^2; r_{L} = 6,91 mm; $R'_{\mathrm{L}} = 0{,}206\ \Omega/\mathrm{km}$;

Copper shield: q_{S} = 25 mm^2; r_{S} = 23,6 mm; $R'_{\mathrm{S}} = 0{,}714\ \Omega/\mathrm{km}$;

Distance between the cores of the cable d = 22,38 mm;

Outer diameter of the cable $D_{\mathrm{a}} = 53$ mm

Earthing impedances: Z_{EA} = 0,5 Ω; Z_{EB} = 0,5 Ω;

Soil resistivity: $\rho = 100\ \Omega\mathrm{m}$

C.2.2 Cable impedances per unit length

With Equations (30) and (32), given in IEC/TR 60909-2, the following results are found.

Positive-sequence impedance per unit length:

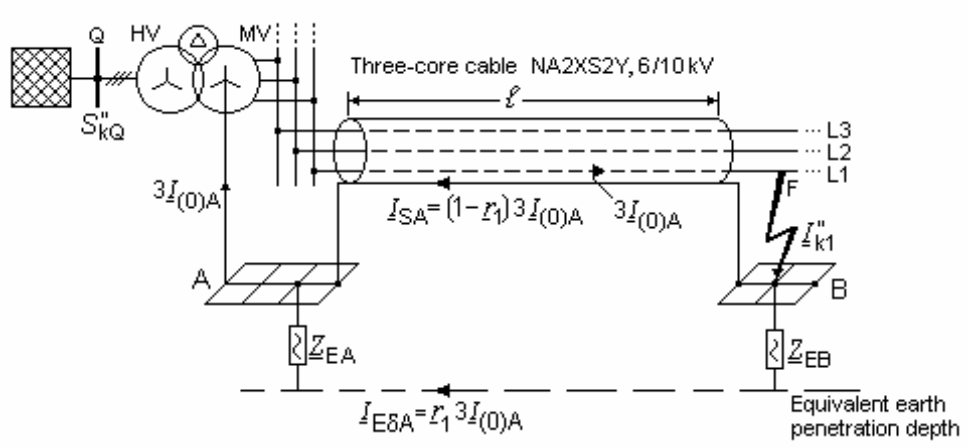
$$\underline{Z}'_{(1)\mathrm{L}} = R'_{\mathrm{L}} + \mathrm{j}\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\left(\frac{1}{4} + \ln\frac{d}{r_{\mathrm{L}}}\right) = (0{,}206 + \mathrm{j}0{,}0896)\ \Omega/\mathrm{km}$$

Zero-sequence impedance per unit length in case of current flowing back through the shield (S) and the earth (E):

$$\underline{Z}'_{(0)\mathrm{LSE}} = R'_{\mathrm{L}} + 3\omega\frac{\mu_0}{8} + \mathrm{j}\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\left(\frac{1}{4} + 3\ln\frac{\delta}{\sqrt[3]{r_{\mathrm{L}}\,d^2}}\right) - \frac{3\left(\omega\frac{\mu_0}{8} + \mathrm{j}\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\ln\frac{\delta}{r_{\mathrm{S}}}\right)^2}{R'_{\mathrm{S}} + \omega\frac{\mu_0}{8} + \mathrm{j}\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\ln\frac{\delta}{r_{\mathrm{S}}}} = (1{,}209 + \mathrm{j}1{,}092)\frac{\Omega}{\mathrm{km}}$$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

C.2.3 Short-circuit currents



Network feeder: $S''_{kQ} = 3000\text{MVA}$; U_{nQ} = 110 kV; R_Q/X_Q = 0,1:

Transformer: S_{rT} = 31,5 MVA; U_{rTHV} = 115 kV; U_{rTLV} = 10,5 kV; u_{kr} = 12%; u_{Rr} = 1%; $\underline{Z}_{(0)T} = 1{,}6 \cdot \underline{Z}_{(1)T}$.

Figure C.1 – Example for the calculation of the cable reduction factor and the current distribution through earth in a 10-kV-network, U_n = 10 kV; c = 1,1; f = 50 Hz

According to 6.1, the impedances $\underline{Z}_{EA}$ and $\underline{Z}_{EB}$ are neglected when calculating the short-circuit currents with earth connection.

Short-circuit currents:

$$\underline{I}''_k = \underline{I}''_{k3} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}(\underline{Z}_{Qt} + \underline{Z}_{TLV} + \underline{Z}'_{(1)L}\ell)};$$

$$\underline{I}''_k(\ell = 0) = (1{,}186 + \text{j}13{,}844)\text{kA}$$

Line-to-earth short-circuit current flowing back through the shield and the earth

$$\underline{I}''_{k1SE} = \frac{\sqrt{3}cU_n}{2 \cdot \underline{Z}_{Qt} + 2 \cdot \underline{Z}_{TLV} + \underline{Z}_{(0)TLV} + (2 \cdot \underline{Z}'_{(1)L} + \underline{Z}'_{(0)LSE}) \cdot \ell}$$

$$\underline{I}''_{k1SE}(\ell = 0) = (1{,}015 - \text{j}11{,}968)\text{kA}$$

C.2.4 Reduction factor, current in the shield and current through earth

The current in the shield is calculated with Equation (40):

$$\underline{I}_{SA} = (1 - \underline{r}_1)\, 3\underline{I}_{(0)A} = (1 - \underline{r}_1)\, \underline{I}''_{k1SE}$$

The partial short-circuit current flowing through earth is found with Equation (41):

$$\underline{I}_{E\delta A} = \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)A} = \underline{r}_1 \underline{I}''_{k1SE}$$

Reduction factor $\underline{r}_1$ from Equation (37):

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

$$\underline{r}_1 = \frac{R'_S}{R'_S + \omega\frac{\mu_0}{8} + \mathrm{j}\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\ln\frac{\delta}{r_S}} = \frac{0{,}714\,\frac{\Omega}{\mathrm{km}}}{\left(0{,}714 + 0{,}04935 + \mathrm{j}\cdot 0{,}06283\cdot\ln\frac{931\mathrm{m}}{23{,}6\cdot 10^{-3}\mathrm{m}}\right)\frac{\Omega}{\mathrm{km}}}$$

$\underline{r}_1 = 0{,}5318 - \mathrm{j}0{,}4633\ ;$

$r_1 = 0{,}7053$

Figure C.2 gives the calculated short-circuit currents, the current in the shield and the current through earth depending on the length $\ell \geq 1\,\mathrm{km}$ of the cable between stations A and B.

Earthing voltage in station A, in case of $\ell = 5\mathrm{km}$ and $I_{\mathrm{E}\delta\mathrm{A}} = 1{,}175\mathrm{kA}$ (see Table C.1) is:

$U_{\mathrm{EA}} = Z_{\mathrm{EA}} I_{\mathrm{E}\delta\mathrm{A}} = 0{,}5\,\Omega\cdot 1{,}175\mathrm{kA} = 588\,\mathrm{V}$

Table C.1 – Results for the example in Figure C.1

ℓ	$\underline{I}''_{\mathrm{k1SE}}$	I''_{k1SE}	$\underline{I}_{\mathrm{SA}}$	I_{SA}	$\underline{I}_{\mathrm{E}\delta\mathrm{A}}$	$I_{\mathrm{E}\delta\mathrm{A}}$
km	kA	kA	kA	kA	kA	kA
1	2,983 –j4,846	5,690	3,641 –j0,887	3,748	–0,659 –j3,959	4,014
5	1,200 –j1,156	1,666	1,097 +j0,015	1,097	0,103 –j1,170	1,175
10	0,661 –j0,578	0,878	0,577 +j0,036	0,578	0,084 –j0,613	0,619

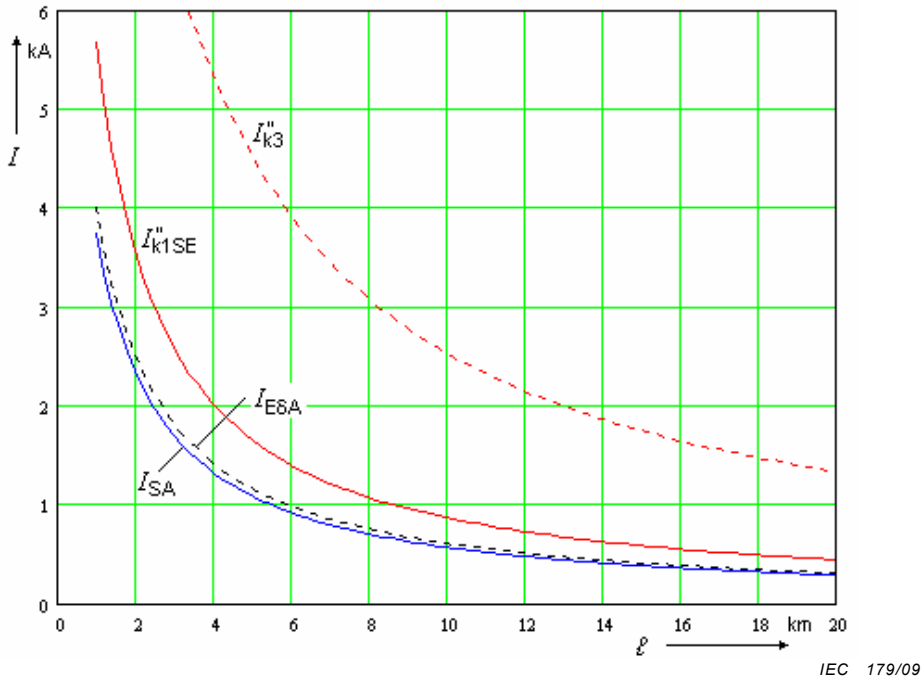


Figure C.2 – Short-circuit currents and partial short-circuit currents through earth for the example in Figure C.1

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

C.3 Line-to-earth short circuit on the cable between the stations A and B

C.3.1 Configuration and data

The configuration is given in Figure C.3.

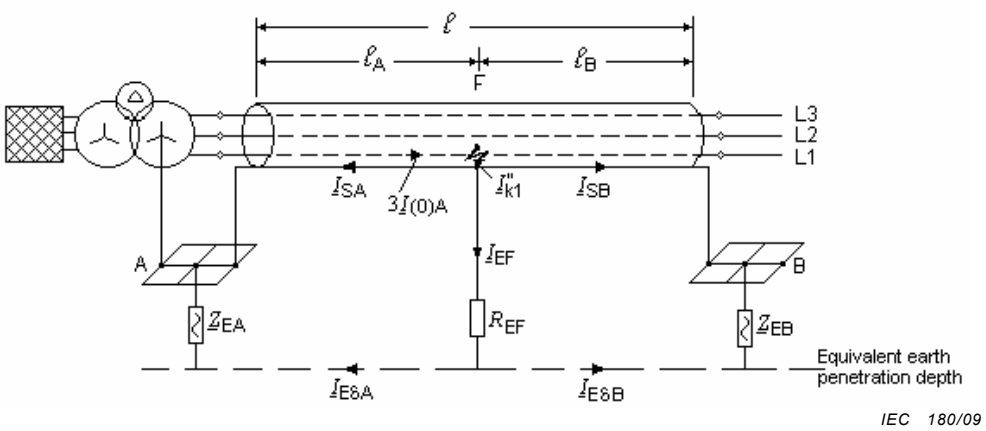


Figure C.3 – Example for the calculation of current distribution in a 10-kV-network with a short circuit on the cable between A and B (data given in C.2.1 and Figure C.1)

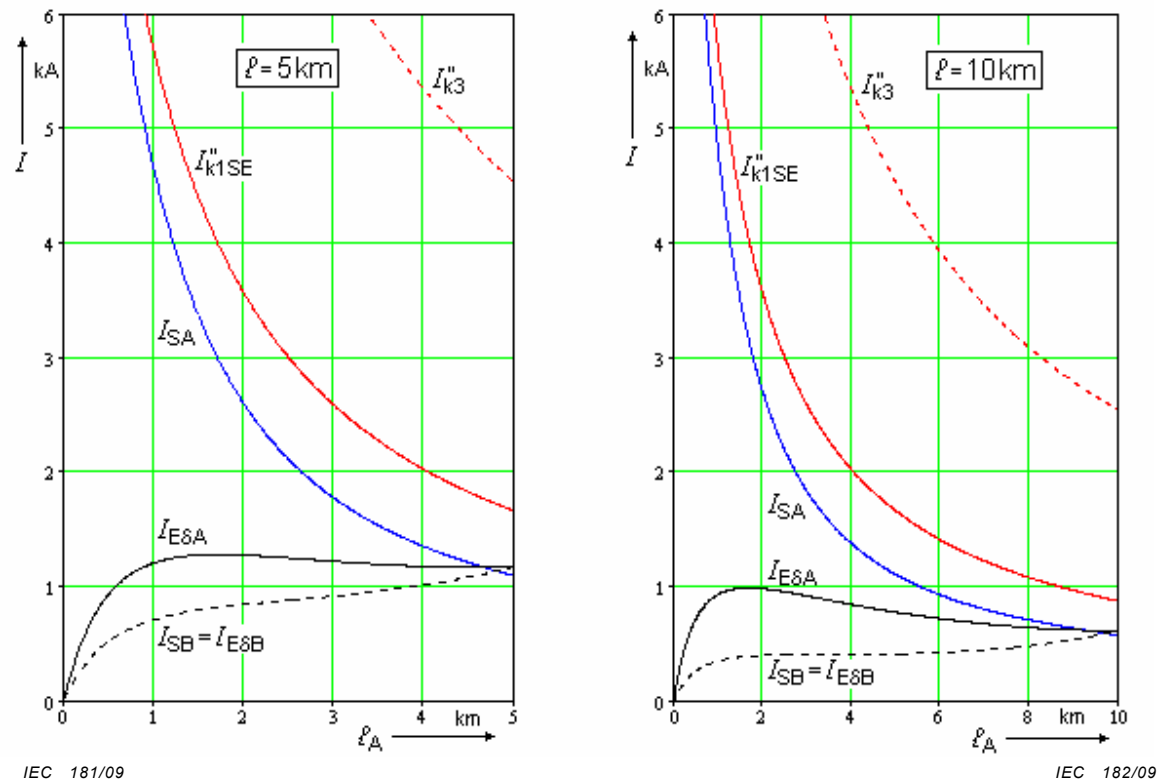
The line-to-earth short circuit in Figure C.3 is fed only from station A. The line-to-earth short-circuit is anticipated with earth connection at the short-circuit location F having $R_{EF} = 5\Omega$ (see 8.2.2.2).

C.3.2 Results of calculation

The reduction factor $\underline{r}_1 = 0{,}5318 - j0{,}4633$ is already calculated with Equation (37).

The currents $\underline{I}_{SA}$ and $\underline{I}_{E\delta A}$ on the left side of the short-circuit location are calculated with Equations (42) and (45) and the currents on the right side of the short-circuit location with Equations (43) and (46). In case of $3\underline{I}_{(0)B} = 0$ according to Figure C.3, the following relation is valid: $\underline{I}_{E\delta B} = -\underline{I}_{SB}$.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale



a) Cable length ℓ = 5 km **b) Cable length ℓ =10 km**

Figure C.4 – Line-to-earth short-circuit currents, partial currents in the shield and partial currents through earth

Table C.2 – Results for the example in Figure C.3, $\ell = 5$ km

ℓ_A	I''_{k1SE}	$\underline{I}_{SA}$	I_{SA}	$\underline{I}_{SB} = -\underline{I}_{E\delta B}$	I_{SB}	$\underline{I}_{E\delta A}$	$I_{E\delta A}$
km	kA	kA	kA	kA	kA	kA	kA
0	12,000	1,016 –j11,967	12,000	0	0	0	0
1	5,090	2,911 –j3,640	4,661	–0,183 –j0,688	0,712	0,072 –j1,206	1,208
2,5	3,006	1,858 –j1,011	2,115	–0,188 –j0,874	0,882	0,128 –j1,246	1,253
5	1,666	1,097 + j0,015	1,097	0,103 –j1,170	1,175	0,103 –j1,170	1,175

Table C.3 – Results for the example in Figure C.3, $\ell = 10$ km

ℓ_A	I''_{k1SE}	$\underline{I}_{SA}$	I_{SA}	$\underline{I}_{SB} = -\underline{I}_{E\delta B}$	I_{SB}	$\underline{I}_{E\delta A}$	$I_{E\delta A}$
km	kA	kA	kA	kA	kA	kA	kA
0	12,000	1,016 –j11,967	12,000	0	0	0	0
1	5,690	2,800 –j3,931	4,826	–0,094 –j0,338	0,351	0,183 –j0,915	0,933
2,5	3,006	1,750 –j1,330	2,198	–0,075 –j0,309	0,405	0,236 –j0,928	0,957
5	1,666	1,036 –j0,394	1,108	–0,061 –j0,409	0,413	0,164 –j0,762	0,779
10	0,878	0,577 –j0,036	0,578	0,084 –j0,613	0,619	0,084 –j0,613	0,619

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Annex D
(informative)

Example for the calculation of the reduction factor r_3 and the current distribution through earth in case of three single-core cables

D.1 Overview

A 110-kV-cable-connection between the stations A and B is given with three single-core cables with a lead sheath earthed at both ends in a 110-kV-network with solidly earthed neutral.

D.2 Line-to-earth short circuit at the end of the cable

D.2.1 Data

Single-core cables 64/110 kV, 2XK2Y: 3×1×630 rm, Cu, in triangular configuration.

Copper cores: q_{L} = 630 mm^2; r_{L} = 15,6 mm; $R'_{\mathrm{L}} = 0{,}0283\,\Omega/\mathrm{km}$;

Lead sheath: q_{S} = 550 mm^2; r_{S} = r_{Sm} = 39,8 mm; $R'_{\mathrm{S}} = 0{,}379\,\Omega/\mathrm{km}$;

Outer diameter of the cable D_{a} = 85 mm;

Distance between the cores of the cable d =1,06·D_{a} = 90,1 mm;

Soil resistivity: $\rho = 100\ \Omega\mathrm{m}$

D.2.2 Cable impedances per unit length

Positive-sequence impedance per unit length (IEC/TR 60909-2, Equation (15)):

$$\underline{Z}'_{(1)\mathrm{LS}} = R'_{\mathrm{L}} + \mathrm{j}\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\left(\frac{1}{4} + \ln\frac{d}{r_{\mathrm{L}}}\right) + \frac{\left(\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\ln\frac{d}{r_{\mathrm{Sm}}}\right)^2}{R'_{\mathrm{S}} + \mathrm{j}\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\ln\frac{d}{r_{\mathrm{Sm}}}} = (0{,}0351 + \mathrm{j}0{,}125)\,\Omega/\mathrm{km}$$

NOTE 1 When taking care of the currents in the sheaths during balanced operation (no cross bonding), the real part of $\underline{Z}'_{(1)\mathrm{LS}}$ is higher than the real part of $\underline{Z}'_{(1)\mathrm{L}}$, because of the losses in the sheaths, see IEC/TR 60909-2, Table 5.

Zero-sequence impedance per unit length in case of current flowing back through the sheaths only:

$$\underline{Z}'_{(0)\mathrm{LS}} = R'_{\mathrm{L}} + R'_{\mathrm{S}} + \mathrm{j}\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\left(\frac{1}{4} + \ln\frac{r_{\mathrm{S}}}{r_{\mathrm{L}}}\right) = (0{,}4073 + \mathrm{j}0{,}0746)\,\Omega/\mathrm{km}$$

Zero-sequence impedance per unit length in case of current flowing back through the sheaths and the earth (IEC/TR 60909-2, Equation (16)):

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

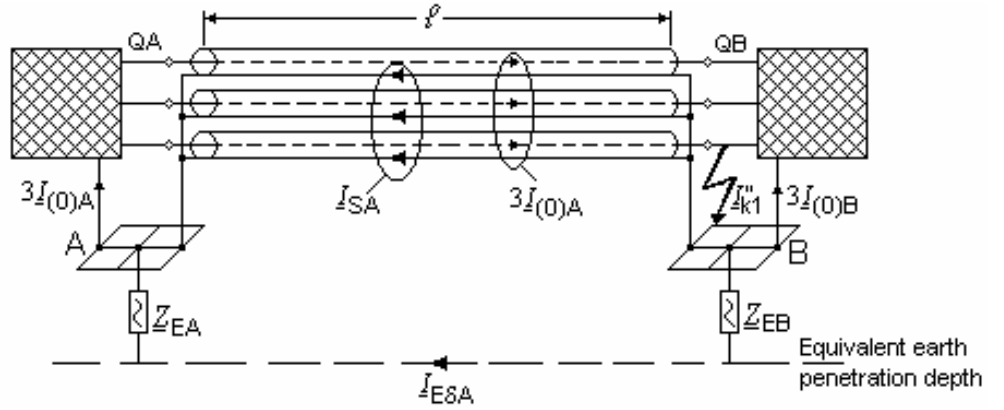
$$\underline{Z}'_{(0)\mathrm{LSE}} = R'_{\mathrm{L}} + 3\omega\frac{\mu_0}{8} + \mathrm{j}\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\left(\frac{1}{4} + 3\ln\frac{\delta}{\sqrt[3]{r_{\mathrm{L}}d^2}}\right) - \frac{\left(3\omega\frac{\mu_0}{8} + \mathrm{j}3\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\ln\frac{\delta}{\sqrt[3]{r_{\mathrm{L}}d^2}}\right)^2}{R'_{\mathrm{S}} + 3\omega\frac{\mu_0}{8} + \mathrm{j}3\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\ln\frac{\delta}{\sqrt[3]{r_{\mathrm{L}}d^2}}} = (0{,}3856 + \mathrm{j}0{,}1483)\,\Omega/\mathrm{km}$$

NOTE 2 The zero-sequence impedance $Z'_{(0)\mathrm{LS}} = 0{,}4141\,\Omega/\mathrm{km}$ in case of current flowing back through the sheaths differs only for about 0,2 % from $Z'_{(0)\mathrm{LSE}} = 0{,}4131\,\Omega/\mathrm{km}$.

D.2.3 Short-circuit currents

From the network configuration and the data given in Figure D.1, the following short-circuit currents can be found for a line-to-earth short circuit in station B.

$$\underline{I}''_{\mathrm{k1}} = 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} + 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}}$$



IEC 183/09

Network feeder QA: $\underline{Z}_{(1)\mathrm{QA}} = (0{,}442 + \mathrm{j}4{,}418)\,\Omega;\ \underline{Z}_{(0)\mathrm{QA}} = (1{,}768 + \mathrm{j}8{,}836)\,\Omega$

Network feeder QB: $\underline{Z}_{(1)\mathrm{QB}} = (1{,}350 + \mathrm{j}8{,}000)\,\Omega;\ \underline{Z}_{(0)\mathrm{QB}} = (4{,}050 + \mathrm{j}12{,}800)\,\Omega$

Figure D.1 – Example for the calculation of the reduction factor and the current distribution in case of three single-core cables and a line-to-earth short circuit in station B

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

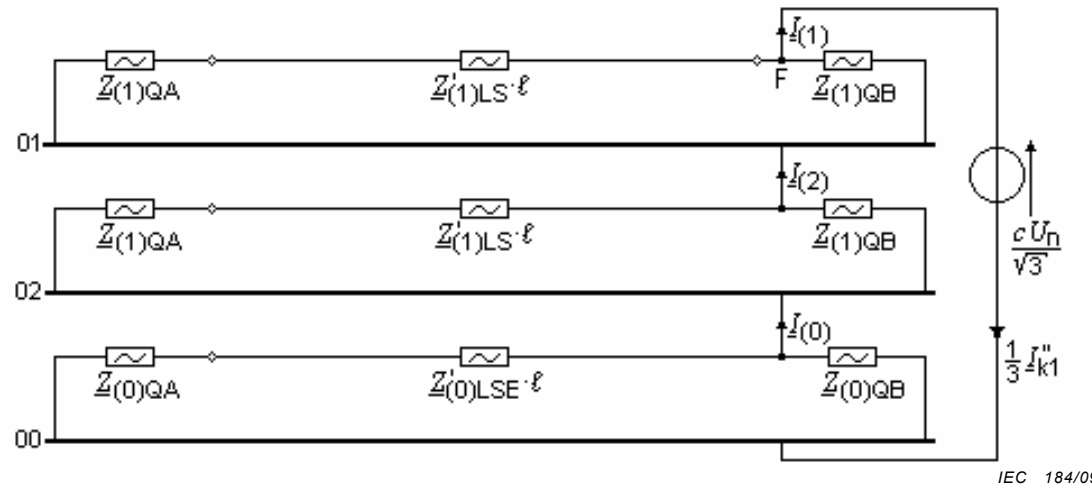


Figure D.2 – Positive-, negative- and zero-sequence system of the network in Figure D.1 with connections at the short-circuit location (station B)

In case of a cable length ℓ = 5 km (for example), the line-to-earth short-circuit current at the short-circuit location in station B is found from Figure D.2 as:

$$I''_{k1} = 3\underline{I}_{(0)} = \frac{\sqrt{3}\,cU_n}{2\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)}} = \frac{\sqrt{3}\cdot 1{,}1\cdot 110\,\text{kV}}{2(0{,}4339 + \text{j}3{,}0947)\Omega + (1{,}9492 + \text{j}5{,}4842)\Omega} = (4{,}0939 - \text{j}16{,}9654)\,\text{kA}$$

where

$$\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)} = \frac{1}{\dfrac{1}{\underline{Z}_{(1)QA} + \underline{Z}'_{(1)LS}\ell} + \dfrac{1}{\underline{Z}_{(1)QB}}} = (0{,}4339 + \text{j}3{,}0947)\Omega$$

$$\underline{Z}_{(0)} = \frac{1}{\dfrac{1}{\underline{Z}_{(0)QA} + \underline{Z}'_{(0)LSE}\ell} + \dfrac{1}{\underline{Z}_{(0)QB}}} = (1{,}9492 + \text{j}5{,}4841)\Omega$$

From this result the partial short-circuit currents $3\underline{I}_{(0)A}$ and $3\underline{I}_{(0)B}$ are found:

$$3\underline{I}_{(0)A} = \underline{I}''_{k1}\frac{\underline{Z}_{(0)QB}}{\underline{Z}_{(0)QA} + \underline{Z}_{(0)QB} + \underline{Z}'_{(0)LSE}\ell} = (2{,}5780 - \text{j}\,9{,}5528)\,\text{kA}$$

$$3\underline{I}_{(0)B} = \underline{I}''_{k1}\frac{\underline{Z}_{(0)QA} + \underline{Z}'_{(0)LSE}\ell}{\underline{Z}_{(0)QA} + \underline{Z}_{(0)QB} + \underline{Z}'_{(0)LSE}\ell} = (1{,}5160 - \text{j}7{,}4126)\,\text{kA}$$

D.2.4 Reduction factor and current distribution

Reduction factor according to Equation (48) for a triangular configuration of the single-core cables:

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

$$\underline{r}_3 = \frac{R'_S}{R'_S + 3\omega\frac{\mu_0}{8} + \mathrm{j}3\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\ln\frac{\delta}{\sqrt[3]{r_S d^2}}} = 0{,}0572 - \mathrm{j}0{,}1945\,;$$

$$r_3 = 0{,}2027$$

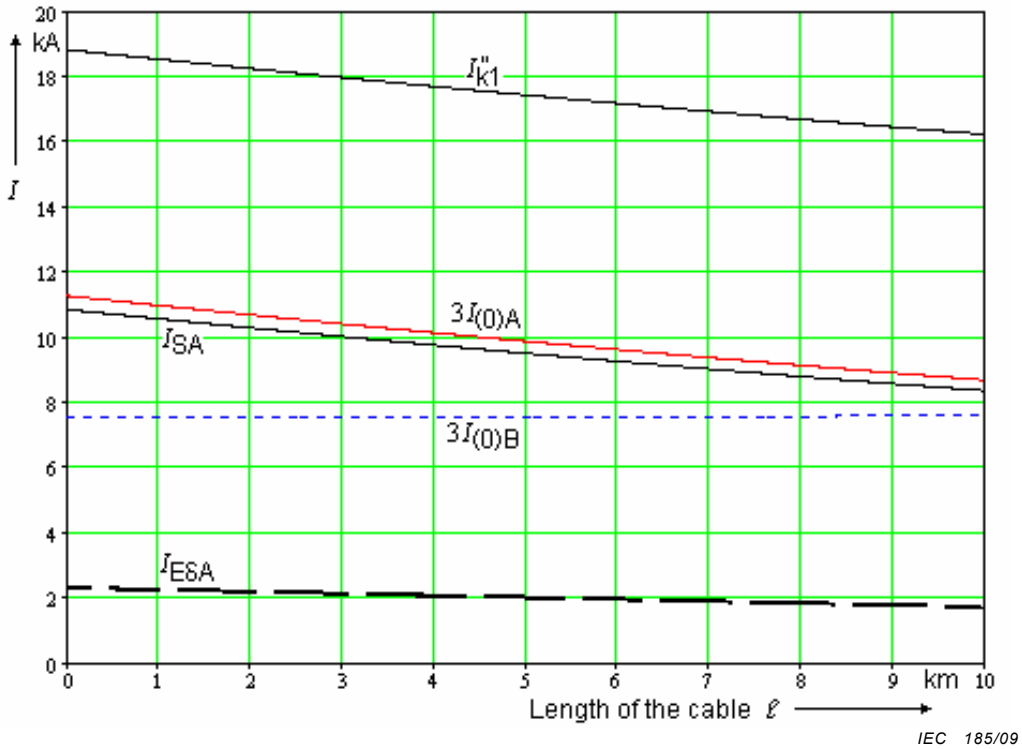
Sum of the currents in the three sheaths according to Equation (49) with ℓ = 5 km:

$$\underline{I}_{SA} = (1 - \underline{r}_3)3\underline{I}_{(0)A} = (1 - 0{,}0572 + \mathrm{j}0{,}1945)\cdot(2{,}5780 - \mathrm{j}9{,}5528)\,\mathrm{kA} = (4{,}2887 - \mathrm{j}8{,}5054)\,\mathrm{kA}\,;$$

Current through earth according to Equation (50), with ℓ = 5 km:

$$\underline{I}_{E\delta A} = \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)A} = (0{,}0572 - \mathrm{j}0{,}1945)\cdot(2{,}5780 - \mathrm{j}9{,}5528)\,\mathrm{kA} = (-1{,}7108 - \mathrm{j}1{,}0474)\,\mathrm{kA}$$

Figure D.3 shows the current distribution depending on the length, ℓ, of the cables between the stations A and B.



Line-to-earth short circuit in B: $\underline{I}''_{k1} = 3\underline{I}_{(0)A} + 3\underline{I}_{(0)B}$; $3\underline{I}_{(0)A} = \underline{I}_{SA} + \underline{I}_{E\delta A}$

Figure D.3 – Current distribution for the network in Figure D.1, depending on the length, ℓ, of the single-core cables between the stations A and B

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

D.3 Line-to-earth short circuit on one of the three single-core cables between the stations A and B

D.3.1 Configuration and Data

The configuration is given in Figure D.4. The line-to-earth short circuit is fed from the stations A and B. Data are given in D.2.1 and Figure D.1. An earth connection at the short-circuit location is anticipated with $R_{EF} - \infty$ or $R_{EF} = 5\,\Omega$ (see 8.3.2).

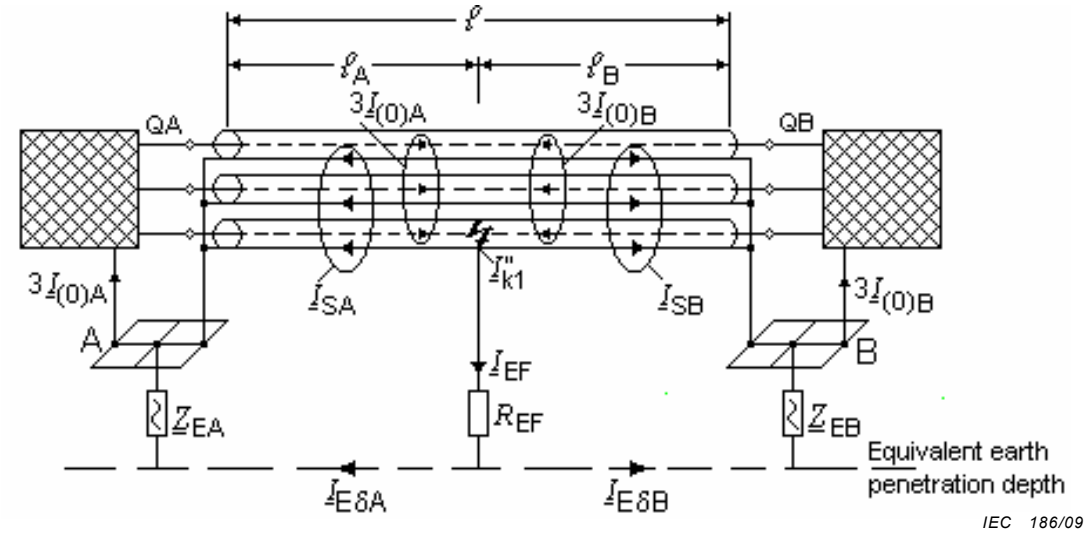


Figure D.4 – Example for the calculation of the reduction factors r_3 and the current distribution in case of three single-core cables and a line-to-earth short circuit between the stations A and B

Network feeder QA and QB as given in Figure D.1

D.3.2 Short-circuit currents

Figure D.5 gives the positive-, the negative- and the zero-sequence system according to the configuration in Figure D.4.

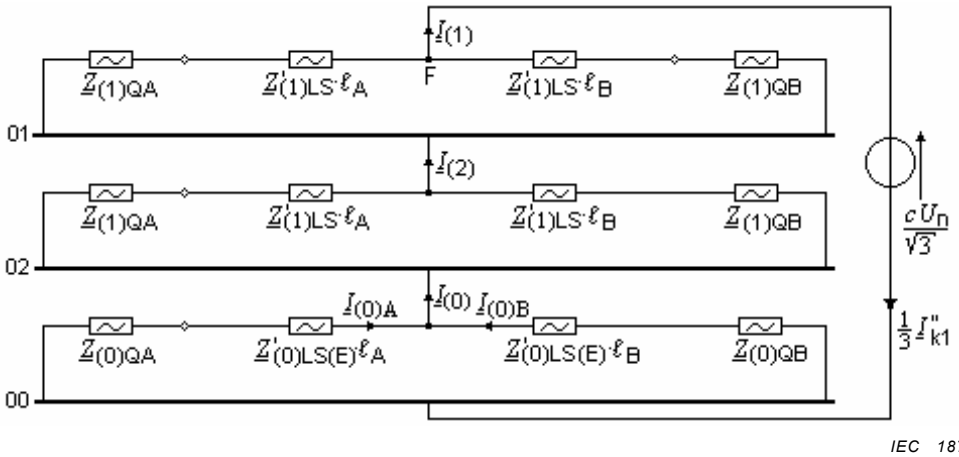


Figure D.5 – Positive-, negative- and zero-sequence system of the network in Figure D.4 with connections at the short-circuit location (anywhere between the stations A and B)

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

D.3.3 Current distribution in case of $R_{EF} \to \infty$

In case of e.g. $\ell_A = 5$ km between station A and the short-circuit location, if the total length of the cable is $\ell = 10$ km ($\ell = \ell_A + \ell_B$), the line-to-earth short-circuit current is found as:

$$\underline{I}''_{k1} = 3\underline{I}_{(0)} = \frac{\sqrt{3}\, c U_n}{2\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1{,}1 \cdot 110\,\text{kV}}{2(0{,}4533 + \text{j}3{,}1844)\Omega + (2.3471 + \text{j}5{,}4225)\Omega} = (4{,}5573 - \text{j}16{,}5163)\,\text{kA}$$

where

$$\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)} = \frac{1}{\dfrac{1}{\underline{Z}_{(1)QA} + \underline{Z}'_{(1)LS}\ell_A} + \dfrac{1}{\underline{Z}_{(1)QB} + \underline{Z}'_{(1)LS}\ell_B}} = (0{,}4532 + \text{j}3{,}1843)\Omega$$

$$\underline{Z}_{(0)} = \frac{1}{\dfrac{1}{\underline{Z}_{(0)QA} + \underline{Z}'_{(0)LS}\ell_A} + \dfrac{1}{\underline{Z}_{(0)QB} + \underline{Z}'_{(0)LS}\ell_B}} = (2{,}3471 + \text{j}5{,}4225)\Omega$$

From this results the partial short-circuit currents $\underline{I}_{(0)A}$ and $\underline{I}_{(0)B}$ are found:

$$\underline{I}_{(0)A} = \frac{1}{3}\underline{I}''_{k1}\frac{\underline{Z}_{(0)QB} + \underline{Z}'_{(0)LS}\ell_B}{\underline{Z}_{(0)QA} + \underline{Z}_{(0)QB} + \underline{Z}'_{(0)LS}\ell} = (0{,}8462 - \text{j}\,3{,}2794)\,\text{kA}$$

$$\underline{I}_{(0)B} = \frac{1}{3}\underline{I}''_{k1}\frac{\underline{Z}_{(0)QA} + \underline{Z}'_{(0)LS}\ell_A}{\underline{Z}_{(0)QA} + \underline{Z}_{(0)QB} + \underline{Z}'_{(0)LS}\ell} = (0{,}6729 - \text{j}2{,}2260)\,\text{kA}$$

Currents in the sheaths according to Equations (51a) and (52a) with $\underline{r}_3 = 0{,}0572 - \text{j}0{,}1945$ for the numerical example $\ell_A = 5$ km:

$$\underline{I}_{SA} = (1 - \underline{r}_3)3\underline{I}_{(0)A} + \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)A}\frac{\ell_B}{\ell} + \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)B}\frac{\ell_B}{\ell} = (2{,}8310 - \text{j}9{,}697)\,\text{kA};$$

$$I_{SA} = 10{,}1022\,\text{kA}$$

$$\underline{I}_{SB} = (1 - \underline{r}_3)3\underline{I}_{(0)B} + \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)B}\frac{\ell_A}{\ell} + \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)A}\frac{\ell_A}{\ell} = (1{,}7263 - \text{j}6{,}8189)\,\text{kA};$$

$$I_{SB} = 7{,}0341\,\text{kA}$$

Currents through earth found with Equations (54a) and (55a) for the numerical example $\ell_A = 5$ km:

$$\underline{I}_{E\delta A} = \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)A}\frac{\ell_A}{\ell} - \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)B}\frac{\ell_B}{\ell} = (-0{,}2925 - \text{j}0{,}1409)\,\text{kA};$$

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

$$I_{E\delta A} = 0{,}3246\,\text{kA}$$

$$\underline{I}_{E\delta B} = \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)B}\frac{\ell_B}{\ell} - \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)A}\frac{\ell_A}{\ell} = (0{,}2925 + \text{j}0{,}1409)\,\text{kA};$$

$$I_{E\delta B} = 0{,}3246\,\text{kA}$$

The highest current through the sheath S1 can be found with Equations (51b) or (52b):

$$\underline{I}_{S1A\max} = 3\underline{I}_{(0)A}(\ell_A = 0) + (2 + \underline{r}_3)\underline{I}_{(0)B}(\ell_A = 0) = (2{,}3282 - \text{j}16{,}3454)\,\text{kA};$$
$$I_{S1A\max} = 16{,}5104\,\text{kA}$$

$$\underline{I}_{S1B\max} = 3\underline{I}_{(0)B}(\ell_A = \ell) + (2 + \underline{r}_3)\underline{I}_{(0)A}(\ell_A = \ell) = (2{,}9183 - \text{j}13{,}2805)\,\text{kA};$$
$$I_{S1B\max} = 13{,}5973\,\text{kA}$$

The highest current through the earth is found from Equations (54b) or (55b):

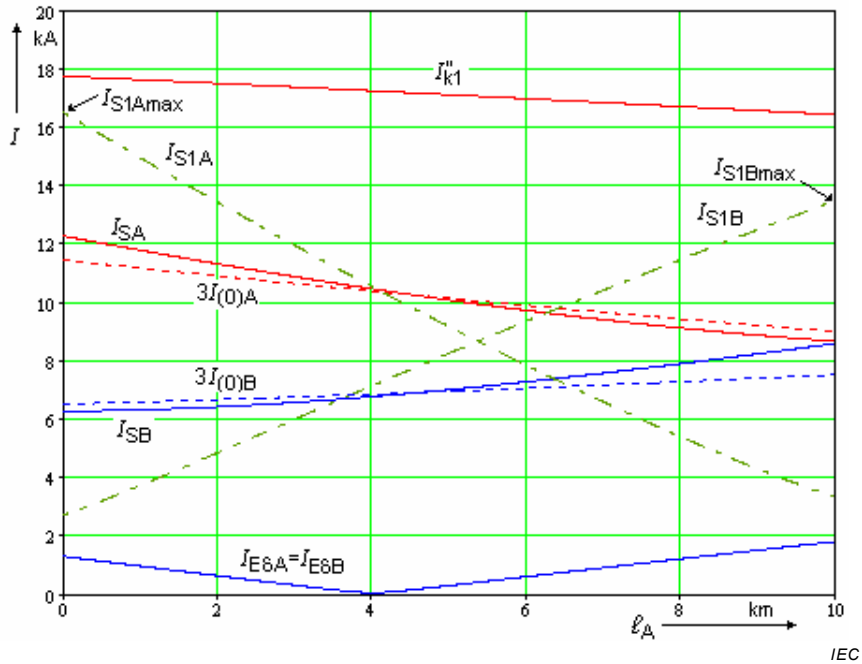
$$\underline{I}_{E\delta A\max} = \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)A}(\ell_A = \ell) = (-1{,}4191 - \text{j}1{,}1557)\,\text{kA};$$

$$I_{E\delta A\max} = 1{,}8302\,\text{kA}$$

$$\underline{I}_{E\delta B\max} = \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)B}(\ell_A = 0) = (-0{,}9915 - \text{j}0{,}8810)\,\text{kA};$$

$$I_{E\delta B\max} = 1{,}3264\,\text{kA}$$

Figure D.6 shows the current distribution depending on the length ℓ_A between the station A and the short-circuit location on the cable.



IEC 188/09

Figure D.6 – Current distribution for the cable in Figure D.4 depending on ℓ_A, $R_{EF} \to \infty$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

D.3.4 Current distribution in case of R_{EF} = 5 Ω

In case of e.g. $\ell_A = 5$ km for the cable between station A and the short-circuit location F, if the total length of the cable is $\ell = 10$ km ($\ell = \ell_A + \ell_B$), the line-to-earth short-circuit current is found as:

$$\underline{I}''_{k1} = 3\underline{I}_{(0)} = \frac{\sqrt{3}\, c U_n}{2\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)}} = \frac{\sqrt{3}\cdot 1{,}1\cdot 110\,\text{kV}}{2(0{,}4532 + \text{j}3{,}1843)\Omega + (2.2925 + \text{j}5{,}6134)\Omega} = (4{,}3588 - \text{j}16{,}3269)\text{kA}$$

where

$$\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)} = \frac{1}{\dfrac{1}{\underline{Z}_{(1)\text{QA}} + \underline{Z}'_{(1)\text{LS}}\ell_A} + \dfrac{1}{\underline{Z}_{(1)\text{QB}} + \underline{Z}'_{(1)\text{LS}}\ell_B}} = (0{,}4532 + \text{j}3{,}1843)\Omega$$

$$\underline{Z}_{(0)} = \frac{1}{\dfrac{1}{\underline{Z}_{(0)\text{QA}} + \underline{Z}'_{(0)\text{LSE}}\ell_A} + \dfrac{1}{\underline{Z}_{(0)\text{QB}} + \underline{Z}'_{(0)\text{LSE}}\ell_B}} = (2{,}2925 + \text{j}5{,}6134)\Omega$$

From this results the partial short-circuit currents $3\underline{I}_{(0)A}$ and $3\underline{I}_{(0)B}$ are found:

$$3\underline{I}_{(0)A} = \underline{I}''_{k1}\frac{\underline{Z}_{(0)\text{QB}} + \underline{Z}'_{(0)\text{LSE}}\ell_B}{\underline{Z}_{(0)\text{QA}} + \underline{Z}_{(0)\text{QB}} + \underline{Z}'_{(0)\text{LSE}}\ell} = (2{,}3867 - \text{j}\,9{,}6916)\text{kA}$$

$$3\underline{I}_{(0)B} = \underline{I}''_{k1}\frac{\underline{Z}_{(0)\text{QA}} + \underline{Z}'_{(0)\text{LSE}}\ell_A}{\underline{Z}_{(0)\text{QA}} + \underline{Z}_{(0)\text{QB}} + \underline{Z}'_{(0)\text{LSE}}\ell} = (1{,}9721 - \text{j}6{,}6354)\text{kA}$$

Total earth impedance of the sheath to earth with $R_{EF} = 5\ \Omega$ (Equation (47)).

$$\underline{Z}_{\text{EStot}} = \frac{1}{\dfrac{1}{\underline{Z}'_S\cdot 5\text{km}} + \dfrac{1}{\underline{Z}'_S\cdot 5\text{km}} + \dfrac{1}{5\Omega}} = (1{,}1433 + \text{j}1{,}0039)\,\Omega$$

Currents in the sheaths according to Equations (51) and (52) with $\underline{r}_3 = 0{,}0573$ - j0,1945 for the numerical example $\ell_A = 5$ km:

$$\underline{I}_{SA} = (1-\underline{r}_3)3\underline{I}_{(0)A} + \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)A}\frac{\underline{Z}_{\text{EStot}}}{\underline{Z}'_S\ell_A} + \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)B}\frac{\underline{Z}_{\text{EStot}}}{\underline{Z}'_S\ell_A} = (2{,}8279 - \text{j}9{,}0665)\text{kA}$$

$$\underline{I}_{SB} = (1-\underline{r}_3)3\underline{I}_{(0)B} + \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)B}\frac{\underline{Z}_{\text{EStot}}}{\underline{Z}'_S\ell_B} + \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)A}\frac{\underline{Z}_{\text{EStot}}}{\underline{Z}'_S\ell_B} = (1{,}8425 - \text{j}6{,}2656)\text{kA}$$

Currents through earth found with Equations (54) and (55) for the numerical example $\ell_A = 5$ km:

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

$$\underline{I}_{\mathrm{E}\delta\mathrm{A}} = \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} \frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{B}}} + \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} \frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{R_{\mathrm{EF}}} - \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}} \frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{A}}} = (-0{,}4412 - \mathrm{j}0{,}6250)\,\mathrm{kA}$$

$$\underline{I}_{\mathrm{E}\delta\mathrm{B}} = \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}} \frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{A}}} + \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}} \frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{R_{\mathrm{FE}}} - \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} \frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{B}}} = (0{,}1296 - \mathrm{j}0{,}3697)\,\mathrm{kA}$$

Highest currents through the sheath S1 as given in D.3.3.

The highest current through earth is found from Equation (54c) if the short-circuit current is fed from station A only with $3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}}(\ell_{\mathrm{A}} = \ell) = (2{,}5146 - \mathrm{j}10{,}0276)\,\mathrm{kA}$:

$$\underline{I}_{\mathrm{E}\delta\mathrm{A}\,\max} = \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}}(\ell_{\mathrm{A}} = \ell) = (-1{,}5287 - \mathrm{j}1{,}0621)\,\mathrm{kA};$$

$$I_{\mathrm{E}\delta\mathrm{A}\,\max} = 1{,}8614\,\mathrm{kA}$$

If the short-circuit current is fed from both sides as in Figure D.4, a result $I_{\mathrm{E}\delta\mathrm{A}\,\max} = 1{,}7644\,\mathrm{kA}$ is found (see Figure D.7).

Figure D.7 shows the current distribution depending on the length ℓ_{A} between the station A and the short-circuit location.

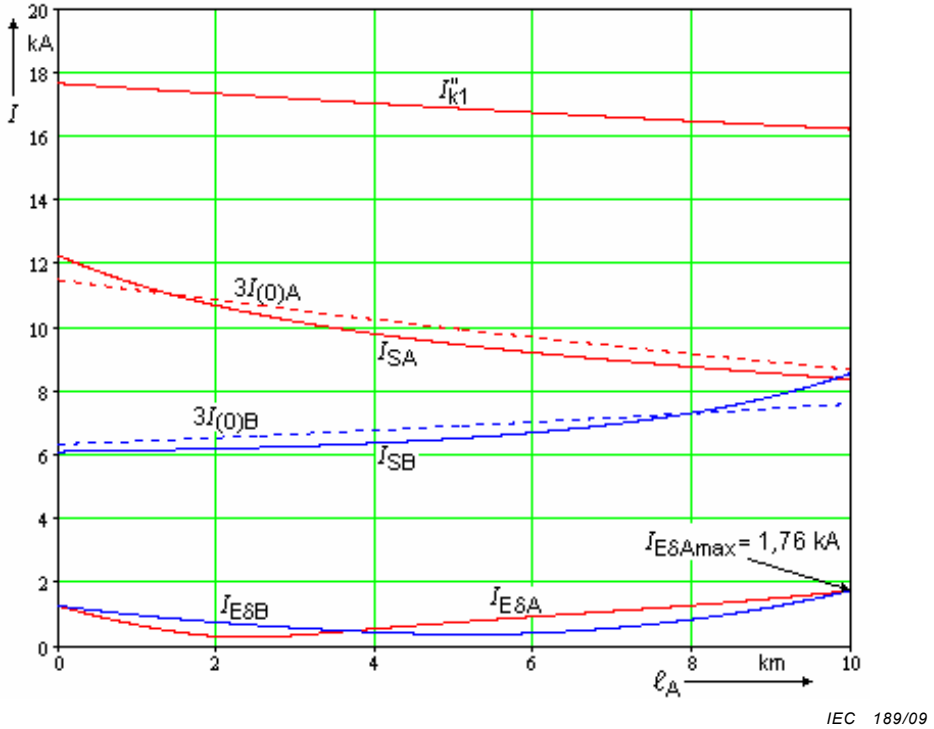


Figure D.7 – Current distribution for the cable in Figure D.4 depending on ℓ_{A}, R_{EF} = 5 Ω

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS 61
1 Domaine d'application et objet 63
2 Références normatives 64
3 Termes et définitions 64
4 Symboles 67
5 Calcul des courants durant deux courts-circuits monophasés simultanés séparés à la terre 69
5.1 Courant de court-circuit symétrique initial 69
5.1.1 Détermination de $\underline{\boldsymbol{M}}_{(1)}$ et $\underline{\boldsymbol{M}}_{(2)}$ 70
5.1.2 Exemples simples de deux courts-circuits monophasés simultanés séparés à la terre 70
5.2 Valeur de crête du courant de court-circuit, courant de court-circuit symétrique coupé et courant de court-circuit permanent 71
5.3 Répartition des courants durant deux courts-circuits monophasés simultanés séparés à la terre 71
6 Calcul des courants de court-circuit partiels s'écoulant par la terre dans le cas d'un court-circuit déséquilibré 72
6.1 Généralités 72
6.2 Court-circuit monophasé à la terre dans un poste 72
6.3 Court-circuit monophasé à la terre en dehors d'un poste 74
6.4 Court-circuit monophasé à la terre au voisinage d'un poste 76
6.4.1 Potentiel de terre $\underline{U}_{\mathrm{ETn}}$ sur le pylône n en dehors du poste B 76
6.4.2 Potentiel de terre du poste B pendant un court-circuit monophasé à la terre sur le pylône n 77
7 Facteur de réduction pour les lignes aériennes avec câbles de garde 77
8 Calcul de la répartition du courant et du facteur de réduction dans le cas de câbles avec gaine ou écran métallique mis à la terre à chaque extrémité 79
8.1 Aperçu 79
8.2 Câble à trois conducteurs 80
8.2.1 Court-circuit monophasé à la terre dans le poste B 80
8.2.2 Court-circuit monophasé à la terre sur le câble entre le poste A et le poste B 81
8.3 Trois câbles monoconducteurs 84
8.3.1 Court-circuit monophasé à la terre au poste B 84
8.3.2 Court-circuit monophasé à la terre sur le câble entre le poste A et le poste B 84
Annexe A (informative) Exemple de calcul de deux courants de court-circuit monophasés simultanés séparés à la terre 89
Annexe B (informative) Exemples de calcul des courants de courts-circuits partiels par la terre 92
Annexe C (informative) Exemple de calcul du facteur de réduction r_1 et de la répartition du courant par la terre dans le cas d'un câble à trois conducteurs 102
Annexe D (informative) Exemple de calcul du facteur de réduction r_3 et de la répartition du courant par la terre dans le cas de trois câbles monoconducteurs 108

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Figure 1 – Impédance d'entrée $\underline{Z}_P$ d'une chaîne infinie, constituée par l'impédance du câble de garde $\underline{Z}_Q = \underline{Z}'_Q d_T$ et la résistance de pied des pylônes R_T, séparées par des distances identiques d_T entre les pylônes 66

Figure 2 – Impédance d'entrée $\underline{Z}_{Pn}$ d'une chaîne finie de n pylônes, constituée par l'impédance du câble de garde $\underline{\boldsymbol{Z}}_{\mathbf{Q}} = \underline{\boldsymbol{Z}}'_{\mathbf{Q}} d_{\mathbf{T}}$, et la résistance du pied des pylônes R_T, avec des distances identiques d_T entre les pylônes et l'impédance de terre $\underline{Z}_{EB}$ d'un poste B, obtenue à partir de l'Equation (29) 67

Figure 3 – Représentation de deux courts-circuits monophasés simultanés séparés à la terre et des courants $I''_{\mathbf{kEE}}$ 69

Figure 4 – Courants de court-circuit partiels dans le cas d'un court-circuit monophasé à la terre dans le poste B 72

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 74

Figure 6 – Répartition du courant total de terre $\underline{\boldsymbol{I}}_{ETtot}$ 75

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 76

Figure 8 – Facteur de réduction r pour les lignes aériennes avec câbles de garde non magnétiques dépendant de la résistivité du sol ρ 79

Figure 9 – Facteur de réduction de câbles d'alimentation à trois conducteurs 81

Figure 10 – Facteurs de réduction de trois câbles d'alimentation monoconducteurs 86

Figure A.1 – Deux courts-circuits monophasés simultanés séparés à la terre sur une seule ligne aérienne alimentée (voir Tableau 1) 89

Figure B.1 – Court-circuit monophasé à la terre dans le poste B – Schéma du réseau avec les postes A, B et C 93

Figure B.2 – Court-circuit monophasé à la terre dans le poste B – Systèmes directs, inverses et homopolaires avec les connexions à l'emplacement F du court-circuit à l'intérieur du poste B 93

Figure B.3 – Court-circuit monophasé à la terre en dehors des postes B et C, sur le pylône T d'une ligne aérienne – Schéma du réseau avec les postes A, B et C 96

Figure B.4 – Court-circuit monophasé à la terre en dehors des postes B et C sur le pylône T d'une ligne aérienne – Systèmes directs, inverses et homopolaires avec les connexions à l'emplacement F du court-circuit 96

Figure B.5 – Potentiels 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 = 1, 2, 3, ... au voisinage du poste B 101

Figure C.1 – Exemple de calcul du facteur de réduction des câbles et de la répartition du courant par la terre dans un réseau de 10 kV, U_n = 10 kV; c =1,1; f = 50 Hz 103

Figure C.2 – Courants de court-circuit et courants de court-circuit partiels s'écoulant par la terre, pour l'exemple illustré à la Figure C.1 105

Figure C.3 – Exemple de calcul de la répartition du courant dans un réseau de 10 kV avec un court-circuit sur le câble entre A et B (données fournies en C.2.1 et à la Figure C.1) 105

Figure C.4 – Courants de court-circuit monophasés à la terre, courants partiels s'écoulant dans l'écran et courants partiels s'écoulant par la terre 106

Figure D.1 – Exemple de calcul du facteur de réduction et de répartition du courant dans le cas de trois câbles monoconducteurs et d'un court-circuit monophasé à la terre au poste B 109

Figure D.2 – Systèmes directs, inverses et homopolaires du réseau illustré à la Figure D.1 avec les connexions à l'emplacement du court-circuit (poste B) 110

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Figure D.3 – Répartition du courant pour le réseau illustré à la Figure D.1, selon la longueur, ℓ, des câbles monoconducteurs entre les postes A et B 111

Figure D.4 – Exemple de calcul des facteurs de réduction r_3 et de répartition du courant dans le cas de trois câbles monoconducteurs et d'un court-circuit monophasé à la terre entre les postes A et B 112

Figure D.5 – Systèmes directs, inverses et homopolaires du réseau illustré à la Figure D.4 avec les connexions à l'emplacement du court-circuit (en tout point entre les postes A et B) 113

Figure D.6 – Répartition du courant pour le câble illustré à la Figure D.4 selon ℓ_A, $R_{EF} \to \infty$ 115

Figure D.7 – Répartition du courant pour le câble illustré à la Figure D.4 selon ℓ_A, R_{EF} = 5 Ω 117

Tableau 1 – Calcul des courants initiaux de courts-circuits monophasés à la terre dans les cas simples 70

Tableau 2 – Résistivité du sol et profondeur équivalente de pénétration dans la terre 78

Tableau C.1 – Résultats pour l'exemple illustré à la Figure C.1 104

Tableau C.2 – Résultats pour l'exemple illustré à la Figure C.3, $\ell = 5$km 106

Tableau C.3 – Résultats pour l'exemple illustré à la Figure C.3, $\ell = 10$ km 107

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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 Norme internationale doit être lue conjointement avec la CEI 60909-0.

Cette troisième édition annule et remplace la deuxième édition parue en 2003. Cette édition constitue une révision technique.

Les modifications principales par rapport à l'édition précédente sont les suivantes:

- De nouvelles procédures sont fournies pour le calcul des facteurs de réduction des gaines ou des écrans, ainsi que pour la répartition du courant par la terre et les gaines ou les

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

écrans des câbles à trois conducteurs ou de trois câbles monoconducteurs avec gaines ou écrans non magnétiques métalliques mis à la terre à chaque extrémité;

- Les informations pour le calcul du facteur de réduction pour lignes aériennes avec câbles de garde sont corrigées et fournies en un nouvel Article 7;
- Un nouvel Article 8 est introduit pour le calcul de la répartition du courant et du facteur de réduction des câbles avec gaine ou écran métallique, mis à la terre à chaque extrémité;
- Les nouvelles Annexes C et D donnent des exemples pour le calcul des facteurs de réduction et de la répartition du courant dans le cas de câbles avec gaine ou écran métallique, mis à la terre à chaque extrémité.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
73/148/FDIS	73/149/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.

Une liste de toutes les parties de la série CEI 60909, présentées sous le titre général *Courant de court-circuit dans les réseaux triphasés à courant alternatif*, peut être consultée sur le site web de la CEI.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant la date de maintenance indiquée sur le site web de la CEI sous "http://webstore.iec.ch" dans les données relatives à la publication recherchée. A cette date, la publication sera

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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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 et objet

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) les 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) les 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), ainsi que les pylônes des lignes aériennes.

Des procédures de calcul des facteurs de réduction des lignes aériennes avec un ou deux câbles de garde sont fournies.

La 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 par la terre, les câbles de garde de lignes aériennes et les gaines ou écrans de câbles, donnant des résultats prudents (sûrs) et d'une précision suffisante. A cet effet, les courants de court-circuit sont déterminés en utilisant une source de tension équivalente appliquée à l'emplacement du court-circuit, toutes les autres sources de tension étant mises à zéro. Le calcul des courants de court-circuit à l'emplacement du court-circuit ne tient compte ni des résistances des réseaux de terre aux postes, ni des résistances des pieds des pylônes des lignes aériennes.

La présente norme est un complément de la CEI 60909-0. Les définitions générales, symboles et hypothèses de calcul se réfèrent à cette publication. Seuls des éléments particuliers sont définis ou spécifiés dans la présente norme.

Le calcul des courants 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. La procédure est applicable à une détermination par des méthodes manuelles ou par le calcul numérique. Ceci n'exclut pas l'utilisation de méthodes particulières, par exemple la méthode de

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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 leurs paramètres peuvent aussi être déterminés par des essais du réseau.

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*

CEI/TR 60909-2:2008, *Short-circuit currents in three-phase a.c. systems – Part 2: Data of electrical equipment for short-circuit current calculations* (disponible uniquement en anglais)

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 conducteurs de phase 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 s'écoulant avec la même amplitude aux deux emplacements de court-circuit

3.3
courant de court-circuit partiel à travers la terre $I_{E\delta}$
valeur efficace du courant s'écoulant par la terre dans une ligne factice ayant la profondeur équivalente de pénétration dans la terre δ .

NOTE Dans le cas de lignes aériennes distantes de l'emplacement du court-circuit et du réseau de terre d'un poste, où la répartition du courant entre les conducteurs mis à la terre et la terre est presque constante, le courant s'écoulant par la terre dépend du facteur de réduction de la ligne aérienne (Figures 4 et 5). Dans le cas de câbles avec gaines ou écrans métalliques, mis à la terre à chaque extrémité aux postes A et B, il s'agit du courant s'écoulant par la terre entre les postes A et B (Figures 9a) et 10a)), respectivement entre l'emplacement du court-circuit et les postes A ou B (Figures 9b) et 10b))

3.4
courant à la terre total I_{ETtot} à l'emplacement du court-circuit sur le pylône T d'une ligne aérienne
valeur efficace du courant s'écoulant vers la terre par la résistance des pieds d'un pylône de ligne aérienne à distance d'un poste relié aux impédances de point d'entrée de la ligne aérienne à chaque extrémité, voir Figure 5

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

3.5
courant à la terre total I_{EBtot} à l'emplacement du court-circuit au poste B
valeur efficace du courant s'écoulant vers la terre par le réseau de mise à la terre d'un poste B (centrale ou sous-station) avec les conducteurs mis à la terre reliés (câbles de garde de lignes aériennes ou gaines, écrans ou armures de câbles, ou autres conducteurs mis à la terre, tels que par exemple des conduites d'eau métalliques), voir Figure 4

3.6
courant à la terre I_{ETn}
valeur efficace du courant s'écoulant vers la terre ramenant au potentiel de terre un pylône de ligne aérienne n au voisinage d'un poste

3.7
courant à la terre I_{EBn}
valeur efficace du courant s'écoulant vers la terre ramenant au potentiel U_{EBn} d'un poste B, dans le cas d'un court-circuit monophasé à la terre sur un pylône de ligne aérienne n au voisinage du poste B

3.8
facteur de réduction r
pour les lignes aériennes, facteur qui détermine la fraction du courant de court-circuit monophasé à la terre s'écoulant par la terre à distance de l'emplacement du court-circuit et des réseaux de terre des postes

3.9
facteur de réduction r_1
pour des câbles à trois conducteurs avec des gaines ou des écrans métalliques mis à la terre à chaque extrémité

3.10
facteur de réduction r_3
pour trois câbles monoconducteurs avec des gaines ou des écrans métalliques mis à la terre à chaque extrémité

3.11
impédance d'entrée Z_P d'une chaîne infinie
constituée de l'impédance du câble de garde $\underline{Z}_Q$ entre deux pylônes avec retour par la terre et de la résistance de pied de pylône R_T de la ligne aérienne (Figure 1):

$$\underline{Z}_P = 0{,}5\underline{Z}_Q + \sqrt{(0{,}5\underline{Z}_Q)^2 + R_T\underline{Z}_Q} \quad (1)$$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

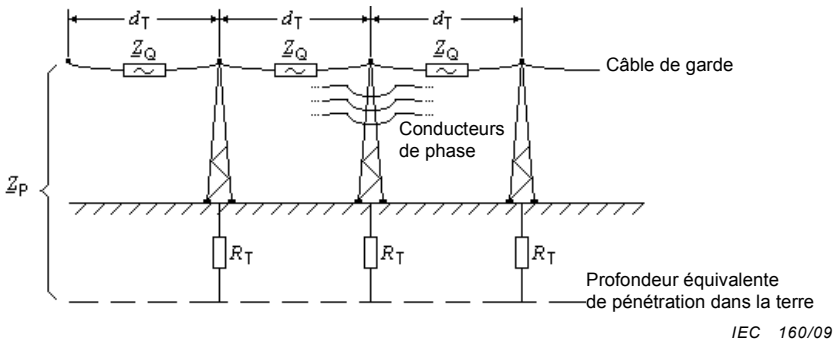


Figure 1 – Impédance d'entrée $\underline{Z}_P$ d'une chaîne infinie, constituée par l'impédance du câble de garde $\underline{Z}_Q = \underline{Z}'_Q d_T$ et la résistance de pied des pylônes R_T, séparées par des distances identiques d_T entre les pylônes

L'impédance d'entrée $\underline{Z}_P$ peut être supposée constante à une certaine distance de l'emplacement F du court-circuit, plus élevée que la distance du pylône éloigné du poste D_F définie par l'Equation (19).

3.12
impédance d'entrée Z_{Pn} d'une chaîne finie
avec n pylônes d'une ligne aérienne comme indiqué en Figure 2 et avec l'impédance $\underline{Z}_{EB}$ à l'extrémité, calculée conformément à l'Equation (2):

$$\underline{Z}_{Pn} = \frac{\underline{Z}_P(\underline{Z}_{EB} + \underline{Z}_P)\underline{k}^n + (\underline{Z}_P - \underline{Z}_Q)(\underline{Z}_{EB} - \underline{Z}_P + \underline{Z}_Q)\underline{k}^{-n}}{(\underline{Z}_{EB} + \underline{Z}_P)\underline{k}^n - (\underline{Z}_{EB} - \underline{Z}_P + \underline{Z}_Q)\underline{k}^{-n}} \quad (2)$$

avec

$$\underline{k} = 1 + \frac{\underline{Z}_P}{R_T} \quad (3)$$

NOTE Pour $n \to \infty$, l'Equation (2) aboutit à l'Equation (1). Dans la pratique, cela se vérifie déjà pour $n \approx 10...15$.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

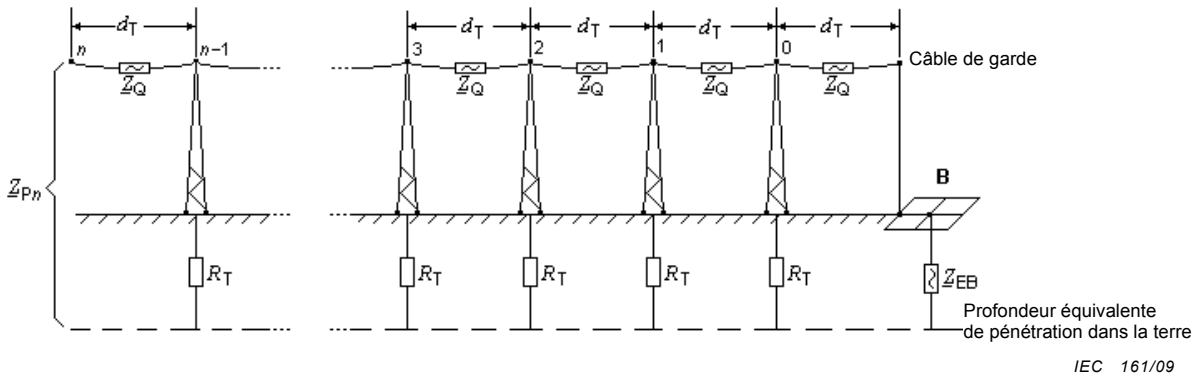


Figure 2 – Impédance d'entrée $\underline{Z}_{Pn}$ d'une chaîne finie de n pylônes, constituée par l'impédance du câble de garde $\underline{Z}_Q = \underline{Z}'_Q d_T$, et la résistance du pied des pylônes R_T, avec des distances identiques d_T entre les pylônes et l'impédance de terre $\underline{Z}_{EB}$ d'un poste B, obtenue à partir de l'Equation (29)

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 dans le texte et les équations de la norme.

$cU_n/\sqrt{3}$	Source de tension équivalente (CEI 60909-0)
D_F	Distance du pylône éloigné du poste (Equation (19))
d_T	Distance entre deux pylônes
d_{L1L2}	Distance entre les conducteurs de phase L1 et L2
d_{Q1Q2}	Distance entre les câbles de garde Q1 et Q2
I_{bEE}	Courant de court-circuit coupé dans le cas de deux courts-circuits monophasés simultanés séparés à la terre
I_E	Courant s'écoulant à la terre (I_{EA}, I_{EB}, I_{EC} et I_{ET} aux Figures 4, 5, 7)
I_{EBn}	Courant à la terre au poste B avec un pylône en court-circuit n au voisinage du poste B (Figure 7)
I_{EBtot}	Courant total de terre au poste B si un court-circuit à la terre se produit au poste B (Figure 4)
I_{ETn}	Courant à la terre sur le pylône en court-circuit n à proximité d'un poste (Figure 7)
I_{ETtot}	Courant total de terre sur un pylône en court-circuit T à distance des postes (voir Figure 5)
I''_{kEE}	Courant de court-circuit symétrique initial dans le cas de deux courts-circuits monophasés simultanés séparés à la terre
I''_{kE2E}	Courant de court-circuit symétrique initial s'écoulant vers la terre dans le casd'un court-circuit biphasé à la terre (CEI 60909-0)

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---
Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

$I_{E\delta}$ Courant de court-circuit partiel s'écoulant par la terre (par exemple à la Figure 4: $\underline{I}_{E\delta A} = \underline{r}_A \times 3\underline{I}_{(0)A}$ ou à la Figure 9b): Courant $\underline{I}_{E\delta A}$ revenant au poste A conformément à l'Equation (45))

I_Q Courant de câble de garde

I_S Courant s'écoulant dans la gaine ou l'écran d'un câble (dans le cas de trois câbles monoconducteurs: I_{S1}, I_{S2} et I_{S3})

I_T Courant de court-circuit partiel s'écoulant par la résistance de pied R_T d'un pylône de ligne aérienne

i_{pEE} Courant de court-circuit de crête dans le cas de deux courts-circuits monophasés simultanés séparés à la terre

$M_{(1)}, M_{(2)}$ Impédances de couplage du système, respectivement directe et inverse

$R_{EA,}\ R_{EB}$ Résistance du réseau de terre au poste A ou B

R_{EF} Résistance à la terre à l'emplacement du court-circuit d'un câble (Figure 9b) ou 10b))

R_T Résistance de pied d'un pylône de ligne aérienne

r Facteur de réduction pour une ligne aérienne avec câbles de garde

r_1 Facteur de réduction de la gaine ou de l'écran d'un câble à trois conducteurs (Figure 9a))

r_3 Facteur de réduction des gaines ou des écrans de trois câbles monoconducteurs (Figure 10a))

r_Q Rayon du câble de garde

r_S Rayon de la gaine ou de l'écran métallique d'un câble (valeur moyenne)

$Z_{(1)A}, Z_{(1)B}$ Impédance de court-circuit directe d'un réseau triphasé à courant alternatif aux points de raccordement A et B (Annexe B)

$Z_{(0)}$ Impédance de court-circuit homopolaire du réseau complet entre les emplacements de court-circuit A et B (les admittances entre les conducteurs de phase et la terre sont négligées)

Z_{EB} Impédance de terre d'un poste B conformément à l'Equation (29)

Z_{EBtot} Impédance totale de terre d'un poste B conformément à l'Equation (17)

Z_{ET} Impédance de terre du pylône en court-circuit conformément à l'Equation (28)

Z_{ETtot} Impédance totale de terre du pylône en court-circuit conformément à l'équation (23)

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)

$Z_Q = Z'_Q d_T$ Impédance du câble de garde entre deux pylônes avec retour par la terre

Z'_Q Impédance linéique du câble de garde avec retour par la terre

Z'_{QL} Impédance mutuelle linéique entre le câble de garde et les conducteurs de phase, avec retour par la terre

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Z'_S Impédance linéique d'une gaine ou d'un écran métallique avec retour par la terre

Z'_{SL} Impédance mutuelle linéique entre la gaine (ou l'écran) et un conducteur à l'intérieur de la gaine (ou de l'écran) d'un câble avec retour par la terre

Z_U Impédance d'entrée des gaines, écrans ou armures de câble ou autres conduites ou canalisations métalliques (Equation 17))

δ Profondeur équivalente de pénétration dans la terre (Equation (36))

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

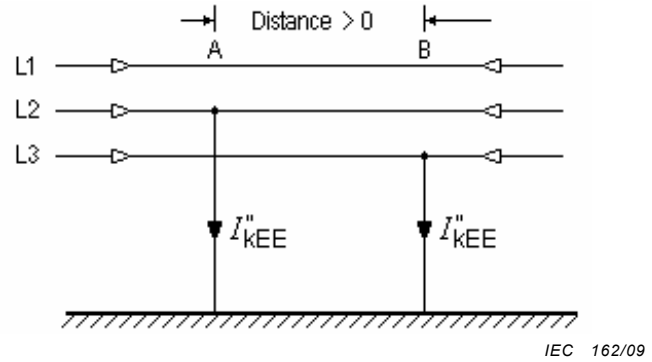
ρ Résistivité du sol

α Pulsation, $\omega = 2\pi f$ (f = 50 Hz ou 60 Hz)

5 Calcul des courants durant deux courts-circuits monophasés simultanés séparés à la terre

5.1 Courant de court-circuit symétrique initial

La Figure 3 montre le courant de court-circuit I''_{kEE} dans le cas de deux courts-circuits monophasés simultanés séparés à la terre dans des conducteurs de phase distincts aux emplacements A et B séparés par une distance finie. Il est supposé que les emplacements A et B sont loin des postes.



NOTE La direction des pointes de courant est choisie de manière arbitraire.

Figure 3 – Représentation de deux courts-circuits monophasés simultanés séparés à la terre et des courants 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 ITU-T - Directives concernant la protection des lignes de télécommunications contre les effets nuisibles des lignes électriques et des chemins de fer électrifiés, Volume V: Courants et tensions inducteurs dans les systèmes de transport et de distribution d'énergie 1999.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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

$$I''_{\mathrm{kEE}} = \frac{3cU_{\mathrm{n}}}{\left|2\underline{Z}_{(1)\mathrm{A}} + 2\underline{Z}_{(1)\mathrm{B}} + 2\underline{M}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)}\right|} \tag{5}$$

5.1.1 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 suit:

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

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

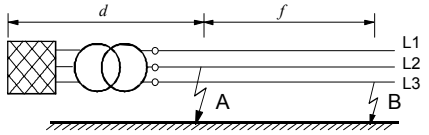
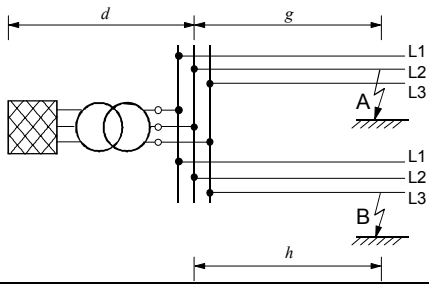
Les impédances de couplage peuvent aussi être déterminées à l'emplacement du court-circuit B au lieu de l'emplacement A

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

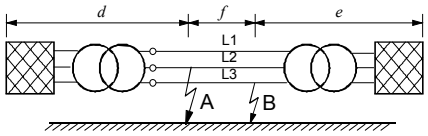
5.1.2 Exemples simples de deux courts-circuits monophasés simultanés séparés à la terre

Dans des cas simples, le courant I''_{kEE} peut être calculé comme indiqué dans le Tableau 1, si $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$ et $\underline{M}_{(1)} = \underline{M}_{(2)}$ (court-circuit éloigné d'un alternateur). Les Equations (8) à (10) sont dérivées de l'Equation (5). Les indices figurant dans ces équations se réfèrent aux impédances appropriées dans le réseau correspondant.

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

a)		Ligne alimentée en antenne $I''_{\mathrm{kEE}} = \frac{3cU_{\mathrm{n}}}{\left\|6\underline{Z}_{(1)\mathrm{d}} + 2\underline{Z}_{(1)\mathrm{f}} + \underline{Z}_{(0)\mathrm{f}}\right\|}$ (8)
b)		Deux lignes alimentées en antenne $I''_{\mathrm{kEE}} = \frac{3cU_{\mathrm{n}}}{\left\|6\underline{Z}_{(1)\mathrm{d}} + 2(\underline{Z}_{(1)\mathrm{g}} + \underline{Z}_{(1)\mathrm{h}}) + \underline{Z}_{(0)\mathrm{g}} + \underline{Z}_{(0)\mathrm{h}}\right\|}$ (9)

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

c)		Ligne à double alimentation $I''_{kEE} = \dfrac{3cU_n}{\left\lvert \dfrac{6\underline{Z}_{(1)d}\underline{Z}_{(1)e} + 2\underline{Z}_{(1)f}(\underline{Z}_{(1)d} + \underline{Z}_{(1)e})}{\underline{Z}_{(1)d} + \underline{Z}_{(1)f} + \underline{Z}_{(1)e}} + \underline{Z}_{(0)f} \right\rvert}$ (10)
Le facteur de tension, c, doit être pris dans le Tableau 1 de la CEI 60909-0.		

5.2 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:

$$i_{pEE} = \kappa\sqrt{2}I''_{kEE} \tag{11}$$

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 peuvent être assimilés à des courts-circuits éloignés d'un alternateur, alors

$$I_{kEE} = I_{bEE} = I''_{kEE} \tag{12}$$

5.3 Répartition des courants durant deux courts-circuits monophasés simultanés séparés à la terre

Si deux courts-circuits monophasés séparés à la terre se produisent aux emplacements A et B, la répartition du courant par la terre peut être calculée en admettant que $\underline{I}_{E\delta} = \underline{r}\,\underline{I}''_{kEE}$, $\underline{I}''_{kEE}$ étant la seule source active de courant et $\underline{r}$ étant le facteur de réduction d'une ligne aérienne avec câble de garde (Equation (33)). Pour le court-circuit sur un pylône (emplacement du court-circuit A ou B) éloigné des postes, le courant I_T s'écoulant par la résistance de pied R_T du pylône est le suivant:

$$\underline{I}_T = \underline{r}\,\underline{I}''_{kEE}\,\frac{\underline{Z}_P}{\underline{Z}_P + 2R_T} \tag{13}$$

$\underline{Z}_P$ est l'impédance d'entrée d'une chaîne infinie conformément à l'Equation (1).

NOTE L'Equation (13) peut être déduite de la Figure 6 si $\underline{I}_{ETtot}$ est remplacé par $\underline{r}\cdot\underline{I}''_{kEE}$.

Dans le cas de deux courts-circuits monophasés séparés à la terre se produisant aux lignes aériennes sans câble de garde (par exemple dans les réseaux moyenne tension), le courant s'écoulant par la terre est égal au courant de court-circuit I''_{kEE}.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

6 Calcul des courants de court-circuit partiels s'écoulant par la terre dans le cas d'un court-circuit déséquilibré

6.1 Généralités

Les paragraphes suivants traitent des courants de court-circuit partiels s'écoulant par la terre et dans les conducteurs mis à la terre (sous forme de réseaux de terre et de câbles de garde de lignes aériennes) dans le cas d'un court-circuit monophasé 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. I''_{k1} conduit au courant de court-circuit le plus élevé à la terre par comparaison au courant de court-circuit biphasé à la terre si $Z_{(0)} > Z_{(1)}$ (voir Figure 10 de la CEI 60909-0 dans le cas où $Z_{(2)} = Z_{(1)}$). Pour $Z_{(0)} < Z_{(1)}$, le courant à la terre I''_{kE2E} dans le cas d'un court-circuit biphasé à la terre, doit être pris en considération conformément à la CEI 60909-0.

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 doivent 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. De plus, les postes A, B et C sont supposés être séparés par plus de deux fois la « distance du pylône éloigné du poste », D_F ,conformément à l'Equation (19).

6.2 Court-circuit monophasé à la terre dans un poste

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

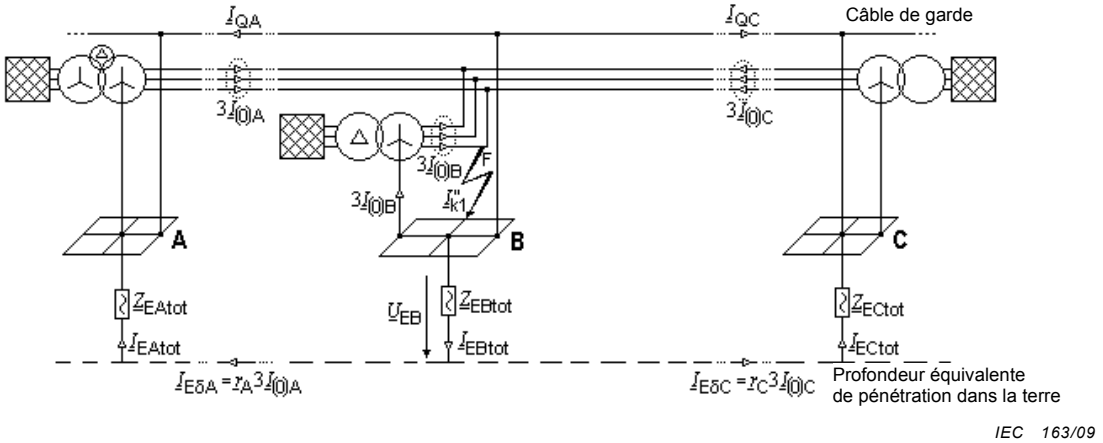


Figure 4 – Courants de court-circuit partiels dans le cas d'un court-circuit monophasé à la terre dans le poste B

Le courant de court-circuit monophasé à la terre $\underline{I}''_{k1}$ décrit à la Figure 4 est égal à trois fois les courants homopolaires s'écoulant vers l'emplacement F du court-circuit:

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

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Le courant $3\underline{I}_{(0)B}$ revient au nœud de répartition du transformateur par l'intermédiaire du réseau de terre au poste B et n'entraîne par conséquent pas de montée du potentiel à ce poste B. Les courants $3\underline{I}_{(0)A}$ et $3\underline{I}_{(0)C}$ reviennent aux postes A et C par la terre et les câbles de garde entre le poste B et les postes A et C. A une distance d'éloignement du poste, on obtient (voir Figure 4):

$$3\underline{I}_{(0)A} = \underline{I}_{E\delta A} + \underline{I}_{QA} = \underline{r}_A 3\underline{I}_{(0)A} + (1-\underline{r}_A)3\underline{I}_{(0)A} \quad (15a)$$

$$3\underline{I}_{(0)C} = \underline{I}_{E\delta C} + \underline{I}_{QC} = \underline{r}_C 3\underline{I}_{(0)C} + (1-\underline{r}_C)3\underline{I}_{(0)C} \quad (15b)$$

$\underline{r}_A$ et $\underline{r}_B$ sont les facteurs de réduction des câbles de garde entre B et A et entre B et C respectivement.

Le courant total de terre au poste B (emplacement du court-circuit) est le suivant:

$$\underline{I}_{EBtot} = \underline{r}_A 3\underline{I}_{(0)A} + \underline{r}_C 3\underline{I}_{(0)C} \quad (16)$$

Le courant $\underline{I}_{EBtot}$ s'écoule dans l'impédance totale de terre du poste B:

$$\underline{Z}_{EBtot} = \frac{1}{\frac{1}{R_{EB}} + \sum_i \frac{1}{\underline{Z}_{Pi}} + \sum_i \frac{1}{\underline{Z}_{Ui}}} \quad (17)$$

où

R_{EB} est la résistance du réseau de terre au poste B;

$\underline{Z}_P$ est l'impédance d'entrée conformément à l'Equation (1);

$\underline{Z}_U$ est l'impédance d'entrée des gaines, écrans ou armures de câbles ou autres conduites ou canalisations métalliques.

Le courant s'écoulant par $\underline{Z}_{EBtot}$ conduit au potentiel de terre $\underline{U}_{EB}$ au poste B:

$$\underline{U}_{EB} = \underline{Z}_{EBtot}\,\underline{I}_{EBtot} \quad (18)$$

La distance d'éloignement (éloignement par rapport à l'emplacement du court-circuit) est calculée comme suit:

$$D_F = 3\sqrt{R_T}\,\frac{d_T}{\mathrm{Re}\left\{\sqrt{\underline{Z}_Q}\right\}} \quad (19)$$

où

R_T est la résistance de pied des pylônes;

d_T est la distance entre les pylônes;

$\mathrm{Re}\left\{\sqrt{\underline{Z}_Q}\right\}$ est la partie réelle de la racine carrée de l'impédance du câble de garde de $\underline{Z}_Q = \underline{Z}'_Q d_T$ avec $\underline{Z}'_Q$ selon l'Equation (34).

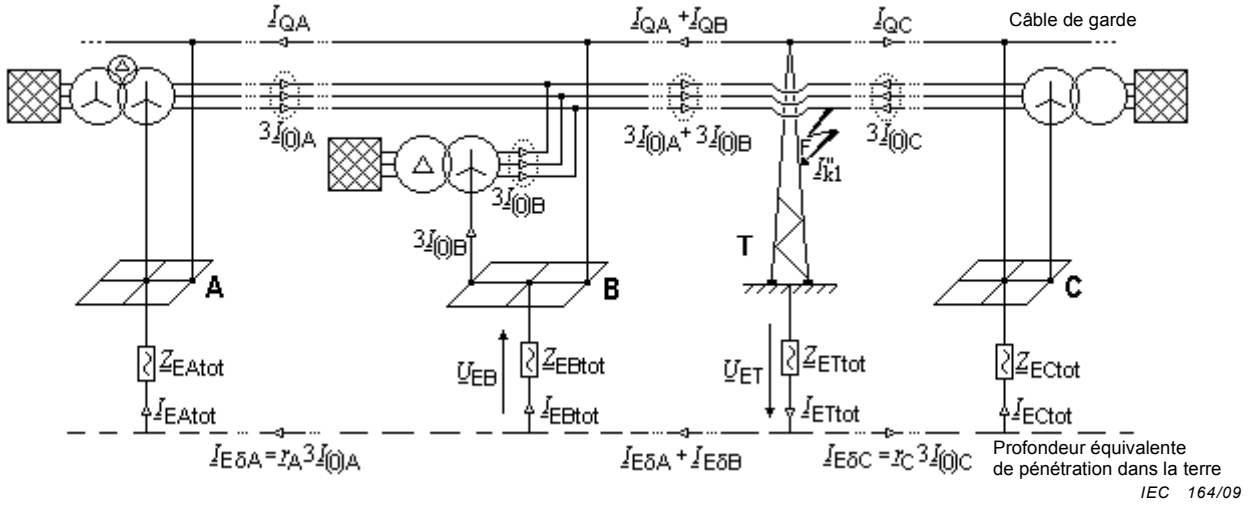
Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

NOTE 1 Si les postes A ou C sont plus proches que D_F du poste B, le courant total de terre $\underline{I}_{EBtot}$ est diminué d'une quantité supplémentaire des courants $\underline{r}_A 3\underline{I}_{(0)A}$ ou $\underline{r}_C 3\underline{I}_{(0)C}$ s'écoulant en retour vers le poste le plus proche A ou C par les câbles de garde.

NOTE 2 Des précautions particulières peuvent se révéler nécessaires dans le cas de lignes à double circuit ou de lignes parallèles avec des systèmes homopolaires couplés.

6.3 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 à la Figure 5. Le court-circuit est supposé se produire loin des postes.



IEC 164/09

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

Le courant de court-circuit monophasé à la terre $\underline{I}''_{k1}$ décrit à la Figure 5 est égal à trois fois les courants homopolaires s'écoulant vers l'emplacement F du court-circuit:

$$\underline{I}''_{k1} = 3\underline{I}_{(0)A} + 3\underline{I}_{(0)B} + 3\underline{I}_{(0)C} \tag{20}$$

Les trois courants $3\underline{I}_{(0)A}$, $3\underline{I}_{(0)B}$ et $3\underline{I}_{(0)C}$ décrits à la Figure 5 reviennent aux postes A, B et C par la terre et les câbles de garde des lignes aériennes entre les postes:

$$3\underline{I}_{(0)A} + 3\underline{I}_{(0)B} = \underline{I}_{E\delta A} + \underline{I}_{E\delta B} + \underline{I}_{QA} + \underline{I}_{QB} = \underline{r}_C\left(3\underline{I}_{(0)A} + 3\underline{I}_{(0)B}\right) + (1-\underline{r}_C)\left(3\underline{I}_{(0)A} + 3\underline{I}_{(0)B}\right) \tag{21}$$

et comme déjà obtenu à partir de la Figure 4 et les Equations (15):

$$3\underline{I}_{(0)A} = \underline{I}_{E\delta A} + \underline{I}_{QA} = \underline{r}_A 3\underline{I}_{(0)A} + (1-\underline{r}_A)3\underline{I}_{(0)A}$$

$$3\underline{I}_{(0)C} = \underline{I}_{E\delta C} + \underline{I}_{QC} = \underline{r}_C 3\underline{I}_{(0)C} + (1-\underline{r}_C)3\underline{I}_{(0)C}$$

$\underline{r}_A$ et $\underline{r}_B$ sont les facteurs de réduction des câbles de garde entre B et A et entre B et C respectivement.

Le courant total de terre sur le pylône T (emplacement de court-circuit), éloigné des postes B et C (distance supérieure à D_F) est le suivant:

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

$$\underline{I}_{\mathrm{ETtot}} = \underline{I}_{\mathrm{E\delta A}} + \underline{I}_{\mathrm{E\delta B}} + \underline{I}_{\mathrm{E\delta C}} = \underline{r}_{\mathrm{C}} \left(3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} + 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}} + 3\underline{I}_{(0)\mathrm{C}}\right) = \underline{r}_{\mathrm{C}} \underline{I}''_{\mathrm{k1}} \tag{22}$$

Ce courant s'écoule par l'impédance totale de terre du pylône T en court-circuit, raccordé au câble de garde de la ligne aérienne $\overline{\mathrm{BC}}$ conformément à la Figure 6:

$$\underline{Z}_{\mathrm{ETtot}} = \frac{1}{\dfrac{1}{R_{\mathrm{T}}} + \dfrac{2}{\underline{Z}_{\mathrm{P}}}} \tag{23}$$

R_{T} est la résistance de pied du pylône et $\underline{Z}_{\mathrm{P}}$ est l'impédance d'entrée conformément à la Figure 1.

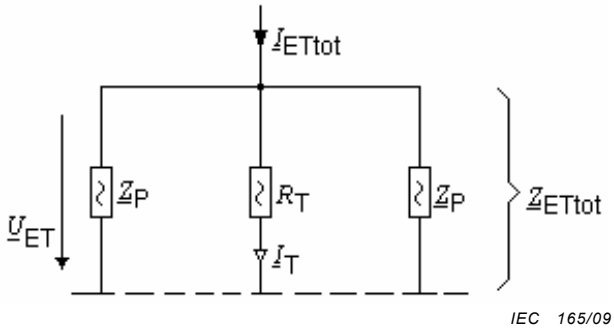


Figure 6 – Répartition du courant total de terre $\underline{I}_{\mathrm{ETtot}}$

$\underline{I}_{\mathrm{T}}$ est obtenu avec l'Equation (13), si $\underline{r}\,\underline{I}''_{\mathrm{kEE}}$ est remplacé par $\underline{r}_{\mathrm{C}}\,\underline{I}''_{\mathrm{k1}}$.

Le courant s'écoulant par $\underline{Z}_{\mathrm{ETtot}}$ conduit au potentiel de terre $\underline{U}_{\mathrm{ET}}$ sur le pylône en court-circuit (voir Figure 6).

$$\underline{U}_{\mathrm{ET}} = \underline{Z}_{\mathrm{ETtot}}\,\underline{I}_{\mathrm{ETtot}} = R_{\mathrm{T}}\,\underline{I}_{\mathrm{T}} \tag{24}$$

Si le court-circuit monophasé à la terre se produit sur un pylône au voisinage du poste B, alors le potentiel de terre peut être supérieur à celui calculé avec l'équation (24). Sa détermination doit faire l'objet d'une attention toute particulière comme indiqué en 6.4.

Le courant de terre au poste B dans le cas d'un court-circuit monophasé à la terre sur le pylône T (distance d'éloignement par rapport au poste B supérieure à D_{F}) est obtenu, conformément à la Figure 5, par l'équation suivante:

$$\underline{I}_{\mathrm{EBtot}} = \underline{r}_{\mathrm{C}}\left(3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} + 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}}\right) - \underline{r}_{\mathrm{A}}\,3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} \tag{25}$$

Le potentiel de terre du poste B avec le courant $\underline{I}_{\mathrm{EBtot}}$ obtenu avec l'Equation (25) devient dans ce cas:

$$\underline{U}_{\mathrm{EB}} = \underline{Z}_{\mathrm{EBtot}}\,\underline{I}_{\mathrm{EBtot}} \tag{26}$$

Si le court-circuit monophasé à la terre se produit sur un pylône au voisinage du poste B, alors le courant de terre au poste B peut être supérieur à $\underline{I}_{\mathrm{EBtot}}$ obtenu avec l'Equation (16)

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---
Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

dans le cas d'un court-circuit monophasé à la terre à ce même poste B (Figure 4). Sa détermination doit faire l'objet d'une attention toute particulière comme indiqué en 6.4.

6.4 Court-circuit monophasé à la terre au voisinage d'un poste

Si le court-circuit monophasé à la terre se produit sur un pylône au voisinage (distance inférieure à D_F) d'un poste (Figure 7), alors le potentiel de terre $\underline{U}_{EBn}$ (indice supplémentaire n pour souligner que le court-circuit monophasé à la terre se produit sur un pylône n = 0, 1, 2, 3 ... en dehors du poste) peut être supérieur à $\underline{U}_{EB}$ calculé avec l'Equation (18). Dans ce cas, le potentiel de terre $\underline{U}_{ETn}$ du pylône en court-circuit n au voisinage du poste B est également supérieur au potentiel de terre $\underline{U}_{ET}$ pour un pylône éloigné du poste B, calculé avec l'Equation (24).

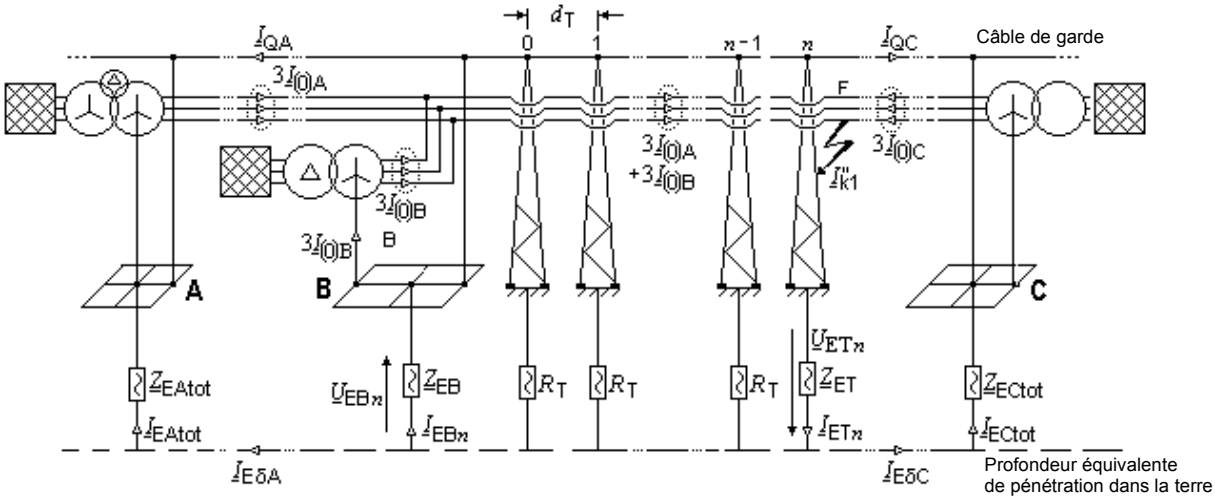


Figure 7 – Courants de court-circuit partiels dans le cas d'un court-circuit monophasé à la terre sur un pylône *n* d'une ligne aérienne au voisinage d'un poste B

Suivant la Figure 2, la numérotation des pylônes doit être prise en compte pour le calcul de $\underline{I}''_{k1}$ et $3\underline{I}_{(0)B}$.

6.4.1 Potentiel de terre $\underline{U}_{ETn}$ sur le pylône *n* en dehors du poste B

Le courant $\underline{I}_{ETn}$ (Figure 7) sur le pylône en court-circuit au voisinage du poste B s'écoulant dans $\underline{Z}_{ET}$ selon l'Equation (28) est égal à la superposition de deux termes, le premier dépendant du courant de terre $\underline{r}_C\underline{I}''_{k1}$ à l'emplacement du court-circuit et le second dépendant du courant $\underline{r}_C 3\underline{I}_{(0)B}$ revenant par la terre au nœud de répartition du transformateur dans le poste B.

$$\underline{I}_{ETn} = \underline{r}_C \underline{I}''_{k1} \frac{\underline{Z}_{Pn}}{\underline{Z}_{Pn} + \underline{Z}_{ET}} - \underline{r}_C 3\underline{I}_{(0)B} \frac{\underline{Z}_{EB}}{\underline{Z}_{EB} + \underline{Z}_P} \cdot \frac{1}{\underline{k}^n} \quad (27)$$

avec

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

$$\underline{Z}_{\mathrm{ET}} = \frac{1}{\frac{1}{R_{\mathrm{T}}} + \frac{1}{\underline{Z}_{\mathrm{P}}}} \tag{28}$$

et

$$\underline{Z}_{\mathrm{EB}} = \frac{1}{\frac{1}{R_{\mathrm{EB}}} + \frac{1}{\underline{Z}_{\mathrm{P}}}} \tag{29}$$

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

Le potentiel de terre $\underline{U}_{\mathrm{ET}n}$ sur le pylône en court-circuit n est donné par:

$$\underline{U}_{\mathrm{ET}n} = \underline{Z}_{\mathrm{ET}}\,\underline{I}_{\mathrm{ET}n} \tag{30}$$

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

Le courant $\underline{I}_{\mathrm{EB}n}$ s'écoulant dans $\underline{Z}_{\mathrm{EB}}$ illustré à la Figure 7 dans le cas d'un court-circuit monophasé à la terre sur le pylône n au voisinage du poste B est obtenu avec l'équation suivante:

$$\underline{I}_{\mathrm{EB}n} = \underline{r}_{\mathrm{C}} I''_{\mathrm{k1}} \frac{\underline{Z}_{\mathrm{ET}}}{\underline{Z}_{\mathrm{ET}} + \underline{Z}_{\mathrm{P}n}} \cdot \frac{2\underline{Z}_{\mathrm{P}} - \underline{Z}_{\mathrm{Q}}}{\left(\underline{Z}_{\mathrm{EB}} + \underline{Z}_{\mathrm{P}}\right)\underline{k}^{n} - \left(\underline{Z}_{\mathrm{EB}} - \underline{Z}_{\mathrm{P}} + \underline{Z}_{\mathrm{Q}}\right)\underline{k}^{-n}} - \underline{r}_{\mathrm{C}}\, 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}} \frac{\underline{Z}_{\mathrm{P}}}{\underline{Z}_{\mathrm{EB}} + \underline{Z}_{\mathrm{P}}} \tag{31}$$

Le potentiel de terre du poste B pendant le court-circuit monophasé à la terre sur le pylône n au voisinage du poste B est le suivant:

$$\underline{U}_{\mathrm{EB}n} = \underline{Z}_{\mathrm{EB}}\,\underline{I}_{\mathrm{EB}n} \tag{32}$$

7 Facteur de réduction pour les lignes aériennes avec câbles de garde

Le facteur de réduction des lignes aériennes avec câbles de garde peut être calculé comme suit:

$$\underline{r} = \frac{\underline{I}_{\mathrm{E}\delta}}{3\underline{I}_{(0)}} = 1 - \frac{\underline{Z}'_{\mathrm{QL}}}{\underline{Z}'_{\mathrm{Q}}} \tag{33}$$

$\underline{Z}'_{\mathrm{Q}}$ et $\underline{Z}'_{\mathrm{QL}}$ doivent être calculés à l'aide des Equations (34) et (35). Le résultat dépend de la résistivité du sol ρ, de la distance d_{QL} entre le câble de garde et les conducteurs de phase, ainsi que le rayon équivalent des câbles de garde r_{QQ} pour un ou plusieurs câbles de garde.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Tableau 2 – Résistivité du sol et profondeur équivalente de pénétration dans la terre

Types de sol	Résistivité du sol ρ Ωm	Profondeur équivalente de pénétration dans la terre δ m	
		pour 50 Hz	pour 60 Hz
Granite	>10 000	>9 300	>8 500
Rochers	3 000 ... 10 000	5 150 ... 9 330	4 670 ... 8 520
Sol pierreux	1 000 ... 3 000	2 950 ... 5 110	2 690 ... 4 670
Cailloux, sable sec	200 ... 1 200	1 320 ... 3 230	1 200 ... 2 950
Sol calcaire, sable humide	70 ... 200	780 ... 1 320	710 ... 1 200
Terre agricole	50 ... 100	660 ... 1 320	600 ... 850
Argile, glaise	10 ... 50	295 ... 660	270 ... 600
Sol marécageux	<20	<420	<380

L'impédance linéique du câble de garde avec retour par la terre est la suivante:

$$\underline{Z}'_{\mathrm{Q}} = \frac{R'_{\mathrm{Q}}}{\nu} + \omega\frac{\mu_0}{8} + \mathrm{j}\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\left(\frac{\mu_{\mathrm{r}}}{4\nu} + \ln\frac{\delta}{r_{\mathrm{QQ}}}\right) \tag{34}$$

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

$$\underline{Z}'_{\mathrm{QL}} = \omega\frac{\mu_0}{8} + \mathrm{j}\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\ln\frac{\delta}{d_{\mathrm{QL}}} \tag{35}$$

La profondeur équivalente de pénétration dans la terre δ dépend du type de sol indiqué dans le Tableau 2 et peut être obtenue comme suit:

$$\delta = \frac{1{,}851}{\sqrt{\omega\dfrac{\mu_0}{\rho}}} \tag{36}$$

Les définitions suivantes s'appliquent:

R'_{Q} Résistance linéique du câble de garde

d_{Q1Q2} Distance entre les deux câbles de garde Q1 et Q2

r_{Q} Rayon du câble de garde

r_{QQ} Rayon équivalent du câble de garde

pour un câble de garde: $r_{\mathrm{QQ}} = r_{\mathrm{Q}}$

pour deux câbles de garde: $r_{\mathrm{QQ}} = \sqrt{r_{\mathrm{Q}} d_{\mathrm{Q1Q2}}}$

ν Nombre de câbles de garde ($\nu = 1, 2$)

d_{QL} Distance moyenne géométrique entre le câble de garde et les conducteurs de phase

pour un câble de garde: $d_{\mathrm{QL}} = \sqrt[3]{d_{\mathrm{QL1}} d_{\mathrm{QL2}} d_{\mathrm{QL3}}}$

pour deux câbles de garde: $d_{\mathrm{QL}} = \sqrt[6]{d_{\mathrm{Q1L1}} d_{\mathrm{Q1L2}} d_{\mathrm{Q1L3}} d_{\mathrm{Q2L1}} d_{\mathrm{Q2L2}} d_{\mathrm{Q2L3}}}$

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

μ_r Perméabilité relative du matériau constitutif des câbles de garde

Câbles à armure d'acier avec âme en aluminium (ACSR) avec une couche d'aluminium: $\mu_r = 5...10$;

Autres câbles ACSR: $\mu_r \approx 1$;

Câbles en acier: $\mu_r \approx 75$.

Selon les Equations (34) et (35), le facteur de réduction des câbles de garde ACSR habituels dépend de la résistivité du sol ρ. La Figure 8 montre les facteurs de réduction pour les câbles de garde non magnétiques de différentes lignes aériennes de tensions nominales comprises entre 60 kV et 220 kV.

Dans le cas de lignes aériennes comportant un ou deux câbles de garde en acier, l'amplitude du facteur de réduction prend la valeur de 0,95 et 0,90 respectivement.

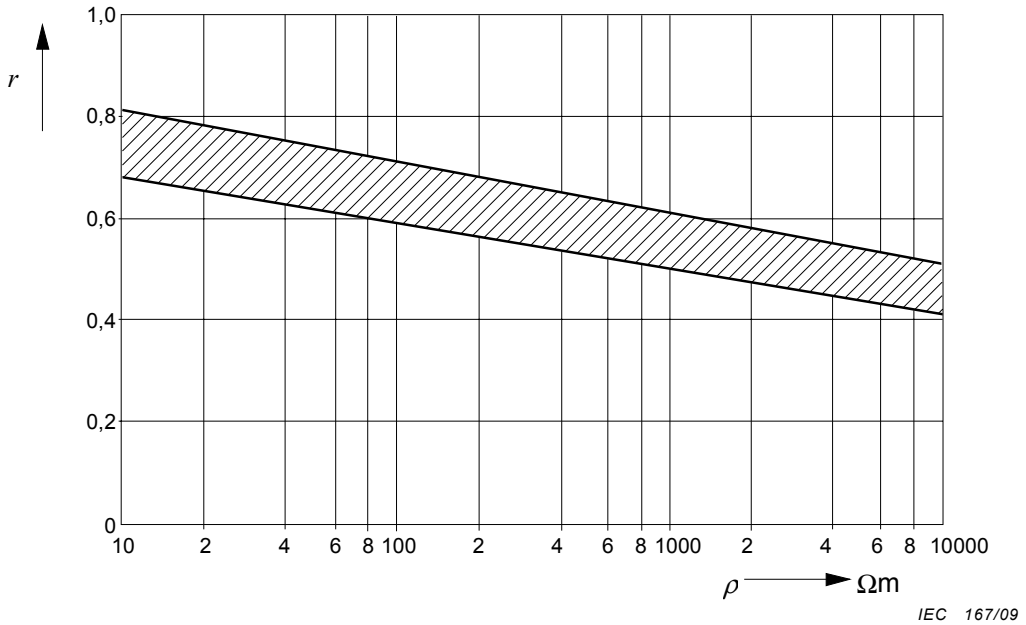


Figure 8 – Facteur de réduction *r* pour les lignes aériennes avec câbles de garde non magnétiques dépendant de la résistivité du sol ρ

8 Calcul de la répartition du courant et du facteur de réduction dans le cas de câbles avec gaine ou écran métallique mis à la terre à chaque extrémité

8.1 Aperçu

Le facteur de réduction des câbles d'alimentation avec gaine, écran et armure métalliques mis à la terre à chaque extrémité dépend du type de câble: câble à trois conducteurs avec une gaine commune, trois câbles monoconducteurs avec trois gaines ou écrans, et dans certains cas, avec une armure supplémentaire, ou la section de la (des) gaine(s) ou du (des) écran(s) métallique(s) conformément aux techniques et normes nationales en vigueur.

Le facteur de réduction des câbles avec armure en acier doit être fourni par le fabricant (voir CEI/TR 60909-2).

La présente norme prévoit que les câbles ont une gaine thermoplastique extérieure, voir CEI/ TR 60909-2.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

8.2 Câble à trois conducteurs

La Figure 9 illustre les configurations traitées dans le cas d'un câble à trois conducteurs avec une gaine ou un écran métallique, mis à la terre à chaque extrémité et avec une gaine thermoplastique extérieure qui isole le câble du sol environnant.

8.2.1 Court-circuit monophasé à la terre dans le poste B

Dans le cas de la Figure 9a), si l'alimentation du câble provient du côté A uniquement avec un courant de court-circuit monophasé à la terre $\underline{I}''_{k1} = 3\underline{I}_{(0)A}$ dans le poste B, le facteur de réduction $\underline{r}_1$ fournit la partie $\underline{I}_{E\delta A} = \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)A}$ du courant de court-circuit monophasé à la terre revenant par la terre par l'effet d'induction.

$$\underline{r}_1 = \frac{\underline{I}_{E\delta A}}{3I_{(0)A}} = 1 - \frac{\underline{Z}'_{SL}}{\underline{Z}'_S} = \frac{R'_S}{R'_S + \omega\frac{\mu_0}{8} + j\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\ln\frac{\delta}{r_S}} \tag{37}$$

$\underline{Z}'_S$ est l'impédance linéique de la gaine (non magnétique) (ou de l'écran) métallique avec retour par la terre:

$$\underline{Z}'_S = R'_S + \omega\frac{\mu_0}{8} + j\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\ln\frac{\delta}{r_S} \tag{38}$$

$\underline{Z}'_{SL}$ est l'impédance mutuelle linéique entre la gaine et l'un des conducteurs (à l'intérieur de la gaine, indépendamment de la position) avec retour par la terre.

$$\underline{Z}'_{SL} = \omega\frac{\mu_0}{8} + j\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\ln\frac{\delta}{r_S} \tag{39}$$

où

R'_S Résistance linéique de la gaine ou de l'écran (cuivre, aluminium, plomb); $R'_S = 1/(\kappa \cdot q_S)$ avec $q_S \approx 2\pi r_S d_S$ où d_S est l'épaisseur de la gaine ou de l'écran

r_s Rayon moyen de la gaine ou de l'écran;

δ Profondeur équivalente de pénétration dans la terre (Tableau 2 ou Equation (36)).

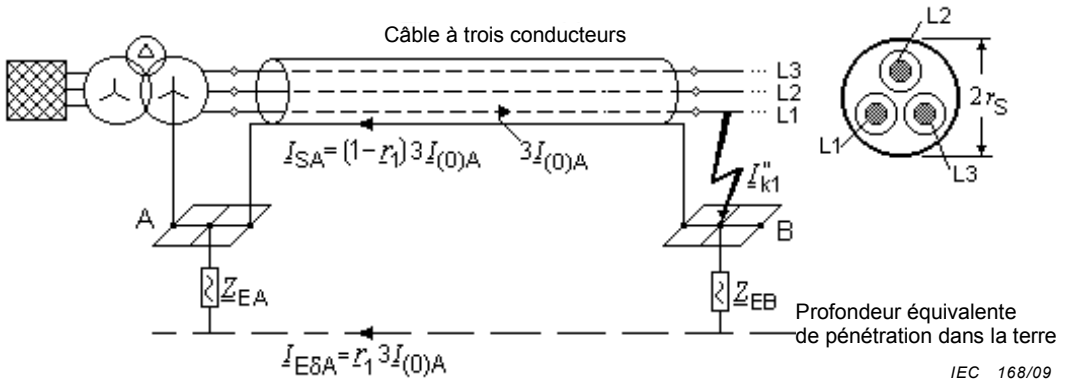
Le courant s'écoulant dans la gaine ou dans l'écran illustré à la Figure 9a) est calculé comme suit:

$$\underline{I}_{SA} = (1 - \underline{r}_1)\, 3\underline{I}_{(0)A} \tag{40}$$

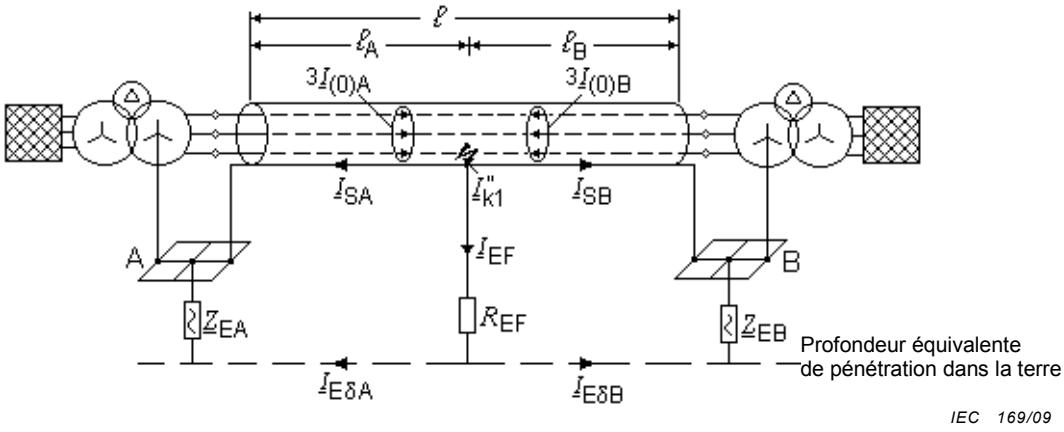
Le courant s'écoulant par la terre illustré à la Figure 9a) est donné par:

$$\underline{I}_{E\delta A} = \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)A} \tag{41}$$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale



a) Alimentation à partir du poste A uniquement et court-circuit monophasé à la terre au poste B



$$(\underline{I}''_{k1}=3\underline{I}_{(0)A}+3\underline{I}_{(0)B};\ 3\underline{I}_{(0)A}=\underline{I}_{SA}+\underline{I}_{E\delta A};\ 3\underline{I}_{(0)B}=\underline{I}_{SB}+\underline{I}_{E\delta B})$$

b) Alimentation à partir des postes A et B et court-circuit monophasé à la terre sur le câble entre les postes A et B

Figure 9 – Facteur de réduction de câbles d'alimentation à trois conducteurs

8.2.2 Court-circuit monophasé à la terre sur le câble entre le poste A et le poste B

Dans le cas d'un court-circuit monophasé à la terre sur le câble entre les postes A et B, les courants s'écoulant dans la gaine ou l'écran illustrés à la Figure 9b) sont calculés comme suit:

$$\underline{I}_{SA}=(1-\underline{r}_1)3\underline{I}_{(0)A}+\underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)A}\frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}'_S\ell_A}+\underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)B}\frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}'_S\ell_A} \quad (42)$$

$$\underline{I}_{SB}=(1-\underline{r}_1)3\underline{I}_{(0)B}+\underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)B}\frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}'_S\ell_B}+\underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)A}\frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}'_S\ell_B} \quad (43)$$

Le courant à la terre à l'emplacement du court-circuit est le suivant:

$$\underline{I}_{EF}=\underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)A}\frac{\underline{Z}_{EStot}}{R_{EF}}+\underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)B}\frac{\underline{Z}_{EStot}}{R_{EF}} \quad (44)$$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Les courants par la terre illustrés à la Figure 9b) sont donnés par:

$$\underline{I}_{\mathrm{E}\delta\mathrm{A}} = \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} \frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{B}}} + \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} \frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{R_{\mathrm{EF}}} - \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}} \frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{A}}} \tag{45}$$

$$\underline{I}_{\mathrm{E}\delta\mathrm{B}} = \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}} \frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{A}}} + \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}} \frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{R_{\mathrm{EF}}} - \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} \frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{B}}} \tag{46}$$

avec

$$\underline{Z}_{\mathrm{EStot}} = \frac{1}{\dfrac{1}{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{A}}} + \dfrac{1}{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{B}}} + \dfrac{1}{R_{\mathrm{EF}}}} = \frac{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{A}}\ell_{\mathrm{B}}}{\ell + \dfrac{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{A}}\ell_{\mathrm{B}}}{R_{\mathrm{EF}}}} \tag{47}$$

Le facteur de réduction $\underline{r}_1$ est donné dans l'Equation (37).

Les équations fournies sont valables pour une longueur de câble d'au moins $\ell \approx \delta/2$ ($\ell \approx 0{,}5$ km dans le cas de $\rho = 100\ \Omega$m) entre les postes A et B illustrés à la Figure 9a) et pour les distances ℓ_{A} et ℓ_{B} entre l'emplacement du court-circuit et les postes contigus A et B illustrés à la Figure 9b) pour au moins $\ell \approx \delta/2$ dans le Cas 2 selon 8.2.2.2

Dans la mesure où, normalement, la résistance R_{EF}, à l'emplacement du court-circuit par rapport à la terre de référence n'est pas connue, les deux cas $R_{\mathrm{EF}} \rightarrow \infty$ (il n'y a pas de connexion à l'emplacement du court-circuit entre la gaine (écran) métallique du câble et le sol environnant) et $R_{\mathrm{EF}} \rightarrow$ Min. doivent être pris en compte.

8.2.2.1 Cas 1: $R_{\mathrm{EF}} - \propto$

Dans le cas de $R_{\mathrm{EF}} \rightarrow \infty$, il est prévu que la gaine thermoplastique extérieure ne sera pas détruite par le courant de court-circuit ou par l'arc qui se produit à l'emplacement du court-circuit. Les expressions suivantes sont celles obtenues avec les Equations (42) et (43):

$$\underline{I}_{\mathrm{SA}} = (1 - \underline{r}_1)3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} + \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} \frac{\ell_{\mathrm{B}}}{\ell} + \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}} \frac{\ell_{\mathrm{B}}}{\ell} \tag{42a}$$

$$\underline{I}_{\mathrm{SB}} = (1 - \underline{r}_1)3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}} + \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}} \frac{\ell_{\mathrm{A}}}{\ell} + \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} \frac{\ell_{\mathrm{A}}}{\ell} \tag{43a}$$

Dans ce cas, les Equations (45) et (46) permettent d'obtenir:

$$\underline{I}_{\mathrm{E}\delta\mathrm{A}} = \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} \frac{\ell_{\mathrm{A}}}{\ell} - \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}} \frac{\ell_{\mathrm{B}}}{\ell} \tag{45a}$$

$$\underline{I}_{\mathrm{E}\delta\mathrm{B}} = \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}} \frac{\ell_{\mathrm{B}}}{\ell} - \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} \frac{\ell_{\mathrm{A}}}{\ell} \tag{46a}$$

Le courant de court-circuit monophasé à la terre à l'emplacement du court-circuit entre A et B doit être calculé avec l'impédance linéique homopolaire $\underline{Z}'_{(0)\mathrm{S}}$ du câble pour un retour de

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

courant uniquement par la gaine ou l'écran (voir CEI/TR 60909-2 et les informations concernant le calcul de cette valeur, fournies dans la CEI/TR 60909-2, Equations (30) et (31)).

Le courant le plus élevé s'écoulera dans la gaine ou l'écran, si l'emplacement de court-circuit se situe à proximité du poste A ou du poste B et si le court-circuit illustré à la Figure 9b) est alimenté des deux côtés.

$$\underline{I}_{\mathrm{SA\,max}} = 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}}\,(\ell_{\mathrm{A}} = 0) + \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}}(\ell_{\mathrm{A}} = 0) \tag{42b}$$

$$\underline{I}_{\mathrm{SB\,max}} = 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}}(\ell_{\mathrm{A}} = \ell) + \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}}(\ell_{\mathrm{A}} = \ell) \tag{43b}$$

Le courant le plus élevé qui s'écoule par la terre est également obtenu si le court-circuit se produit au voisinage du poste A ou B:

$$\underline{I}_{\mathrm{E\delta A\,max}} = \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}}(\ell_{\mathrm{A}} = \ell) \tag{45b}$$

$$\underline{I}_{\mathrm{E\delta B\,max}} = \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}}(\ell_{\mathrm{A}} = 0) \tag{46b}$$

8.2.2.2 Cas 2: R_{EF} = 5 Ω

La valeur $R_{\mathrm{EF}} = 5\Omega$ doit être considérée comme une hypothèse prudente dans la mesure où la surface entre la connexion et le sol environnant est de petite dimension, même si la gaine thermoplastique extérieure est détruite. La fixation de cette valeur prévoit que l'emplacement du court-circuit se situe à l'extérieur des postes A et B et qu'aucune tige ou conduite métallique ne se situe au voisinage de l'emplacement du court-circuit.

Dans ce cas, le courant de court-circuit monophasé à la terre $\underline{I}''_{\mathrm{k1}}$ à l'emplacement du court-circuit entre A et B doit être calculé avec l'impédance homopolaire $\underline{Z}'_{(0)\mathrm{SE}}$ pour un retour de courant par la gaine ou l'écran du câble et la terre (voir CEI/TR 60909-2).

Les courants qui s'écoulent dans la gaine ou l'écran et par la terre doivent être calculés à l'aide des Equations (42), (43) et (45), (46).

Le courant le plus élevé qui s'écoule dans la gaine ou l'écran peut être calculé à l'aide des Equations (42b) et (43b).

Si les valeurs les plus élevées des courants par la terre sont recherchées, utiliser le courant de court-circuit monophasé à la terre le plus élevé alimenté par un côté du câble uniquement et négliger le courant alimenté par l'autre côté. Dans ce cas, les Equations (45) et (46) permettent d'obtenir:

$$\underline{I}_{\mathrm{E\delta A\,max}} = \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}}\left(\frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{B}}} + \frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{R_{\mathrm{EF}}}\right) \tag{45c}$$

$$\underline{I}_{\mathrm{E\delta B\,max}} = \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}}\left(\frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{A}}} + \frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{R_{\mathrm{EF}}}\right) \tag{46c}$$

Les calculs à l'aide des équations mentionnées ci-dessus peuvent générer des courants par la terre plus élevés que ceux obtenus avec les Equations (45b) ou (46b).

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

NOTE L'Article C.2 donne un exemple pour les calculs, si les courants les plus élevés par la terre sont recherchés.

Si le câble comporte une armure métallique supplémentaire (par exemple dans le cas d'une gaine de plomb), le fabricant doit fournir le facteur de réduction (selon le courant s'écoulant dans la gaine), obtenu par exemple sur la base de mesurages. Voir la CEI/TR 60909-2 pour information.

8.3 Trois câbles monoconducteurs

Comme indiqué en 8.2, une distinction doit être faite, également dans ce cas, entre un court-circuit monophasé à la terre au poste B, si le courant de court-circuit est alimenté par le poste A (Figure 10a)), et le cas où le court-circuit se produit sur le câble en un emplacement entre les postes A et B (Figure 10b)).

8.3.1 Court-circuit monophasé à la terre au poste B

Dans le cas des trois câbles monoconducteurs illustrés à la Figure 10a), trois gaines (écrans) étant par ailleurs mis à la terre et connectés à chaque extrémité, le facteur de réduction $\underline{r}_3$ doit être calculé comme suit:

$$\underline{r}_3 = 1 - \frac{\underline{I}_{S1} + \underline{I}_{S2} + \underline{I}_{S3}}{3\underline{I}_{(0)}} = \frac{R'_S}{R'_S + 3 \cdot \omega \frac{\mu_0}{8} + \mathrm{j}3 \cdot \omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\delta}{\sqrt[3]{r_S d_{L1L2} d_{L1L3}}}} \tag{48}$$

Les distances d_{L1L2} et d_{L1L3} conformes à la Figure 10a) doivent être utilisées pour des configurations triangulaires ou planes. Le résultat obtenu avec l'Equation (48) est le résultat exact pour une configuration triangulaire. Pour une configuration plane, le résultat de l'Equation (48) peut être utilisé comme un calcul approché suffisant pour la présente norme, indépendamment du fait que le courant de court-circuit monophasé à la terre s'écoule dans un câble extérieur ou le câble central d'une configuration plane.

La somme des courants qui s'écoulent dans les trois gaines ou les trois écrans conformément à la Figure 10a, est calculée comme suit:

$$\underline{I}_{SA} = \underline{I}_{S1A} + \underline{I}_{S2A} + \underline{I}_{S3A} = (1 - \underline{r}_3)\, 3\underline{I}_{(0)A} \tag{49}$$

Le courant par la terre, revenant au poste A illustré à la Figure 10a), est obtenu avec le facteur de réduction $\underline{r}_3$ donné à l'Equation (48):

$$\underline{I}_{E\delta A} = \underline{r}_3\, 3\underline{I}_{(0)A} \tag{50}$$

8.3.2 Court-circuit monophasé à la terre sur le câble entre le poste A et le poste B

Dans le cas d'un court-circuit monophasé à la terre sur le câble entre les postes A et B, dont l'alimentation s'effectue par les deux côtés comme illustré à la Figure 10b), les courants s'écoulent généralement dans les trois conducteurs de phase et dans les trois gaines ou écrans des câbles monoconducteurs.

La somme des courants qui s'écoulent dans les trois gaines ou les trois écrans est calculée comme suit:

$$\underline{I}_{SA} = (1 - \underline{r}_3)\, 3\underline{I}_{(0)A} + \underline{r}_3\, 3\underline{I}_{(0)A} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}'_{S\ell A}} + \underline{r}_3\, 3\underline{I}_{(0)B} \frac{\underline{Z}_{EStot}}{\underline{Z}'_{S\ell A}} \tag{51}$$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

$$\underline{I}_{\mathrm{SB}} = (1-\underline{r}_3)\,3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}} + \underline{r}_3\,3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}}\frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{B}}} + \underline{r}_3\,3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}}\frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{B}}} \tag{52}$$

Le courant à la terre à l'emplacement du court-circuit est le suivant:

$$\underline{I}_{\mathrm{EF}} = \underline{r}_3\,3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}}\frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{R_{\mathrm{EF}}} + \underline{r}_3\,3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}}\frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{R_{\mathrm{EF}}} \tag{53}$$

Les courants par la terre sont donnés par:

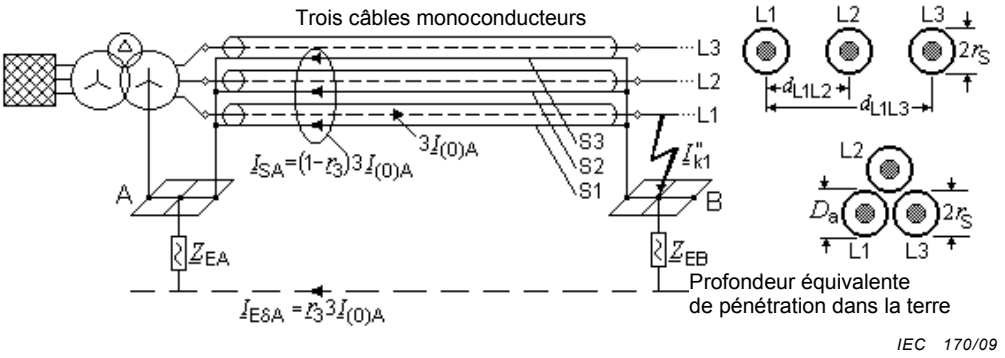
$$\underline{I}_{\mathrm{E}\delta\mathrm{A}} = \underline{r}_3\,3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}}\frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{B}}} + \underline{r}_3\,3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}}\frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{R_{\mathrm{EF}}} - \underline{r}_3\,3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}}\frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{A}}} \tag{54}$$

$$\underline{I}_{\mathrm{E}\delta\mathrm{B}} = \underline{r}_3\,3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}}\frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{A}}} + \underline{r}_3\,3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}}\frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{R_{\mathrm{EF}}} - \underline{r}_3\,3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}}\frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{B}}} \tag{55}$$

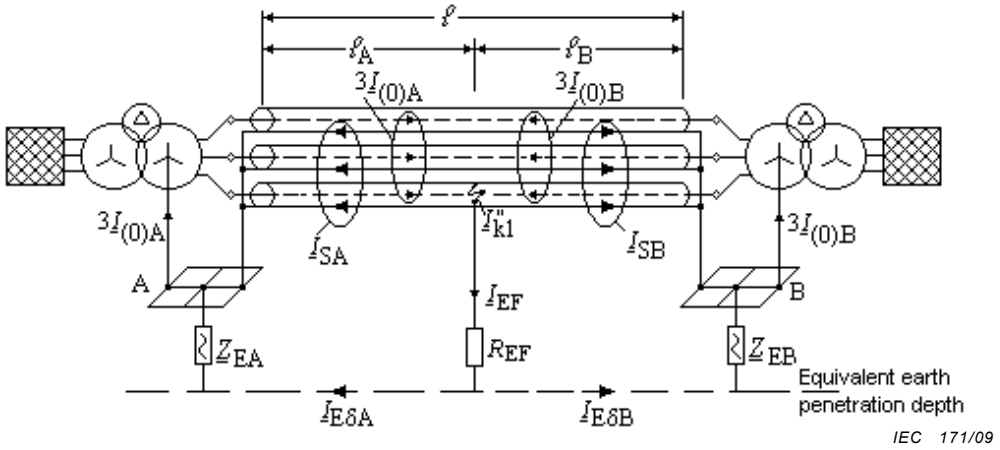
avec $\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}$ conformément à l'Equation (47).

Dans ce cas, $\underline{Z}'_{\mathrm{S}}$ est l'impédance linéique propre de l'une des trois gaines ou de l'un des trois écrans, calculée à l'aide de l'Equation (38).

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale



a) Alimentation à partir du poste A uniquement et court-circuit monophasé à la terre au poste B



$$(\underline{I}''_{k1}=3\underline{I}_{(0)A}+3\underline{I}_{(0)B};\ 3\underline{I}_{(0)A}=\underline{I}_{SA}+\underline{I}_{E\delta A};\ 3\underline{I}_{(0)B}=\underline{I}_{SB}+\underline{I}_{E\delta B})$$

b) Alimentation à partir des postes A et B et court-circuit monophasé à la terre sur le câble entre les postes A et B

Figure 10 – Facteurs de réduction de trois câbles d'alimentation monoconducteurs

Dans la mesure où, normalement, la résistance R_{EF}, à l'emplacement du court-circuit par rapport à la terre de référence n'est pas connue, les deux cas $R_{EF} \rightarrow \infty$ (il n'y a pas de connexion à l'emplacement du court-circuit entre la gaine ou l'écran métallique du câble et le sol environnant) et $R_{EF} \rightarrow$ Min. doivent être pris en compte.

8.3.2.1 Cas 1: $R_{EF} \rightarrow \infty$

Dans le cas de $R_{EF} \rightarrow \infty$, il est prévu que la gaine thermoplastique extérieure ne sera pas détruite par le courant de court-circuit ou par l'arc qui se produit à l'emplacement du court-circuit. Les expressions suivantes sont celles obtenues avec les Equations (51) et (52):

$$\underline{I}_{SA}=(1-\underline{r}_3)3\underline{I}_{(0)A}+\underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)A}\frac{\ell_B}{\ell}+\underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)B}\frac{\ell_B}{\ell} \quad (51a)$$

$$\underline{I}_{SB}=(1-\underline{r}_3)3\underline{I}_{(0)B}+\underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)B}\frac{\ell_A}{\ell}+\underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)A}\frac{\ell_A}{\ell} \quad (52a)$$

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Dans ce cas, les Equations (54) et (55) permettent d'obtenir:

$$\underline{I}_{\mathrm{E}\delta\mathrm{A}} = \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} \frac{\ell_{\mathrm{A}}}{\ell} - \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}} \frac{\ell_{\mathrm{B}}}{\ell} \tag{54a}$$

$$\underline{I}_{\mathrm{E}\delta\mathrm{B}} = \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}} \frac{\ell_{\mathrm{B}}}{\ell} - \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} \frac{\ell_{\mathrm{A}}}{\ell} \tag{55a}$$

Le courant de court-circuit monophasé à la terre à l'emplacement du court-circuit entre A et B doit être calculé avec l'impédance homopolaire $\underline{Z}'_{(0)\mathrm{S}}$ du réseau de câbles pour un retour de courant uniquement par les gaines ou les écrans (voir CEI/TR 60909-2).

Le courant le plus élevé s'écoulera dans la gaine ou l'écran S1, si l'emplacement de court-circuit se situe à proximité du poste A ou du poste B et si le court-circuit illustré à la Figure 10b) est alimenté des deux côtés.

$$\underline{I}_{\mathrm{S1Amax}} \approx 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}}(\ell_{\mathrm{A}} = 0) + (2 + \underline{r}_3)\underline{I}_{(0)\mathrm{B}}(\ell_{\mathrm{A}} = 0) \tag{51b}$$

$$\underline{I}_{\mathrm{S1Bmax}} \approx 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}}(\ell_{\mathrm{A}} = \ell) + (2 + \underline{r}_3)\underline{I}_{(0)\mathrm{A}}(\ell_{\mathrm{A}} = \ell) \tag{52b}$$

Les courants les plus élevés qui s'écoulent par la terre sont également obtenus si le court-circuit se produit au voisinage du poste A ou B.

$$\underline{I}_{\mathrm{E}\delta\mathrm{A}\,\max} = \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}}(\ell_{\mathrm{A}} = \ell) \tag{54b}$$

$$\underline{I}_{\mathrm{E}\delta\mathrm{B}\,\max} = \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}}(\ell_{\mathrm{A}} = 0) \tag{55b}$$

8.3.2.2 Cas 2: $R_{\mathrm{EF}} = 5\,\Omega$

La valeur $R_{\mathrm{EF}} = 5\,\Omega$ doit être considérée comme une hypothèse prudente, voir l'Article 8.2.2.2.

Le courant de court-circuit monophasé à la terre $\underline{I}''_{\mathrm{k1}}$ à l'emplacement du court-circuit entre A et B doit être calculé avec l'impédance linéique homopolaire $\underline{Z}'_{(0)\mathrm{SE}}$ pour un retour de courant par les gaines ou les écrans du câble et par la terre (voir CEI/TR 60909-2).

La somme des courants qui s'écoulent dans les gaines ou les écrans et la somme des courants qui s'écoulent par la terre doivent être calculées à l'aide des Equations (51), (52) et (54), (55).

Les courants les plus élevés qui s'écoulent dans la gaine ou l'écran S1 peuvent être calculés à l'aide des Equations (51b) et (52b).

Si les valeurs les plus élevées des courants par la terre sont recherchées, utiliser le courant de court-circuit monophasé à la terre le plus élevé alimenté par un côté du câble uniquement et négliger le courant alimenté par l'autre côté. Dans ce cas, les Equations (54) et (55) permettent d'obtenir:

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

$$\underline{I}_{\mathrm{E}\delta\mathrm{Amax}} = \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}}(\ell_{\mathrm{A}} = \ell)\left(\frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}(\ell_{\mathrm{A}} = \ell)}{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{B}}} + \frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}(\ell_{\mathrm{A}} = \ell)}{R_{\mathrm{EF}}}\right) = \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}}(\ell_{\mathrm{A}} = \ell) \quad (54c)$$

$$\underline{I}_{\mathrm{E}\delta\mathrm{Bmax}} = \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}}(\ell_{\mathrm{A}} = 0)\left(\frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}(\ell_{\mathrm{A}} = 0)}{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{A}}} + \frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}(\ell_{\mathrm{A}} = 0)}{R_{\mathrm{EF}}}\right) = \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}}(\ell\mathrm{A} = 0) \quad (55c)$$

NOTE L'Annexe D donne un exemple pour le calcul des courants qui s'écoulent par la terre.

S'il convient que les câbles comportent une armure métallique supplémentaire, le fabricant doit fournir le facteur de réduction et indiquer la répartition du courant.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Annexe A
(informative)

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

A.1 Aperçu

Deux courts-circuits monophasés simultanés séparés à la terre sur une seule ligne aérienne alimentée, sont illustrés à la Figure A.1.

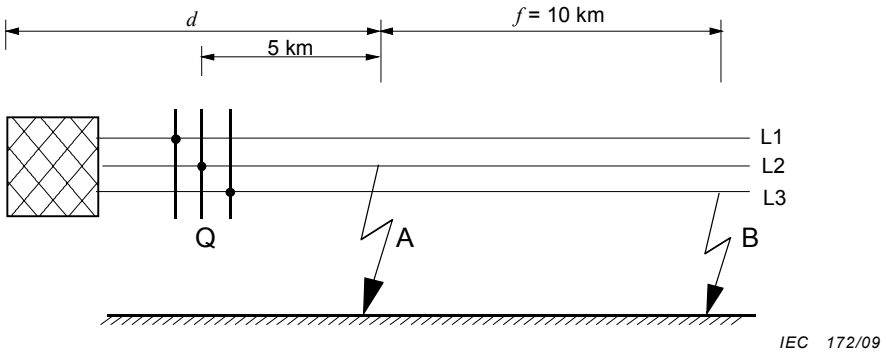


Figure A.1 – Deux courts-circuits monophasés simultanés séparés à la terre sur une seule ligne aérienne alimentée (voir Tableau 1)

A.2 Données

Tension nominale: U_n = 66 kV

Fréquence nominale: 50 Hz

Réseau avec neutre isolé ou mis à la terre par bobine d'extinction

Impédance de réseau au point de raccordement de l'alimentation Q: $\underline{Z}_{(1)Q} = (1{,}5 + j15)\,\Omega$

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

$$I''_{kQ} = \frac{1{,}1 \times 66\ \text{kV}}{\sqrt{3}\,|1{,}5 + j15|\,\Omega} = 2{,}8\ \text{kA}$$

Ligne aérienne:

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

Câble de garde $1 \times 49\ \text{mm}^2$ acier, $r_Q = 4{,}5\text{mm}$, $R'_Q = 2{,}92\ \Omega/\text{km}$, $\mu_r = 75$

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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Impédance linéique de la ligne:

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

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

Résistivité du sol rocheux $\rho = 1\,000\ \Omega\mathrm{m}$

Profondeur équivalente de pénétration dans la terre

$\delta = 2\,950$ m donnée dans le Tableau 2 ou obtenue avec l'Equation (36)

Résistance de pied de pylône $R_\mathrm{T} = 10\ \Omega$

Distance entre pylônes $d_\mathrm{T} = 300$ m

A.3 Calculs

Impédance linéique du câble de garde avec retour par la terre conformément à l'Equation (34) avec $\nu = 1$:

$$\underline{Z}'_\mathrm{Q} = 2{,}92\frac{\Omega}{\mathrm{km}} + 0{,}0493\frac{\Omega}{\mathrm{km}} + \mathrm{j}314\mathrm{s}^{-1}\frac{4\pi\cdot 10^{-4}\ \mathrm{Vs}}{2\pi\ \mathrm{Akm}}\left(\frac{75}{4} + \ln\frac{2950\mathrm{m}}{4{,}5\mathrm{mm}}\right) = (2{,}969 + \mathrm{j}2{,}020)\frac{\Omega}{\mathrm{km}}$$

Impédance mutuelle linéique entre le câble de garde et les conducteurs de phase, avec retour par la terre, conformément à l'Equation (35):

$$\underline{Z}'_\mathrm{QL} = 0{,}0493\frac{\Omega}{\mathrm{km}} + \mathrm{j}314\mathrm{s}^{-1}\frac{4\pi\cdot 10^{-4}\ \mathrm{Vs}}{2\pi\ \mathrm{Akm}}\ln\frac{2950\mathrm{m}}{6\mathrm{m}} = (0{,}049 + \mathrm{j}0{,}389)\frac{\Omega}{\mathrm{km}}$$

Facteur de réduction du câble de garde conformément à l'Equation (33):

$$\underline{r} = 1 - \frac{\underline{Z}'_\mathrm{QL}}{\underline{Z}'_\mathrm{Q}} = 1 - \frac{(0{,}049 + \mathrm{j}0{,}389)\Omega/\mathrm{km}}{(2{,}969 + \mathrm{j}2{,}020)\Omega/\mathrm{km}} = 0{,}928 - \mathrm{j}0{,}082\,; \qquad r = 0{,}931$$

Impédance d'entrée conformément à l'Equation (1) avec:

$$\underline{Z}_\mathrm{Q} = \underline{Z}'_\mathrm{Q} d_\mathrm{T} = (2{,}97 + \mathrm{j}2{,}02)(\Omega/\mathrm{km})\cdot 0{,}3\mathrm{km}:$$

$$\underline{Z}_\mathrm{P} = 0{,}5\cdot(0{,}891 + \mathrm{j}0{,}606)\Omega + \sqrt{[0{,}5\cdot(0{,}891 + \mathrm{j}0{,}606)]^2 + 10\cdot(0{,}891 + \mathrm{j}0{,}606)\ \Omega} = (3{,}610 + \mathrm{j}1{,}303)\Omega$$

L'Equation (8) donnée dans le Tableau 1 donne:

$$\underline{I}''_\mathrm{kEE} = \frac{3\cdot 1{,}1\cdot 66\mathrm{kV}}{(14{,}1 + 3{,}4 + 3{,}2)\Omega + \mathrm{j}(102 + 8 + 14)\Omega} = (0{,}285 - \mathrm{j}1{,}709)\ \mathrm{kA}\,; \qquad I''_\mathrm{kEE} = 1{,}732\ \mathrm{kA}$$

où

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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

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

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

Le courant à la terre par la résistance du pied du pylône, R_T, aux emplacements des courts-circuits A et B est déterminé à l'aide de l'Equation (13):

$$\underline{I}_\mathrm{T} = (0{,}928 - \mathrm{j}0{,}082)(0{,}285 - \mathrm{j}1{,}709)\,\mathrm{kA}\,\frac{(3{,}610 + \mathrm{j}1{,}303)\Omega}{(3{,}610 + \mathrm{j}1{,}303)\Omega + 2 \cdot 10\,\Omega} = (0{,}094 - \mathrm{j}0{,}244)\,\mathrm{kA}\,;$$

$$I_\mathrm{T} = 0{,}262\,\mathrm{kA}$$

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Annexe B
(informative)

Exemples de calcul des courants de courts-circuits partiels par la terre

B.1 Aperçu

Un réseau de 132 kV, et une fréquence de 50 Hz, est fourni comme illustré aux Figures B.1 et B.3. Les postes A et B sont distants de 40 km, les postes B et C étant distants de 100 km.

B.2 Données

Poste A:

Impédance de court-circuit	$\underline{Z}_{A} = (0 + j6{,}4)\,\Omega$
Impédance homopolaire du transformateur	$\underline{Z}_{(0)A} = (0 + j12)\,\Omega$

Poste B:

Impédance de court-circuit	$\underline{Z}_{B} = (0 + j7{,}6)\,\Omega$
Impédance homopolaire du transformateur	$\underline{Z}_{(0)B} = (0 + j7)\,\Omega$
Résistance du réseau de terre	$R_{EB} = 5\,\Omega$

Poste C:

Impédance de court-circuit	$\underline{Z}_{C} = (0 + j21)\,\Omega$
Impédance homopolaire du transformateur	$\underline{Z}_{(0)C} = (0 + j20{,}3)\,\Omega$

Ligne aérienne:

Conducteurs	$3 \times 2 \times 240/40\,\text{mm}^2$ ACSR
Câble de garde	$1 \times 240/40\,\text{mm}^2$ ACSR
Impédance linéique directe par phase	$\underline{Z}'_{(1)L} = \underline{Z}'_{L} = (0{,}06 + j0{,}298)\ \Omega/\text{km}$
Impédance homopolaire linéique par phase	$\underline{Z}'_{(0)L} = (0{,}272 + j1{,}48)\ \Omega/\text{km}$
Résistivité du sol	$\rho = 1000\ \Omega\text{m}$
Profondeur équivalente de pénétration dans la terre	$\acute{\delta} = 2950$ m (données fournies dans le Tableau 2)
Impédance linéique du câble de garde	$\underline{Z}'_{Q} = (0{,}17 + j0{,}801)\ \Omega/\text{km}$
Facteur de réduction du câble de garde	$\underline{r}_{A} = \underline{r}_{C} = \underline{r} = 0{,}6 - j0{,}03 \approx 0{,}6$
Résistance de pied de pylône	$R_{T} = 10\ \Omega$
Distance entre pylônes	$d_{T} = 400$ m

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Longueur de la ligne aérienne entre A et B $\ell_1 = 40$ km

Longueur de la ligne aérienne entre B et C $\ell_2 = 100$ km

B.3 Court-circuit monophasé à la terre dans un poste

Un court-circuit monophasé à la terre se produit dans le poste B, comme illustré à la Figure B.1.

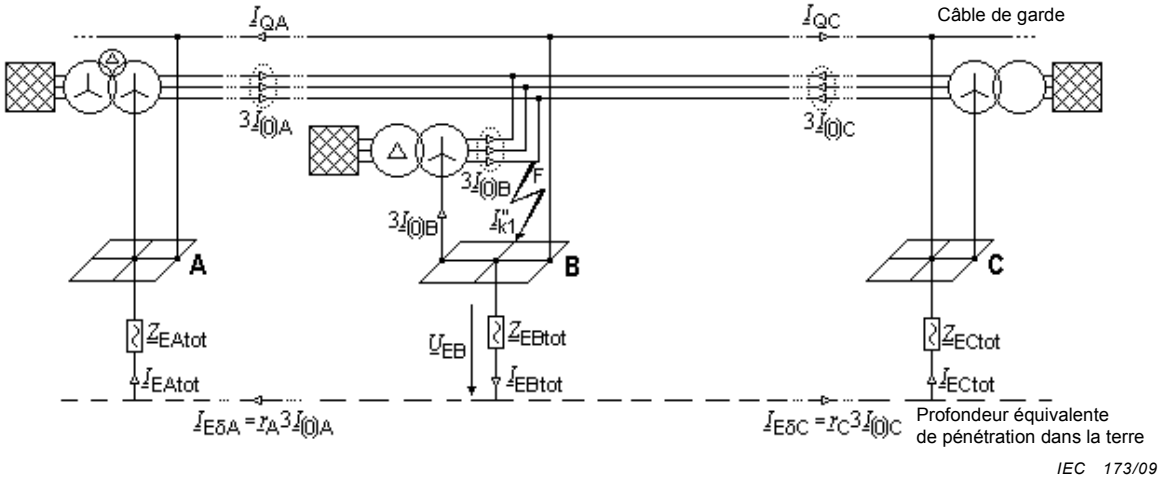


Figure B.1 – Court-circuit monophasé à la terre dans le poste B – Schéma du réseau avec les postes A, B et C

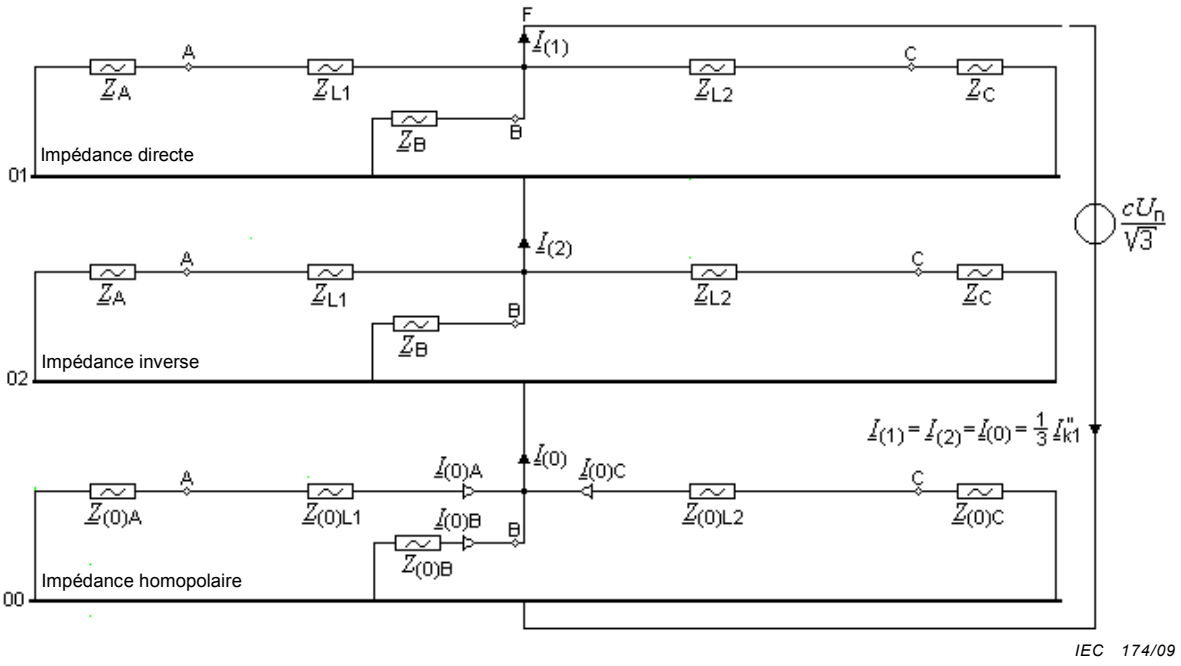


Figure B.2 – Court-circuit monophasé à la terre dans le poste B – Systèmes directs, inverses et homopolaires avec les connexions à l'emplacement F du court-circuit à l'intérieur du poste B

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

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

$$\underline{I}''_{k1} = \frac{\sqrt{3}\cdot 1{,}1\cdot 132\,\text{kV}}{2(0{,}222 + \text{j}4{,}876)\Omega + (0{,}115 + \text{j}6{,}157)\Omega} = (0{,}555 - \text{j}15{,}789)\,\text{kA}\ ;$$

$$I''_{k1} = 15{,}799\,\text{kA}\ ,$$

où

$$\underline{Z}_{(1)} = \frac{1}{\dfrac{1}{\underline{Z}_A + \underline{Z}_{L1}} + \dfrac{1}{\underline{Z}_B} + \dfrac{1}{\underline{Z}_C + \underline{Z}_{L2}}} = (0{,}222 + \text{j}4{,}876)\Omega$$

$$\underline{Z}_{(0)} = \frac{1}{\dfrac{1}{\underline{Z}_{(0)A} + \underline{Z}_{(0)L1}} + \dfrac{1}{\underline{Z}_{(0)B}} + \dfrac{1}{\underline{Z}_{(0)C} + \underline{Z}_{(0)L2}}} = (0{,}115 + \text{j}6{,}157)\Omega$$

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

$$\underline{I}_{(0)} = \frac{1}{3}\underline{I}''_{k1} = (0{,}185 - \text{j}5{,}263)\,\text{kA}$$

Les courants homopolaires partiels indiqués à la Figure B.2 sont les suivants:

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

$$\underline{I}_{(0)B} = (0{,}0763 - \text{j}4{,}6319)\,\text{kA}; \qquad I_{(0)B} = 4{,}633\,\text{kA}$$

$$\underline{I}_{(0)C} = (0{,}0334 - \text{j}0{,}1872)\,\text{kA}; \quad I_{(0)C} = 0{,}190\,\text{kA}$$

Le courant total $\underline{I}_{EBtot}$ qui s'écoule par la terre par $\underline{Z}_{EBtot}$ à l'emplacement du court-circuit au poste B (Figure B.1) est calculé à l'aide de l'Equation (16), si $\underline{r}_A = \underline{r}_C = \underline{r}$:

$$\underline{I}_{EBtot} = \underline{r}\cdot 3(\underline{I}_{(0)A} + \underline{I}_{(0)C}) = 0{,}6\cdot 3(0{,}1088 - \text{j}0{,}6311)\,\text{kA} = (0{,}1958 - \text{j}1{,}1360)\,\text{kA}\ ;$$

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

L'impédance d'entrée pour le calcul de $\underline{Z}_{EBtot}$ est obtenue avec $\underline{Z}_Q = \underline{Z}'_Q d_T$ à partir de l'Equation (1):

$$\underline{Z}_P = 0{,}5(0{,}068 + \text{j}0{,}3204)\Omega + \sqrt{[0{,}5(0{,}068 + \text{j}0{,}3204)]^2 + 10(0{,}068 + \text{j}0{,}3204)}\ \Omega = (1{,}4369 + \text{j}1{,}306)\Omega$$

L'impédance totale de terre $\underline{Z}_{EBtot}$ du poste B avec deux lignes aériennes sortantes est calculée avec l'Equation (17):

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

$$\underline{Z}_{\text{EBtot}} = \frac{1}{\dfrac{1}{5\,\Omega} + \dfrac{2}{(1{,}4369 + \text{j}1{,}306)\Omega}} = (0{,}6845 + \text{j}\,0{,}4928)\Omega$$

Le potentiel de terre du poste B est obtenu avec l'Equation (18):

$$\underline{U}_{\text{EB}} = (0{,}6845 + \text{j}0{,}4928)\Omega\,(0{,}1958 - \text{j}1{,}1360)\text{kA} = (0{,}6938 - \text{j}0{,}6811)\text{kV}\,; \quad U_{\text{EB}} = 0{,}9722\,\text{kV}$$

La distance d'éloignement D_{F} (Equation (19)) est la suivante:

$$D_{\text{F}} = 3\sqrt{R_{\text{T}}}\,\frac{d_{\text{T}}}{\text{Re}\left\{\sqrt{\underline{Z}_{\text{Q}}}\right\}} = 3\sqrt{10\,\Omega}\,\frac{0{,}4\,\text{km}}{\text{Re}\left\{\sqrt{(0{,}068 + \text{j}0{,}3204)\Omega}\right\}} = 8{,}53\,\text{km}$$

Avec une distance supérieure à D_{F}, c'est-à-dire une distance loin des postes, les courants des câbles de garde sont obtenus à partir des relations données dans l'Equation (15).

$$\underline{I}_{\text{QA}} = (1 - \underline{r})3\underline{I}_{(0)\text{A}} = 0{,}4 \cdot 3 \cdot (0{,}0753 - \text{j}0{,}4439)\text{kA} = (0{,}0904 - \text{j}0{,}5327)\text{kA}\,;$$

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

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

$$I_{\text{QC}} = 0{,}288\,\text{kA}$$

Les courants qui s'écoulent par la terre à distance des postes A, B, ainsi que des postes B et C sont les suivants:

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

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

B.4 Court-circuit monophasé à la terre en dehors d'un poste

Le court-circuit monophasé à la terre doit se produire à bonne distance des postes sur un pylône de ligne aérienne T entre B et C comme illustré à la Figure B.3. Les distances $\ell_{2\text{a}} = 60$ km et $\ell_{2\text{b}} = 40$ km.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

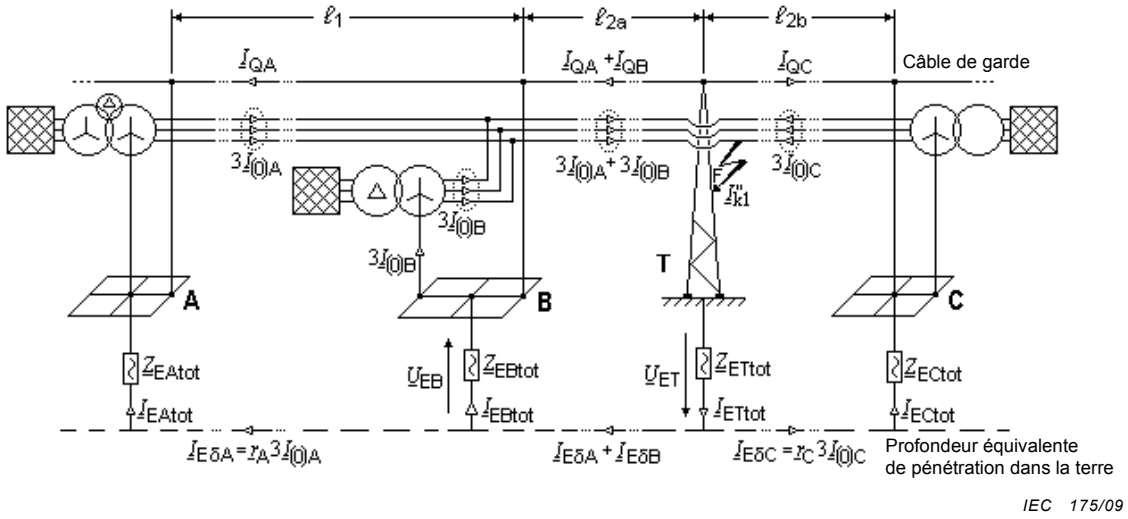


Figure B.3 – Court-circuit monophasé à la terre en dehors des postes B et C, sur le pylône T d'une ligne aérienne – Schéma du réseau avec les postes A, B et C

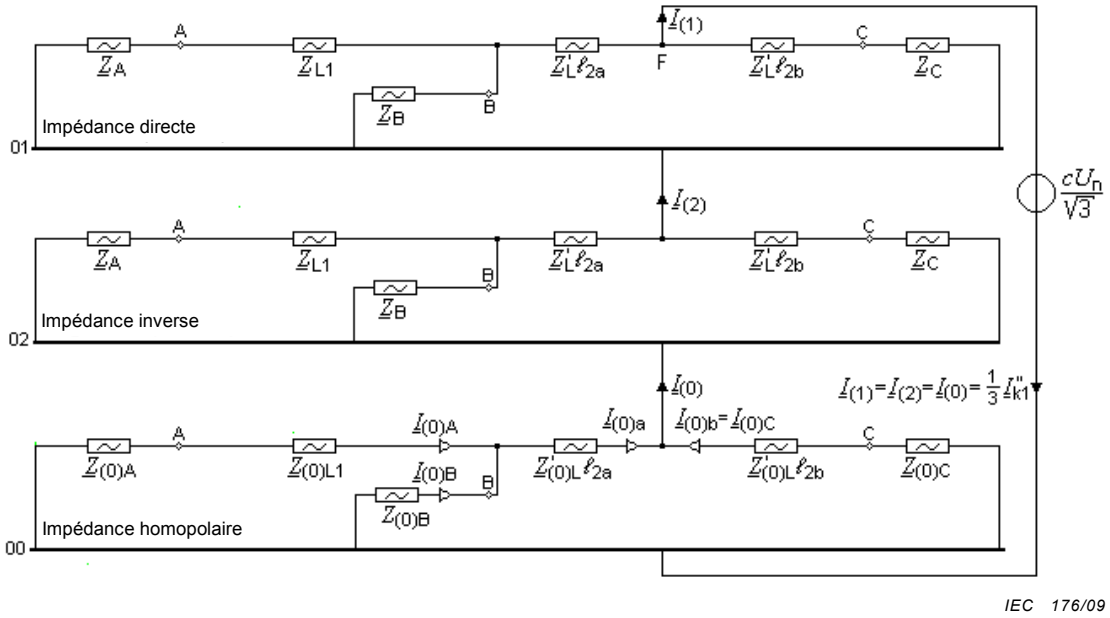


Figure B.4 – Court-circuit monophasé à la terre en dehors des postes B et C sur le pylône T d'une ligne aérienne – Systèmes directs, inverses et homopolaires avec les connexions à l'emplacement F du court-circuit

Le courant de court-circuit monophasé à la terre peut être calculé avec l'Equation (52) de la CEI 60909-0 à l'aide de la Figure B.4.

$$\underline{I}''_{k1} = \frac{\sqrt{3}\cdot 1{,}1\cdot 132\,\text{kV}}{2(1{,}7145+\text{j}13{,}6602)\Omega+(6{,}6262+\text{j}43{,}3324)\Omega} = (0{,}4965-\text{j}3{,}4889)\,\text{kA}$$

où

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

$$\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)} = \frac{1}{\dfrac{1}{\underline{Z}'_{\mathrm{L}}\ell_{2b} + \underline{Z}_{\mathrm{C}}} + \dfrac{1}{\underline{Z}'_{\mathrm{L}}\ell_{2a} + \dfrac{1}{\dfrac{1}{\underline{Z}_{\mathrm{B}}} + \dfrac{1}{\underline{Z}_{\mathrm{L1}} + \underline{Z}_{\mathrm{A}}}}}} = (1{,}7145 + \mathrm{j}13{,}6602)\Omega$$

$$\underline{Z}_{(0)} = \frac{1}{\dfrac{1}{\underline{Z}'_{(0)\mathrm{L}}\ell_{2b} + \underline{Z}_{(0)\mathrm{C}}} + \dfrac{1}{\underline{Z}'_{(0)\mathrm{L}}\ell_{2a} + \dfrac{1}{\dfrac{1}{\underline{Z}_{(0)\mathrm{B}}} + \dfrac{1}{\underline{Z}_{(0)\mathrm{L1}} + \underline{Z}_{(0)\mathrm{A}}}}}} = (6{,}6262 + \mathrm{j}43{,}3324)\Omega$$

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

$$\underline{I}_{(0)} = \frac{1}{3}\underline{I}''_{\mathrm{k1}} = (0{,}1655 - \mathrm{j}1{,}1630)\mathrm{kA}$$

Les courants homopolaires partiels $\underline{I}_{(0)\mathrm{a}}$ et $\underline{I}_{(0)\mathrm{b}}$ à gauche et à droite du pylône T à la Figure B.4 sont obtenus comme suit:

$$\underline{I}_{(0)\mathrm{a}} = \underline{I}_{(0)} \frac{\underline{Z}'_{(0)\mathrm{L}}\ell_{2b} + \underline{Z}_{(0)\mathrm{C}}}{\underline{Z}'_{(0)\mathrm{L}}\ell_{2b} + \underline{Z}_{(0)\mathrm{C}} + \underline{Z}'_{(0)\mathrm{L}}\ell_{2a} + \dfrac{1}{\dfrac{1}{\underline{Z}_{(0)\mathrm{B}}} + \dfrac{1}{\underline{Z}_{(0)\mathrm{L1}} + \underline{Z}_{(0)\mathrm{A}}}}} = (0{,}0851 - \mathrm{j}0{,}5263)\mathrm{kA}$$

$$\underline{I}_{(0)\mathrm{b}} = \underline{I}_{(0)} - \underline{I}_{(0)\mathrm{a}} = (0{,}0804 - \mathrm{j}0{,}6367)\mathrm{kA} = \underline{I}_{(0)\mathrm{C}}; \quad I_{(0)\mathrm{C}} = 0{,}6417\,\mathrm{kA}$$

Les courants homopolaires partiels $\underline{I}_{(0)\mathrm{A}}$ et $\underline{I}_{(0)\mathrm{B}}$ sont obtenus à partir de $\underline{I}_{(0)\mathrm{a}}$:

$$\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} = \underline{I}_{(0)\mathrm{a}} \frac{\underline{Z}_{(0)\mathrm{B}}}{\underline{Z}_{(0)\mathrm{A}} + \underline{Z}_{(0)\mathrm{B}} + \underline{Z}_{(0)\mathrm{L1}}} = (0{,}0139 - \mathrm{j}0{,}0452)\mathrm{kA};$$

$$I_{(0)\mathrm{A}} = 0{,}0473\,\mathrm{kA}$$

$$\underline{I}_{(0)\mathrm{B}} = \underline{I}_{(0)\mathrm{a}} \frac{\underline{Z}_{(0)\mathrm{A}} + \underline{Z}_{(0)\mathrm{L1}}}{\underline{Z}_{(0)\mathrm{A}} + \underline{Z}_{(0)\mathrm{B}} + \underline{Z}_{(0)\mathrm{L1}}} = (0{,}0712 - \mathrm{j}0{,}4811)\mathrm{kA};$$

$$I_{(0)\mathrm{B}} = 0{,}4864\,\mathrm{kA}$$

Le courant total à la terre sur le pylône en court-circuit illustré à la Figure B.3 est calculé avec l'Equation (22):

$$\underline{I}_{\mathrm{ETtot}} = \underline{r}\,\underline{I}''_{\mathrm{k1}} = 0{,}6 \cdot (0{,}4965 - \mathrm{j}3{,}4889)\mathrm{kA} = (0{,}2979 - \mathrm{j}2{,}0933)\mathrm{kA}; \quad I_{\mathrm{ETtot}} = 2{,}114\,\mathrm{kA}$$

Avec l'impédance d'entrée comme calculée à l'Article B.3 et la résistance de pied de pylône R_{T}, l'impédance totale de terre $\underline{Z}_{\mathrm{ETtot}}$ est obtenue conformément à l'Equation (23):

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

$$\underline{Z}_{\mathrm{ETtot}} = \frac{1}{\frac{1}{10\,\Omega} + \frac{2}{(1{,}437 + \mathrm{j}1{,}306)\Omega}} = (0{,}7048 + \mathrm{j}0{,}5663)\Omega\,;$$

$$\underline{Z}_{\mathrm{ETtot}} = 0{,}9041\Omega$$

Le potentiel de terre au pylône est calculé avec l'Equation (24):

$$\underline{U}_{\mathrm{ET}} = \underline{Z}_{\mathrm{ETtot}}\,\underline{I}_{\mathrm{ETtot}} = (0{,}7048 + \mathrm{j}0{,}5653)\Omega \cdot (0{,}2979 - \mathrm{j}2{,}0933)\mathrm{kA} = (1{,}3954 - \mathrm{j}1{,}3067)\mathrm{kV}\,;$$

$$U_{\mathrm{ET}} = 1{,}912\mathrm{kV}$$

Les courants aux postes A, B et C sont les suivants:

$$\underline{I}_{\mathrm{EAtot}} = \underline{r}3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} = 0{,}6 \cdot 3 \cdot 0{,}0473\mathrm{kA} = 0{,}0851\mathrm{kA}$$

$$\underline{I}_{\mathrm{EBtot}} = \underline{r}3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}} = 0{,}6 \cdot 3 \cdot 0{,}4864\mathrm{kA} = 0{,}8754\mathrm{kA}$$

$$\underline{I}_{\mathrm{ECtot}} = \underline{r}3\underline{I}_{(0)\mathrm{C}} = 0{,}6 \cdot 3 \cdot 0{,}6417\mathrm{kA} = 1{,}1551\mathrm{kA}$$

Le potentiel de terre du poste B est obtenu, par exemple comme suit:

$$\underline{U}_{\mathrm{EB}} = \underline{Z}_{\mathrm{EBtot}} \cdot \underline{r} \cdot 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}} = (0{,}6845 + \mathrm{j}0{,}4928)\Omega \cdot 0{,}6 \cdot 3 \cdot (0{,}0712 - \mathrm{j}0{,}4811)\mathrm{kA} = (0{,}5145 - \mathrm{j}0{,}5296)\mathrm{kV}$$

$$U_{\mathrm{EB}} = 0{,}7383\mathrm{kV}$$

Les courants s'écoulant dans les câbles de garde et par la terre à une plus grande distance des postes et du pylône en court-circuit (Figure B.3) sont les suivants:

$$\underline{I}_{\mathrm{QA}} = (1 - \underline{r})3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} = 0{,}4 \cdot 3 \cdot (0{,}0139 - \mathrm{j}0{,}0452)\mathrm{kA} = (0{,}0167 - \mathrm{j}0{,}0542)\mathrm{kA}\,;$$

$$I_{\mathrm{QA}} = 0{,}0567\mathrm{kA}$$

$$\underline{I}_{\mathrm{QA}} + \underline{I}_{\mathrm{QB}} = (1 - \underline{r})3(\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} + \underline{I}_{(0)\mathrm{B}}) = 0{,}4 \cdot 3 \cdot (0{,}0851 - \mathrm{j}0{,}5263)\mathrm{kA} = (0{,}1021 - \mathrm{j}0{,}6316)\mathrm{kA}\,;$$

$$\left|\underline{I}_{\mathrm{QA}} + \underline{I}_{\mathrm{QB}}\right| = 0{,}6397\mathrm{kA}\,;$$

$$\underline{I}_{\mathrm{QC}} = (1 - \underline{r})3\underline{I}_{(0)\mathrm{C}} = 0{,}4 \cdot 3 \cdot (0{,}0804 - \mathrm{j}0{,}6367)\mathrm{kA} = (0{,}0965 - \mathrm{j}0{,}7640)\mathrm{kA}\,;$$

$$I_{\mathrm{QC}} = 0{,}7701\mathrm{kA}$$

$$I_{\mathrm{E}\delta\mathrm{A}} = r3I_{(0)\mathrm{A}} = 0{,}6 \cdot 3 \cdot 0{,}0473\mathrm{kA} = 0{,}0851\mathrm{kA}$$

$$I_{\mathrm{E}\delta\mathrm{A}} + I_{\mathrm{E}\delta\mathrm{B}} = r3\left|\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} + \underline{I}_{(0)\mathrm{B}}\right| = 0{,}6 \cdot 3 \cdot 0{,}5331\mathrm{kA} = 0{,}9596\mathrm{kA}$$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

$$I_{E\delta C} = r3I_{(0)C} = 0{,}6 \cdot 3 \cdot 0{,}6417\,\text{kA} = 1{,}1551\text{kA}$$

B.5 Court-circuit monophasé à la terre au voisinage d'un poste

A titre d'exemple, le courant de court-circuit monophasé à la terre et les potentiels de terre doivent être calculés, si le court-circuit se produit sur le pylône T de numéro n = 10 de la ligne aérienne entre les postes B et C à une distance de 4,4 km du poste B (voir la Figure 7).

Le courant de court-circuit monophasé à la terre est calculé conformément à l'Equation (52) de la CEI 60909-0 à l'aide de la Figure B.4 avec des modifications des longueurs de la ligne.

$$\underline{I}''_{k1} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1{,}1 \cdot 132\,\text{kV}}{2(0{,}4449 + \text{j}5{,}9037)\Omega + (1{,}2412 + \text{j}11{,}9481)\Omega} = (0{,}9421 - \text{j}10{,}5022)\text{kA}$$

$$I''_{k1} = 10{,}5444\,\text{kA}$$

;

où

$$\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)} = \frac{1}{\dfrac{1}{\underline{Z}'_L(\ell_2 - 11 \cdot d_T) + \underline{Z}_C} + \dfrac{1}{\underline{Z}'_L \cdot 11 \cdot d_T + \dfrac{1}{\dfrac{1}{\underline{Z}_B} + \dfrac{1}{\underline{Z}_{L1} + \underline{Z}_A}}}} = (0{,}4449 + \text{j}5{,}9037)\Omega$$

$$\underline{Z}_{(0)} = \frac{1}{\dfrac{1}{\underline{Z}'_{(0)L}(\ell_2 - 11 \cdot d_T) + \underline{Z}_{(0)C}} + \dfrac{1}{\underline{Z}'_{(0)L} \cdot 11 \cdot d_T + \dfrac{1}{\dfrac{1}{\underline{Z}_{(0)B}} + \dfrac{1}{\underline{Z}_{(0)L1} + \underline{Z}_{(0)A}}}}} = (1{,}2412 + \text{j}11{,}9481)\Omega$$

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

$$\underline{I}_{(0)} = \frac{1}{3}\underline{I}''_{k1} = (0{,}3141 - \text{j}3{,}5007)\text{kA}$$

Les courants homopolaires partiels $\underline{I}_{(0)a}$ et $\underline{I}_{(0)b}$ à gauche et à droite du pylône T (n=10) sont obtenus comme suit:

$$\underline{I}_{(0)a} = \underline{I}_{(0)} \frac{\underline{Z}'_{(0)L}(\ell_2 - 11 \cdot d_T) + \underline{Z}_{(0)C}}{\underline{Z}'_{(0)L}(\ell_2 - 11 \cdot d_T) + \underline{Z}_{(0)C} + \underline{Z}'_{(0)L} \cdot 11 \cdot d_T + \dfrac{1}{\dfrac{1}{\underline{Z}_{(0)B}} + \dfrac{1}{\underline{Z}_{(0)L1} + \underline{Z}_{(0)A}}}} = (0{,}2767 - \text{j}3{,}2458)\text{kA}$$

$$\underline{I}_{(0)b} = \underline{I}_{(0)} - \underline{I}_{(0)a} = (0{,}03731 - \text{j}0{,}2549)\text{kA} = \underline{I}_{(0)C}; \quad I_{(0)C} = 0{,}2577\,\text{kA}$$

Les courants homopolaires partiels $\underline{I}_{(0)A}$ et $\underline{I}_{(0)B}$ sont obtenus à partir de $\underline{I}_{(0)a}$:

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

$$\underline{I}_{(0)A} = \underline{I}_{(0)a} \frac{\underline{Z}_{(0)B}}{\underline{Z}_{(0)A} + \underline{Z}_{(0)B} + \underline{Z}_{(0)L1}} = (0{,}0640 - j0{,}2817)\,kA\,;$$

$$I_{(0)A} = 0{,}2888\,kA$$

$$\underline{I}_{(0)B} = \underline{I}_{(0)a} \frac{\underline{Z}_{(0)A} + \underline{Z}_{(0)L1}}{\underline{Z}_{(0)A} + \underline{Z}_{(0)B} + \underline{Z}_{(0)L1}} = (0{,}2128 - j2{,}9642)\,kA\,;$$

$$I_{(0)B} = 2{,}9718\,kA$$

Le facteur $\underline{k}$ peut être calculé à partir de l'Equation (3):

$$\underline{k} = 1 + \frac{\underline{Z}_P}{R_T} = 1 + \frac{(1{,}4369 + j1{,}3060)\,\Omega}{10\,\Omega} = (1{,}1437 + j0{,}1306)$$

L'impédance de terre du poste B dans ce cas est calculée avec l'Equation (29):

$$\underline{Z}_{EB} = \frac{1}{\frac{1}{R_B} + \frac{1}{\underline{Z}_P}} = \frac{1}{\frac{1}{5\,\Omega} + \frac{1}{(1{,}4370 + j1{,}3060)\,\Omega}} = (1{,}2698 + j0{,}7568)\,\Omega$$

L'impédance d'entrée de la chaîne finie pour n = 10 est obtenue à partir de l'Equation (2):

$$\underline{Z}_{P10} = (1{,}4294 + j1{,}3200)\,\Omega\,; \quad Z_{P10} = 1{,}9457\,\Omega$$

L'impédance de terre pour le pylône en court-circuit doit être calculée avec l'Equation (28):

$$\underline{Z}_{ET} = \frac{1}{\frac{1}{R_T} + \frac{1}{\underline{Z}_P}} = \frac{1}{\frac{1}{10\,\Omega} + \frac{1}{(1{,}4370 + j1{,}3060)\,\Omega}} = (1{,}3690 + j0{,}9856)\,\Omega$$

Le courant $\underline{I}_{ET10}$ s'écoulant par $\underline{Z}_{ET}$, au pylône n = 10 est obtenu avec l'Equation (27):

$$\underline{I}_{ET10} = \underline{r}\underline{I}''_{k1} \frac{\underline{Z}_{P10}}{\underline{Z}_{P10} + \underline{Z}_{ET}} - \underline{r}3\underline{I}_{(0)B} \frac{\underline{Z}_{EB}}{\underline{Z}_{EB} + \underline{Z}_P} \cdot \frac{1}{\underline{k}^{10}} = 0{,}6\,(0{,}9421 - j10{,}5022)\,kA \frac{(1{,}4294 + j1{,}3200)\,\Omega}{(2{,}798 + j2{,}306)\,\Omega}$$

$$- 0{,}6 \cdot 3 \cdot (0{,}2128 - j2{,}9642)\,kA \frac{(1{,}2697 + j0{,}7568)\,\Omega}{(2{,}7067 + j2{,}0628)\,\Omega} \cdot \frac{1}{(1{,}1437 + j0{,}1306)^{10}} = (1{,}0194 - j3{,}1417)\,kA$$

$$I_{ET10} = 3{,}3029\,kA$$

Le potentiel de terre au pylône en court-circuit est donné conformément à l'Equation (30):

$$\underline{U}_{ET10} = \underline{Z}_{ET}\,\underline{I}_{ET10} = (4{,}4918 - j3{,}2961)\,kV\,;$$

$$U_{ET10} = 5{,}5714\,kV$$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Le courant s'écoulant dans $\underline{Z}_{EB}$ dans le cas d'un court-circuit monophasé à la terre sur le pylône (n=10) au voisinage du poste B est obtenu par l'Equation (31):

$$\underline{I}_{EB10} = \underline{r}\underline{I}''_{k1}\frac{\underline{Z}_{ET}}{\underline{Z}_{ET}+Z_{P10}}\cdot\frac{2\underline{Z}_P - \underline{Z}_Q}{(\underline{Z}_{EB}+\underline{Z}_P)\underline{k}^{10}-(\underline{Z}_{EB}-\underline{Z}_P+\underline{Z}_Q)\underline{k}^{-10}} - \underline{r}\,3\,\underline{I}_{(0)B}\frac{\underline{Z}_P}{\underline{Z}_{EB}+\underline{Z}_P}$$

$$= 0{,}6\,(0{,}9421 - \mathrm{j}10{,}5022)\,\mathrm{kA}\,\frac{(1{,}3690 + \mathrm{j}0{,}9856)\,\Omega}{(2{,}7984+\mathrm{j}2{,}3056)\,\Omega}\,(0{,}1185-\mathrm{j}0{,}2323)$$

$$-0{,}6\cdot 3\cdot(0{,}2128-\mathrm{j}2{,}9642)\,\mathrm{kA}\,\frac{(1{,}4370+\mathrm{j}1{,}3060)\,\Omega}{(2{,}7067+\mathrm{j}2{,}0628)\,\Omega} = (1{,}1557-\mathrm{j}2{,}6487)\,\mathrm{kA};$$

$$I_{EB10} = 2{,}8899\,\mathrm{kA}$$

Le potentiel de terre du poste B est calculé avec l'Equation (32):

$$\underline{U}_{EB10} = \underline{Z}_{EB}\,\underline{I}_{EB10} = (-3{,}4720 + \mathrm{j}2{,}4884)\,\mathrm{kV};$$

$$U_{EB10} = 4{,}272\,\mathrm{kV}$$

La Figure B.5 montre les potentiels de terre U_{ETn} liés à $U_{ET} = 1{,}912\,\mathrm{kV}$ défini à l'Article B.4, et U_{EBn} liés au potentiel de terre $U_{EB} = 0{,}972\,\mathrm{kV}$ défini à l'Article B.3.

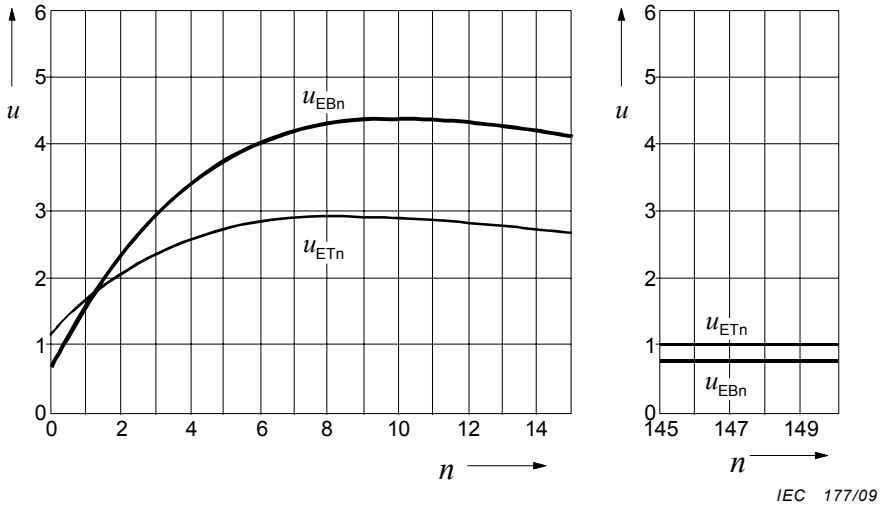


Figure B.5 – Potentiels de terre $u_{ETn} = U_{Etn}/U_{ET}$ avec U_{ET} = 1,912 kV et $u_{EBn} = U_{Ebn}/U_{EB}$ avec U_{EB} = 0,972 kV, si le court-circuit monophasé à la terre se produit sur les pylônes n = 1, 2, 3, ... au voisinage du poste B

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Annexe C
(informative)

Exemple de calcul du facteur de réduction r_1 et de la répartition du courant par la terre dans le cas d'un câble à trois conducteurs

C.1 Aperçu

Une connexion de câble de 10 kV entre les postes A et B est réalisée par l'intermédiaire d'un câble à trois conducteurs avec un écran en cuivre mis à la terre à chaque extrémité dans un réseau de 10 kV avec mise à la terre directe (le nœud de répartition d'un transformateur d'alimentation est mis à la terre coté moyenne tension).

C.2 Court-circuit monophasé à la terre à l'extrémité du câble

C.2.1 Données

Câble: 6/10 kV NA2XS2Y 3×150/25

Conducteurs en aluminium: q_L = 150 mm^2; r_L = 6,91 mm; $R'_L = 0{,}206\,\Omega/\text{km}$;

Ecran en cuivre: qs = 25 mm^2; r_S = 23,6 mm; $R'_S = 0{,}714\,\Omega/\text{km}$;

Distance entre les conducteurs du câble d = 22,38 mm;

Diamètre extérieur du câble $D_a = 53$ mm

Impédances de mise à la terre: Z_{EA} = 0,5 Ω; Z_{EB} = 0,5 Ω;

Résistivité du sol: $\rho = 100\ \Omega\text{m}$

C.2.2 Impédance linéique des câbles

Les Equations (30) et (32) données dans la CEI/TR 60909-2 permettent d'obtenir les résultats suivants.

Impédance linéique directe:

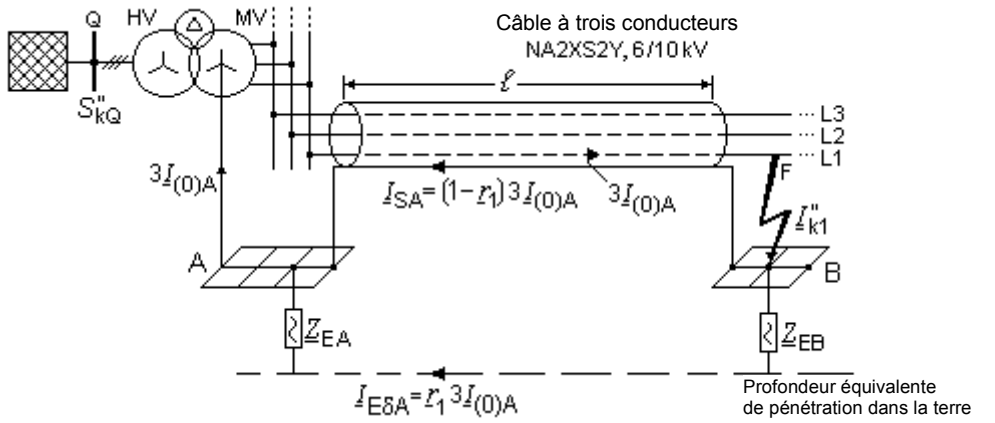
$$\underline{Z}'_{(1)L} = R'_L + \mathrm{j}\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\left(\frac{1}{4} + \ln\frac{d}{r_L}\right) = (0{,}206 + \mathrm{j}0{,}0896)\,\Omega/\text{km}$$

Impédance linéique homopolaire dans le cas d'un retour du courant par l'écran (S) et la terre (E):

$$\underline{Z}'_{(0)LSE} = R'_L + 3\omega\frac{\mu_0}{8} + \mathrm{j}\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\left(\frac{1}{4} + 3\ln\frac{\delta}{\sqrt[3]{r_L d^2}}\right) - \frac{3\left(\omega\frac{\mu_0}{8} + \mathrm{j}\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\ln\frac{\delta}{r_S}\right)^2}{R'_S + \omega\frac{\mu_0}{8} + \mathrm{j}\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\ln\frac{\delta}{r_S}} = (1{,}209 + \mathrm{j}1{,}092)\frac{\Omega}{\text{km}}$$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

C.2.3 Courants de court-circuit



Alimentation du réseau: $S''_{kQ} = 3000\,\text{MVA}$; U_{nQ} = 110 kV; R_Q/X_Q = 0,1:

Transformateur: S_{rT} = 31,5 MVA; U_{rTHV} = 115 kV; U_{rTLV} = 10,5 kV; u_{kr} = 12%; u_{Rr} = 1%; $\underline{Z}_{(0)T} = 1{,}6 \cdot \underline{Z}_{(1)T}$.

Figure C.1 – Exemple de calcul du facteur de réduction des câbles et de la répartition du courant par la terre dans un réseau de 10 kV, U_n = 10 kV; c =1,1; f = 50 Hz

Selon 6.1, le calcul des courants de court-circuit avec la connexion à la terre ne tient pas compte des impédances $\underline{Z}_{EA}$ et $\underline{Z}_{EB}$.

Courants de court-circuit:

$$\underline{I}''_k = \underline{I}''_{k3} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}(\underline{Z}_{Qt} + \underline{Z}_{TLV} + \underline{Z}'_{(1)L}\ell)};$$

$$\underline{I}''_k(\ell = 0) = (1{,}186 + \text{j}13{,}844)\,\text{kA}$$

Retour du courant de court-circuit monophasé à la terre par l'écran et la terre

$$\underline{I}''_{k1SE} = \frac{\sqrt{3}cU_n}{2 \cdot \underline{Z}_{Qt} + 2 \cdot \underline{Z}_{TLV} + \underline{Z}_{(0)TLV} + (2 \cdot \underline{Z}'_{(1)L} + \underline{Z}'_{(0)LSE}) \cdot \ell}$$

$$\underline{I}''_{k1SE}(\ell = 0) = (1{,}015 - \text{j}11{,}968)\,\text{kA}$$

C.2.4 Facteur de réduction, courant s'écoulant dans l'écran et courant s'écoulant par la terre

Le courant s'écoulant dans l'écran est calculé avec l'Equation (40):

$$\underline{I}_{SA} = (1 - \underline{r}_1)\, 3\underline{I}_{(0)A} = (1 - \underline{r}_1)\, \underline{I}''_{k1SE}$$

Le courant de court-circuit partiel s'écoulant par la terre est obtenu avec l'Equation (41):

$$\underline{I}_{E\delta A} = \underline{r}_1 3\underline{I}_{(0)A} = \underline{r}_1 \underline{I}''_{k1SE}$$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Facteur de réduction $\underline{r}_1$ obtenu avec l'Equation (37):

$$\underline{r}_1 = \frac{R'_S}{R'_S + \omega\frac{\mu_0}{8} + \mathrm{j}\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\ln\frac{\delta}{r_S}} = \frac{0{,}714\,\frac{\Omega}{\mathrm{km}}}{\left(0{,}714 + 0{,}04935 + \mathrm{j}\cdot 0{,}06283\cdot\ln\frac{931\mathrm{m}}{23{,}6\cdot 10^{-3}\mathrm{m}}\right)\frac{\Omega}{\mathrm{km}}}$$

$$\underline{r}_1 = 0{,}5318 - \mathrm{j}0{,}4633\ ;$$

$$r_1 = 0{,}7053$$

La Figure C.2 présente les courants de court-circuit calculés, le courant s'écoulant dans l'écran et le courant s'écoulant par la terre, selon la longueur $\ell \geq 1\,\mathrm{km}$ du câble entre les postes A e B.

La tension de mise à la terre au poste A, avec $\ell = 5\mathrm{km}$ et $I_{\mathrm{E}\delta\mathrm{A}} = 1{,}175\mathrm{kA}$ (voir Tableau C.1), est la suivante:

$$U_{\mathrm{EA}} = Z_{\mathrm{EA}} I_{\mathrm{E}\delta\mathrm{A}} = 0{,}5\,\Omega\cdot 1{,}175\mathrm{kA} = 588\,\mathrm{V}$$

Tableau C.1 – Résultats pour l'exemple illustré à la Figure C.1

ℓ	$\underline{I}''_{\mathrm{k1SE}}$	I''_{k1SE}	$\underline{I}_{\mathrm{SA}}$	I_{SA}	$\underline{I}_{\mathrm{E}\delta\mathrm{A}}$	$I_{\mathrm{E}\delta\mathrm{A}}$
km	kA	kA	kA	kA	kA	kA
1	2,983 –j4,846	5,690	3,641 –j0,887	3,748	–0,659 –j3,959	4,014
5	1,200 –j1,156	1,666	1,097 +j0,015	1,097	0,103 –j1,170	1,175
10	0,661 –j0,578	0,878	0,577 +j0,036	0,578	0,084 –j0,613	0,619

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

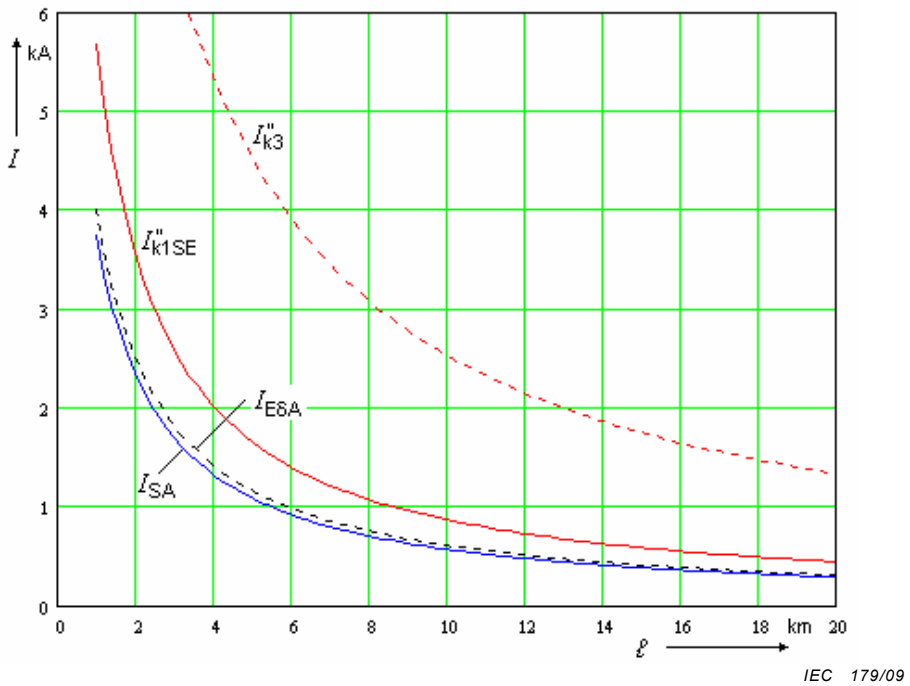


Figure C.2 – Courants de court-circuit et courants de court-circuit partiels s'écoulant par la terre, pour l'exemple illustré à la Figure C.1

C.3 Court-circuit monophasé à la terre sur le câble entre les postes A et B

C.3.1 Configuration et données

La configuration est illustrée à la Figure C.3.

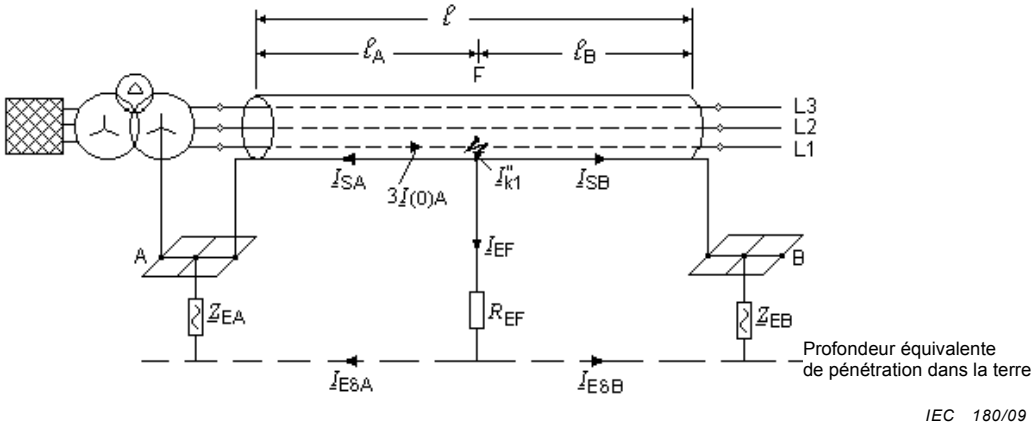


Figure C.3 – Exemple de calcul de la répartition du courant dans un réseau de 10 kV avec un court-circuit sur le câble entre A et B (données fournies en C.2.1 et à la Figure C.1)

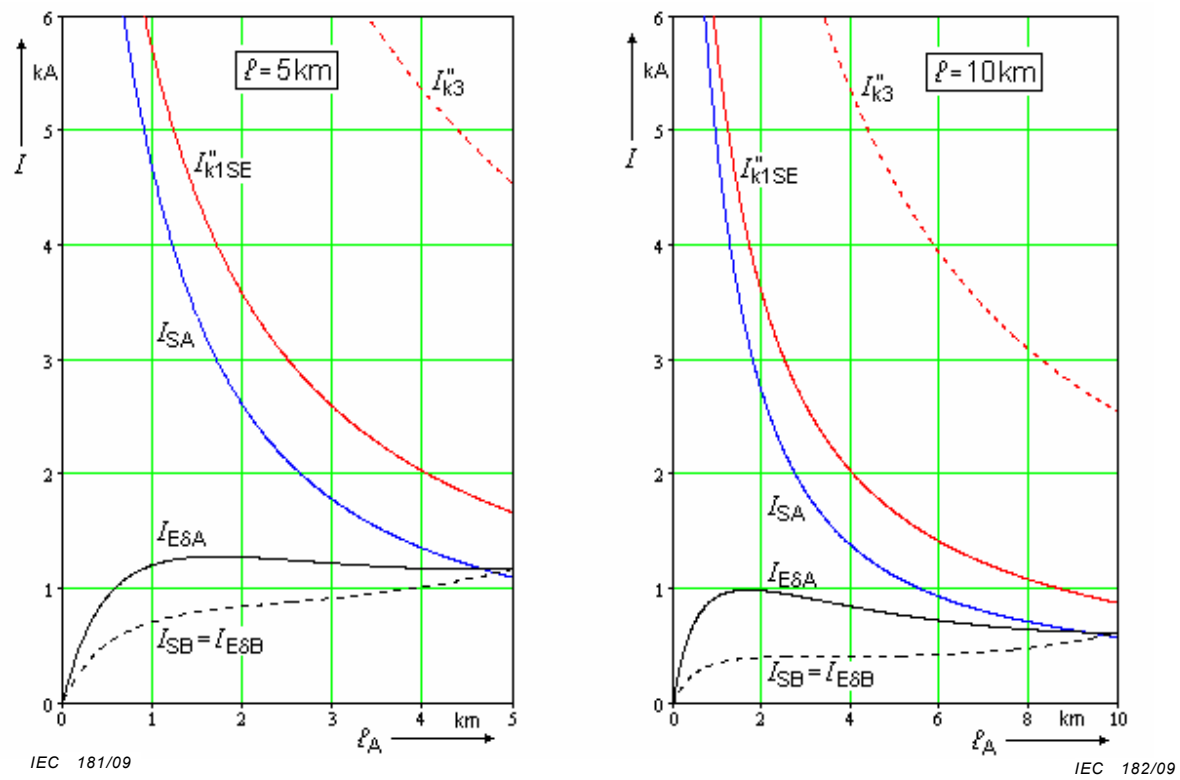
L'alimentation du court-circuit monophasé à la terre illustré à la Figure C.3 s'effectue à partir du seul poste A. Il est prévu que le court-circuit monophasé à la terre se produise avec la connexion à la terre à l'emplacement F du court-circuit ayant $R_{EF} = 5\Omega$ (voir 8.2.2.2).

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

C.3.2 Résultats de calcul

Le facteur de réduction $\underline{r}_1 = 0{,}5318 - \mathrm{j}0{,}4633$ est déjà calculé à l'aide de l'Equation (37).

Les courants $\underline{I}_{SA}$ et $\underline{I}_{E\delta A}$ du côté gauche de l'emplacement du court-circuit sont calculés à l'aide des Equations (42) et (45) et les courants du côté droit de l'emplacement du court-circuit sont calculés à l'aide des Equations (43) et (46). Dans le cas où $3\underline{I}_{(0)B} = 0$ conformément à la Figure C.3, la relation suivante est valable: $\underline{I}_{E\delta B} = -\underline{I}_{SB}$.



a) Longueur de câble ℓ = 5 km **b) Longueur de câble ℓ =10 km**

Figure C.4 – Courants de court-circuit monophasés à la terre, courants partiels s'écoulant dans l'écran et courants partiels s'écoulant par la terre

Tableau C.2 – Résultats pour l'exemple illustré à la Figure C.3, $\ell = 5$km

ℓ_A	I''_{k1SE}	$\underline{I}_{SA}$	I_{SA}	$\underline{I}_{SB} = -\underline{I}_{E\delta B}$	I_{SB}	$\underline{I}_{E\delta A}$	$I_{E\delta A}$
km	kA	kA	kA	kA	kA	kA	kA
0	12,000	1,016 –j11,967	12,000	0	0	0	0
1	5,090	2,911 –j3,640	4,661	–0,183 –j0,688	0,712	0,072 –j1,206	1,208
2,5	3,006	1,858 –j1,011	2,115	–0,188 –j0,874	0,882	0,128 –j1,246	1,253
5	1,666	1,097 + j0,015	1,097	0,103 –j1,170	1,175	0,103 –j1,170	1,175

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Tableau C.3 – Résultats pour l'exemple illustré à la Figure C.3, $\ell = 10$ km

ℓ_A	I''_{k1SE}	$\underline{I}_{SA}$	I_{SA}	$\underline{I}_{SB} = -\underline{I}_{E\delta B}$	I_{SB}	$\underline{I}_{E\delta A}$	$I_{E\delta A}$
km	kA	kA	kA	kA	kA	kA	kA
0	12,000	1,016 –j11,967	12,000	0	0	0	0
1	5,690	2,800 –j3,931	4,826	–0,094 –j0,338	0,351	0,183 –j0,915	0,933
2,5	3,006	1,750 –j1,330	2,198	–0,075 –j0,309	0,405	0,236 –j0,928	0,957
5	1,666	1,036 –j0,394	1,108	–0,061 –j0,409	0,413	0,164 –j0,762	0,779
10	0,878	0,577 –j0,036	0,578	0,084 –j0,613	0,619	0,084 –j0,613	0,619

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Annexe D
(informative)

Exemple de calcul du facteur de réduction r_3 et de la répartition du courant par la terre dans le cas de trois câbles monoconducteurs

D.1 Aperçu

Une connexion de câble de 110 kV entre les postes A et B est réalisée avec trois câbles monoconducteurs avec une gaine de plomb mise à la terre à chaque extrémité dans un réseau de 110 kV avec une mise à la terre directe du neutre.

D.2 Court-circuit monophasé à la terre à l'extrémité du câble

D.2.1 Données

Câbles monoconducteurs 64/110 kV, 2XK2Y: 3×1×630 rm, Cu, dans une configuration triangulaire.

Conducteurs en cuivre: q_L = 630 mm^2; r_L = 15,6 mm; $R_L^{'} = 0{,}0283\,\Omega/\text{km}$;

Gaine de plomb: q_S = 550 mm^2; $r_S = r_{Sm}$ = 39,8 mm; $R_S^{'} = 0{,}379\,\Omega/\text{km}$;

Diamètre extérieur du câble D_a =85 mm;

Distance entre les conducteurs du câble d =1,06·D_a = 90,1 mm;

Résistivité du sol: $\rho = 100\ \Omega\text{m}$

D.2.2 Impédances linéiques des câbles

Impédance linéique directe (CEI 60909-2, Equation (15)):

$$\underline{Z}_{(1)LS}^{'} = R_L^{'} + j\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\left(\frac{1}{4} + \ln\frac{d}{r_L}\right) + \frac{\left(\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\ln\frac{d}{r_{Sm}}\right)^2}{R_S^{'} + j\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\ln\frac{d}{r_{Sm}}} = (0{,}0351 + j0{,}125)\,\Omega/\text{km}$$

NOTE 1 Lorsqu'il s'agit de veiller aux courants s'écoulant dans les gaines au cours d'un équilibrage (absence de liaison croisée), la partie réelle de $\underline{Z}_{(1)LS}^{'}$ est supérieure à la partie réelle de $\underline{Z}_{(1)L}^{'}$, en raison des pertes qui se produisent dans les gaines, voir CEI/TR 60909-2, Tableau 5.

Impédance linéique homopolaire dans le cas d'un retour du courant par les gaines uniquement:

$$\underline{Z}_{(0)LS}^{'} = R_L^{'} + R_S^{'} + j\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\left(\frac{1}{4} + \ln\frac{r_S}{r_L}\right) = (0{,}4073 + j0{,}0746)\,\Omega/\text{km}$$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Impédance linéique homopolaire dans le cas d'un retour du courant par les gaines et la terre (CEI 60909-2, Equation (16)):

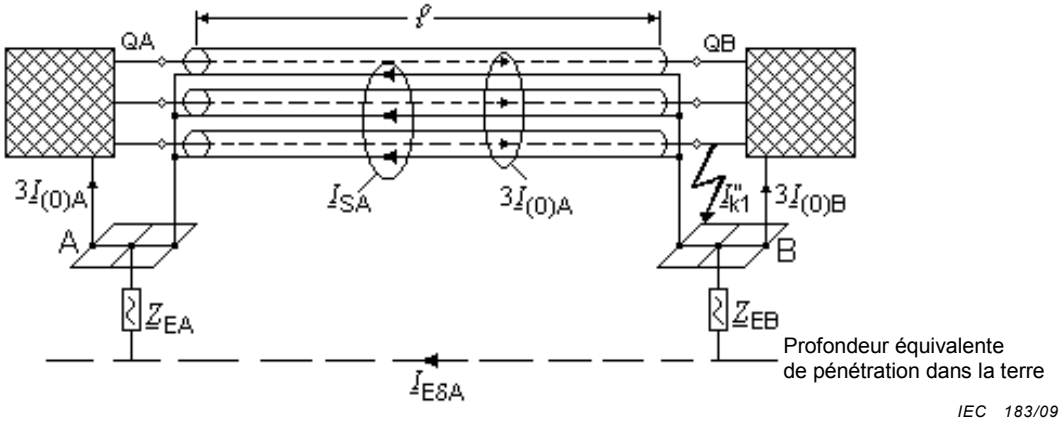
$$\underline{Z}'_{(0)\mathrm{LSE}} = R'_{\mathrm{L}} + 3\omega\frac{\mu_0}{8} + \mathrm{j}\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\left(\frac{1}{4} + 3\ln\frac{\delta}{\sqrt[3]{r_{\mathrm{L}}d^2}}\right) - \frac{\left(3\omega\frac{\mu_0}{8} + \mathrm{j}3\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\ln\frac{\delta}{\sqrt[3]{r_{\mathrm{L}}d^2}}\right)^2}{R'_{\mathrm{S}} + 3\omega\frac{\mu_0}{8} + \mathrm{j}3\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\ln\frac{\delta}{\sqrt[3]{r_{\mathrm{L}}d^2}}} = (0{,}3856 + \mathrm{j}0{,}1483)\,\Omega/\mathrm{km}$$

NOTE 2 L'impédance homopolaire $Z'_{(0)\mathrm{LS}} = 0{,}4141\,\Omega/\mathrm{km}$ dans le cas d'un retour du courant par les gaines diffère uniquement de quelque 0,2% par rapport à $Z'_{(0)\mathrm{LSE}} = 0{,}4131\,\Omega/\mathrm{km}$.

D.2.3 Courants de court-circuit

La configuration du réseau et les données fournies à la Figure D.1 permettent d'obtenir les courants de court-circuit suivants pour un court-circuit monophasé à la terre au poste B.

$$\underline{I}''_{\mathrm{k1}} = 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} + 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}}$$



Alimentation du réseau QA: $\underline{Z}_{(1)\mathrm{QA}} = (0{,}442 + \mathrm{j}4{,}418)\,\Omega$; $\underline{Z}_{(0)\mathrm{QA}} = (1{,}768 + \mathrm{j}8{,}836)\,\Omega$

Alimentation du réseau QB: $\underline{Z}_{(1)\mathrm{QB}} = (1{,}350 + \mathrm{j}8{,}000)\,\Omega$; $\underline{Z}_{(0)\mathrm{QB}} = (4{,}050 + \mathrm{j}12{,}800)\,\Omega$

Figure D.1 – Exemple de calcul du facteur de réduction et de répartition du courant dans le cas de trois câbles monoconducteurs et d'un court-circuit monophasé à la terre au poste B

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

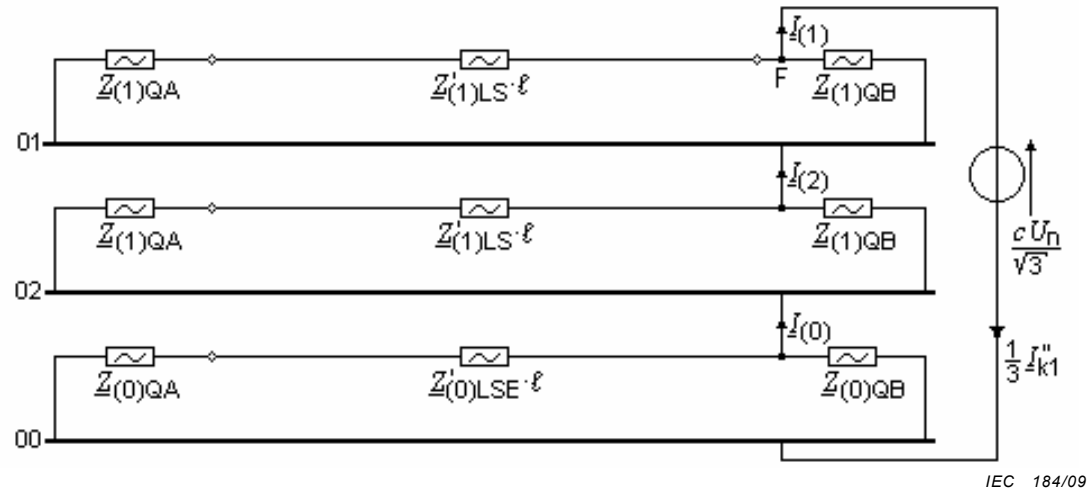


Figure D.2 – Systèmes directs, inverses et homopolaires du réseau illustré à la Figure D.1 avec les connexions à l'emplacement du court-circuit (poste B)

Dans le cas d'une longueur de câble ℓ = 5 km (par exemple), le courant de court-circuit monophasé à la terre à l'emplacement du court-circuit au poste B est obtenu à partir de la Figure D.2, comme suit:

$$I''_{k1} = 3\underline{I}_{(0)} = \frac{\sqrt{3}\,cU_n}{2\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)}} = \frac{\sqrt{3}\cdot 1{,}1\cdot 110\,\text{kV}}{2(0{,}4339 + \text{j}3{,}0947)\Omega + (1{,}9492 + \text{j}5{,}4842)\Omega} = (4{,}0939 - \text{j}16{,}9654)\,\text{kA}$$

où

$$\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)} = \frac{1}{\dfrac{1}{\underline{Z}_{(1)QA} + \underline{Z}'_{(1)LS}\ell} + \dfrac{1}{\underline{Z}_{(1)QB}}} = (0{,}4339 + \text{j}3{,}0947)\Omega$$

$$\underline{Z}_{(0)} = \frac{1}{\dfrac{1}{\underline{Z}_{(0)QA} + \underline{Z}'_{(0)LSE}\ell} + \dfrac{1}{\underline{Z}_{(0)QB}}} = (1{,}9492 + \text{j}5{,}4841)\Omega$$

Ce résultat permet d'obtenir les courants de court-circuit partiels $3\underline{I}_{(0)A}$ et $3\underline{I}_{(0)B}$:

$$3\underline{I}_{(0)A} = \underline{I}''_{k1}\frac{\underline{Z}_{(0)QB}}{\underline{Z}_{(0)QA} + \underline{Z}_{(0)QB} + \underline{Z}'_{(0)LSE}\ell} = (2{,}5780 - \text{j}\,9{,}5528)\,\text{kA}$$

$$3\underline{I}_{(0)B} = \underline{I}''_{k1}\frac{\underline{Z}_{(0)QA} + \underline{Z}'_{(0)LSE}\ell}{\underline{Z}_{(0)QA} + \underline{Z}_{(0)QB} + \underline{Z}'_{(0)LSE}\ell} = (1{,}5160 - \text{j}7{,}4126)\,\text{kA}$$

D.2.4 Facteur de réduction et répartition du courant

Facteur de réduction conforme à l'Equation (48) pour une configuration triangulaire des câbles monoconducteurs:

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

$$\underline{r}_3 = \frac{R'_S}{R'_S + 3\omega\frac{\mu_0}{8} + \mathrm{j}3\omega\frac{\mu_0}{2\pi}\ln\frac{\delta}{\sqrt[3]{r_S d^2}}} = 0{,}0572 - \mathrm{j}0{,}1945 \ ;$$

$$r_3 = 0{,}2027$$

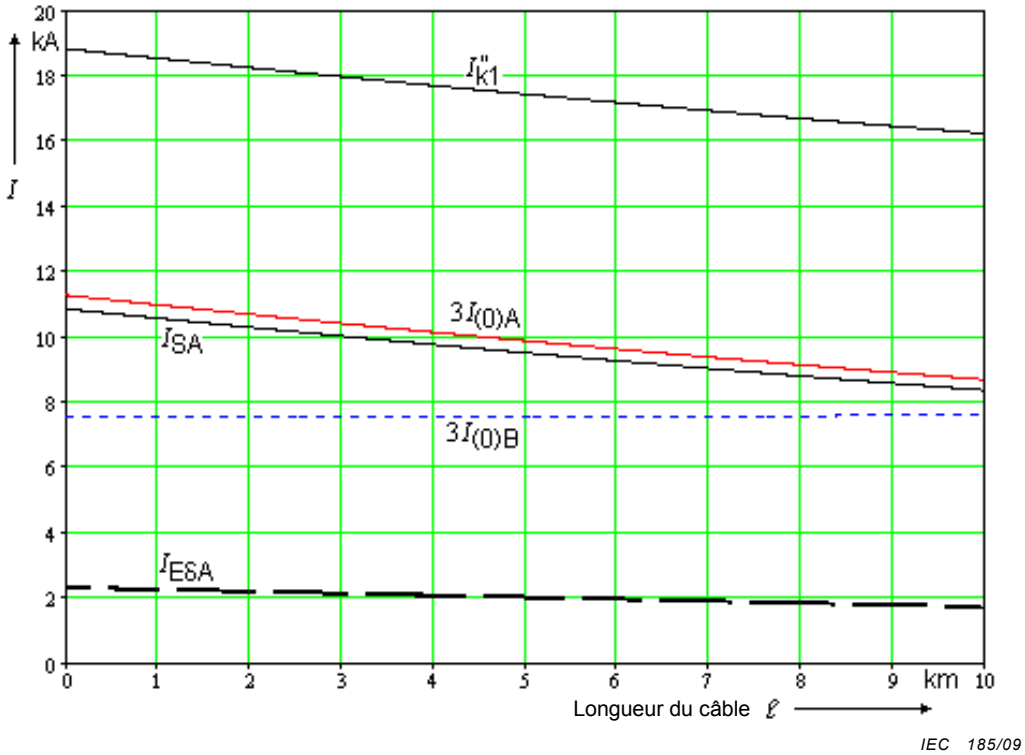
Somme des courants s'écoulant dans les trois gaines conformément à l'Equation (49) avec ℓ = 5 km:

$$\underline{I}_{SA} = (1 - \underline{r}_3)3\underline{I}_{(0)A} = (1 - 0{,}0572 + \mathrm{j}0{,}1945)\cdot(2{,}5780 - \mathrm{j}9{,}5528)\mathrm{kA} = (4{,}2887 - \mathrm{j}8{,}5054)\mathrm{kA} \ ;$$

Ecoulement du courant par la terre conformément à l'Equation (50), avec ℓ = 5 km:

$$\underline{I}_{E\delta A} = \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)A} = (0{,}0572 - \mathrm{j}0{,}1945)\cdot(2{,}5780 - \mathrm{j}9{,}5528)\mathrm{kA} = (-1{,}7108 - \mathrm{j}1{,}0474)\mathrm{kA}$$

La Figure D.3 montre la répartition du courant selon la longueur, ℓ, des câbles entre les postes A et B.



Court-circuit monophasé à la terre au poste B: $\underline{I}''_{k1} = 3\underline{I}_{(0)A} + 3\underline{I}_{(0)B}$; $3\underline{I}_{(0)A} = \underline{I}_{SA} + \underline{I}_{E\delta A}$

Figure D.3 – Répartition du courant pour le réseau illustré à la Figure D.1, selon la longueur, ℓ, des câbles monoconducteurs entre les postes A et B

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

D.3 Court-circuit monophasé à la terre sur l'un des trois câbles monoconducteurs entre les postes A et B

D.3.1 Configuration et données

La configuration est illustrée à la Figure D.4. L'alimentation du court-circuit monophasé à la terre s'effectue à partir des postes A et B. Les données sont fournies en D.2.1 et à la Figure D.1. Une connexion à la terre à l'emplacement du court-circuit est prévue avec $R_{EF} - \propto$ ou $R_{EF} = 5\Omega$ (voir 8.3.2).

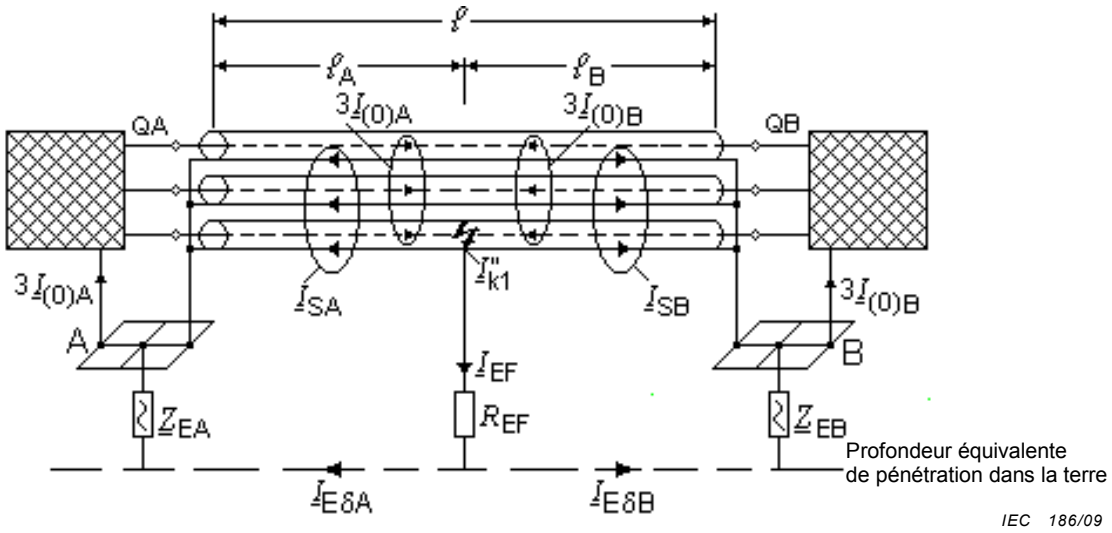


Figure D.4 – Exemple de calcul des facteurs de réduction r_3 et de répartition du courant dans le cas de trois câbles monoconducteurs et d'un court-circuit monophasé à la terre entre les postes A et B

Alimentation QA et QB du réseau comme indiqué à la Figure D.1

D.3.2 Courants de court-circuit

La Figure D.5 présente les systèmes directs, inverses et homopolaires conformément à la configuration illustrée à la Figure D.4

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

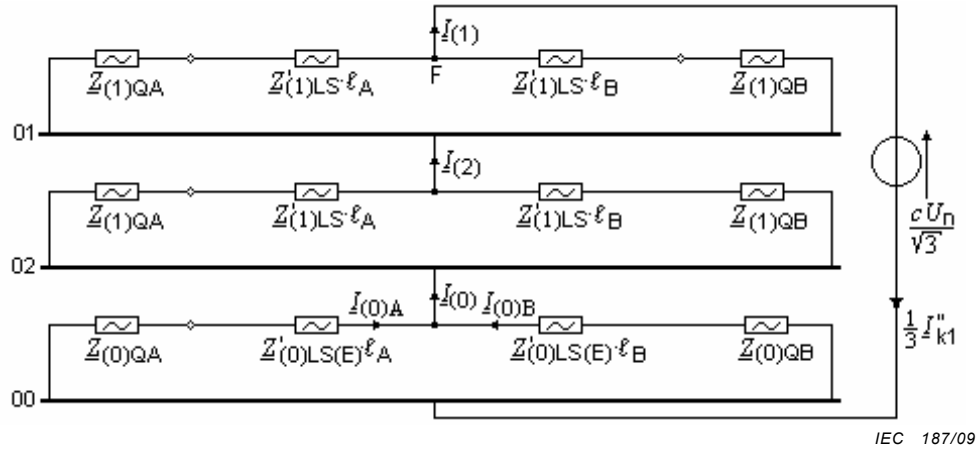


Figure D.5 – Systèmes directs, inverses et homopolaires du réseau illustré à la Figure D.4 avec les connexions à l'emplacement du court-circuit (en tout point entre les postes A et B)

D.3.3 Répartition du courant avec $R_{EF} \rightarrow \infty$

Avec $\ell_A = 5$ km (par exemple) entre le poste A et l'emplacement du court-circuit, si la longueur totale du câble est $\ell = 10$ km ($\ell = \ell_A + \ell_B$), le courant de court-circuit monophasé à la terre est le suivant:

$$\underline{I}''_{k1} = 3\underline{I}_{(0)} = \frac{\sqrt{3}\,cU_n}{2\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)}} = \frac{\sqrt{3}\cdot 1{,}1\cdot 110\,\text{kV}}{2(0{,}4533 + \text{j}3{,}1844)\Omega + (2.3471 + \text{j}5{,}4225)\Omega} = (4{,}5573 - \text{j}16{,}5163)\text{kA}$$

où

$$\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)} = \frac{1}{\dfrac{1}{\underline{Z}_{(1)QA} + \underline{Z}'_{(1)LS}\ell_A} + \dfrac{1}{\underline{Z}_{(1)QB} + \underline{Z}'_{(1)LS}\ell_B}} = (0{,}4532 + \text{j}3{,}1843)\Omega$$

$$\underline{Z}_{(0)} = \frac{1}{\dfrac{1}{\underline{Z}_{(0)QA} + \underline{Z}'_{(0)LS}\ell_A} + \dfrac{1}{\underline{Z}_{(0)QB} + \underline{Z}'_{(0)LS}\ell_B}} = (2{,}3471 + \text{j}5{,}4225)\Omega$$

Ce résultat permet d'obtenir les courants de court-circuit partiels $\underline{I}_{(0)A}$ et $\underline{I}_{(0)B}$:

$$\underline{I}_{(0)A} = \frac{1}{3}\underline{I}''_{k1}\frac{\underline{Z}_{(0)QB} + \underline{Z}'_{(0)LS}\ell_B}{\underline{Z}_{(0)QA} + \underline{Z}_{(0)QB} + \underline{Z}'_{(0)LS}\ell} = (0{,}8462 - \text{j}\,3{,}2794)\text{kA}$$

$$\underline{I}_{(0)B} = \frac{1}{3}\underline{I}''_{k1}\frac{\underline{Z}_{(0)QA} + \underline{Z}'_{(0)LS}\ell_A}{\underline{Z}_{(0)QA} + \underline{Z}_{(0)QB} + \underline{Z}'_{(0)LS}\ell} = (0{,}6729 - \text{j}2{,}2260)\text{kA}$$

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---
Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

Courants s'écoulant dans les gaines conformément aux Equations (51a) et (52a) avec $\underline{r}_3 = 0{,}0572 - \mathrm{j}0{,}1945$ pour l'exemple numérique $\ell_A = 5$ km :

$$\underline{I}_{SA} = (1-\underline{r}_3)3\underline{I}_{(0)A} + \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)A}\frac{\ell_B}{\ell} + \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)B}\frac{\ell_B}{\ell} = (2{,}8310 - \mathrm{j}9{,}697)\,\mathrm{kA}\ ;$$

$$I_{SA} = 10{,}1022\,\mathrm{kA}$$

$$\underline{I}_{SB} = (1-\underline{r}_3)3\underline{I}_{(0)B} + \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)B}\frac{\ell_A}{\ell} + \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)A}\frac{\ell_A}{\ell} = (1{,}7263 - \mathrm{j}6{,}8189)\,\mathrm{kA}\ ;$$

$$I_{SB} = 7{,}0341\,\mathrm{kA}$$

Les courants s'écoulant par la terre sont obtenus avec les Equations (54a) et (55a) pour l'exemple numérique $\ell_A = 5$ km :

$$\underline{I}_{E\delta A} = \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)A}\frac{\ell_A}{\ell} - \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)B}\frac{\ell_B}{\ell} = (-0{,}2925 - \mathrm{j}0{,}1409)\,\mathrm{kA}\ ;$$

$$I_{E\delta A} = 0{,}3246\,\mathrm{kA}$$

$$\underline{I}_{E\delta B} = \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)B}\frac{\ell_B}{\ell} - \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)A}\frac{\ell_A}{\ell} = (0{,}2925 + \mathrm{j}0{,}1409)\,\mathrm{kA}\ ;$$

$$I_{E\delta B} = 0{,}3246\,\mathrm{kA}$$

Les courants les plus élevés qui s'écoulent dans la gaine S1 peuvent être calculés à l'aide des Equations (51b) ou (52b):

$$\underline{I}_{S1Amax} = 3\underline{I}_{(0)A}(\ell_A = 0) + (2 + \underline{r}_3)\underline{I}_{(0)B}(\ell_A = 0) = (2{,}3282 - \mathrm{j}16{,}3454)\,\mathrm{kA}\ ;$$

$$I_{S1A\max} = 16{,}5104\,\mathrm{kA}$$

$$\underline{I}_{S1Bmax} = 3\underline{I}_{(0)B}(\ell_A = \ell) + (2 + \underline{r}_3)\underline{I}_{(0)A}(\ell_A = \ell) = (2{,}9183 - \mathrm{j}13{,}2805)\,\mathrm{kA}\ ;$$

$$I_{S1B\max} = 13{,}5973\,\mathrm{kA}$$

Le courant le plus élevé qui s'écoule dans la terre est calculé à l'aide des Equations (54b) ou (55b):

$$\underline{I}_{E\delta A\max} = \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)A}(\ell_A = \ell) = (-1{,}4191 - \mathrm{j}1{,}1557)\,\mathrm{kA}\ ;$$

$$I_{E\delta Amax} = 1{,}8302\,\mathrm{kA}$$

$$\underline{I}_{E\delta B\max} = \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)B}(\ell_A = 0) = (-0{,}9915 - \mathrm{j}0{,}8810)\,\mathrm{kA}\ ;$$

$$I_{E\delta Bmax} = 1{,}3264\,\mathrm{kA}$$

La Figure D.6 montre la répartition du courant selon la longueur ℓ_A entre le poste A et l'emplacement du court-circuit sur le câble.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

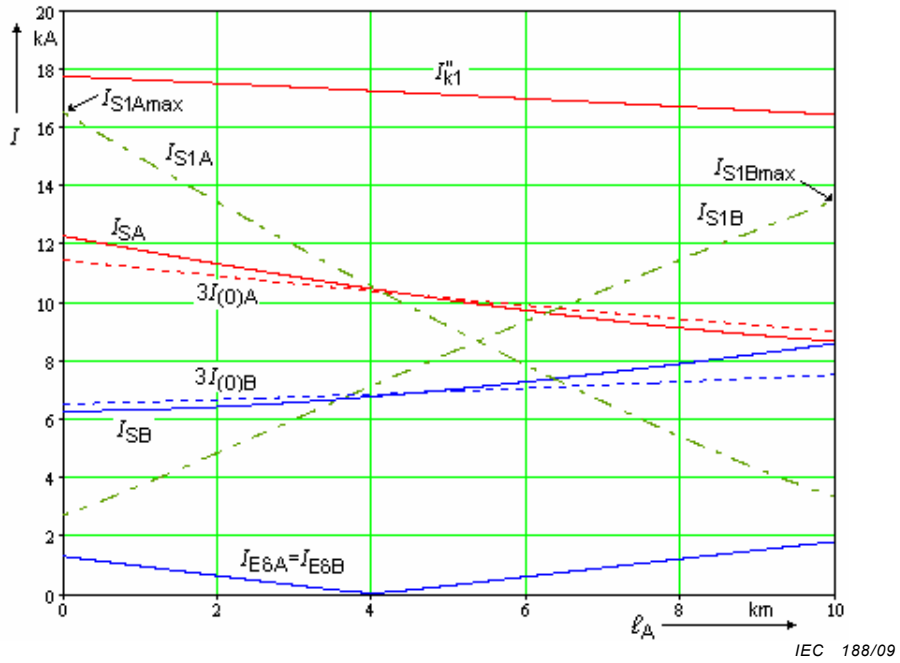


Figure D.6 – Répartition du courant pour le câble illustré à la Figure D.4 selon ℓ_A, $R_{EF} \to \infty$

D.3.4 Répartition du courant avec R_{EF} = 5 Ω

Avec $\ell_A = 5$ km (par exemple) pour le câble entre le poste A et l'emplacement F du court-circuit, si la longueur totale du câble est $\ell = 10$ km ($\ell = \ell_A + \ell_B$), le courant de court-circuit monophasé à la terre est le suivant:

$$\underline{I}''_{k1} = 3\underline{I}_{(0)} = \frac{\sqrt{3}\,cU_n}{2\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)}} = \frac{\sqrt{3}\cdot 1{,}1\cdot 110\,\text{kV}}{2(0{,}4532 + \text{j}3{,}1843)\Omega + (2.2925 + \text{j}5{,}6134)\Omega} = (4{,}3588 - \text{j}16{,}3269)\text{kA}$$

où

$$\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)} = \frac{1}{\dfrac{1}{\underline{Z}_{(1)\text{QA}} + \underline{Z}'_{(1)\text{LS}}\ell_A} + \dfrac{1}{\underline{Z}_{(1)\text{QB}} + \underline{Z}'_{(1)\text{LS}}\ell_B}} = (0{,}4532 + \text{j}3{,}1843)\Omega$$

$$\underline{Z}_{(0)} = \frac{1}{\dfrac{1}{\underline{Z}_{(0)\text{QA}} + \underline{Z}'_{(0)\text{LSE}}\ell_A} + \dfrac{1}{\underline{Z}_{(0)\text{QB}} + \underline{Z}'_{(0)\text{LSE}}\ell_B}} = (2{,}2925 + \text{j}5{,}6134)\Omega$$

Ce résultat permet d'obtenir les courants de court-circuit partiels $3\underline{I}_{(0)A}$ et $3\underline{I}_{(0)B}$:

$$3\underline{I}_{(0)\text{A}} = \underline{I}''_{k1}\frac{\underline{Z}_{(0)\text{QB}} + \underline{Z}'_{(0)\text{LSE}}\ell_B}{\underline{Z}_{(0)\text{QA}} + \underline{Z}_{(0)\text{QB}} + \underline{Z}'_{(0)\text{LSE}}\ell} = (2{,}3867 - \text{j}\,9{,}6916)\text{kA}$$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

$$3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}} = \underline{I}''_{k1}\frac{\underline{Z}_{(0)\mathrm{QA}} + \underline{Z}'_{(0)\mathrm{LSE}}\ell_{\mathrm{A}}}{\underline{Z}_{(0)\mathrm{QA}} + \underline{Z}_{(0)\mathrm{QB}} + \underline{Z}'_{(0)\mathrm{LSE}}\ell} = (1{,}9721 - \mathrm{j}6{,}6354)\,\mathrm{kA}$$

Impédance totale de terre de la gaine à la terre avec $R_{\mathrm{EF}} = 5\ \Omega$ (Equation (47)).

$$\underline{Z}_{\mathrm{EStot}} = \frac{1}{\dfrac{1}{\underline{Z}'_{\mathrm{S}} \cdot 5\mathrm{km}} + \dfrac{1}{\underline{Z}'_{\mathrm{S}} \cdot 5\mathrm{km}} + \dfrac{1}{5\Omega}} = (1{,}1433 + \mathrm{j}1{,}0039)\,\Omega$$

Courants s'écoulant dans les gaines conformément aux Equations (51) et (52) avec $\underline{r}_3 = 0{,}0573 - \mathrm{j}0{,}1945$ pour l'exemple numérique $\ell_{\mathrm{A}} = 5$ km :

$$\underline{I}_{\mathrm{SA}} = (1-\underline{r}_3)3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}} + \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}}\frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{A}}} + \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}}\frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{A}}} = (2{,}8279 - \mathrm{j}9{,}0665)\,\mathrm{kA}$$

$$\underline{I}_{\mathrm{SB}} = (1-\underline{r}_3)3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}} + \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}}\frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{B}}} + \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}}\frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{B}}} = (1{,}8425 - \mathrm{j}6{,}2656)\,\mathrm{kA}$$

Les courants s'écoulant par la terre sont obtenus avec les Equations (54) et (55) pour l'exemple numérique $\ell_{\mathrm{A}} = 5$ km :

$$\underline{I}_{\mathrm{E}\delta\mathrm{A}} = \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}}\frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{B}}} + \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}}\frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{R_{\mathrm{EF}}} - \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}}\frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{A}}} = (-0{,}4412 - \mathrm{j}0{,}6250)\,\mathrm{kA}$$

$$\underline{I}_{\mathrm{E}\delta\mathrm{B}} = \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}}\frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{A}}} + \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)\mathrm{B}}\frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{R_{\mathrm{FE}}} - \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}}\frac{\underline{Z}_{\mathrm{EStot}}}{\underline{Z}'_{\mathrm{S}}\ell_{\mathrm{B}}} = (0{,}1296 - \mathrm{j}0{,}3697)\,\mathrm{kA}$$

Courants les plus élevés s'écoulant dans la gaine S1 comme indiqué en D.3.3.

Le courant le plus élevé s'écoulant par la terre est obtenu à partir de l'Equation (54c) si l'alimentation du courant de court-circuit s'effectue par le poste A uniquement, avec

$$3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}}(\ell_{\mathrm{A}} = \ell) = (2{,}5146 - \mathrm{j}10{,}0276)\,\mathrm{kA}\ ;$$

$$\underline{I}_{\mathrm{E}\delta\mathrm{A}\max} = \underline{r}_3 3\underline{I}_{(0)\mathrm{A}}(\ell_{\mathrm{A}} = \ell) = (-1{,}5287 - \mathrm{j}1{,}0621)\,\mathrm{kA}\ ;$$

$$I_{\mathrm{E}\delta\mathrm{A}\max} = 1{,}8614\,\mathrm{kA}$$

Si l'alimentation du courant de court-circuit s'effectue des deux côtés comme indiqué à la Figure D.4, le résultat $I_{\mathrm{E}\delta\mathrm{A}\max} = 1{,}7644$ kA est obtenu (voir Figure D.7).

La Figure D.7 montre la répartition du courant selon la longueur ℓ_{A} entre le poste A et l'emplacement du court-circuit.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

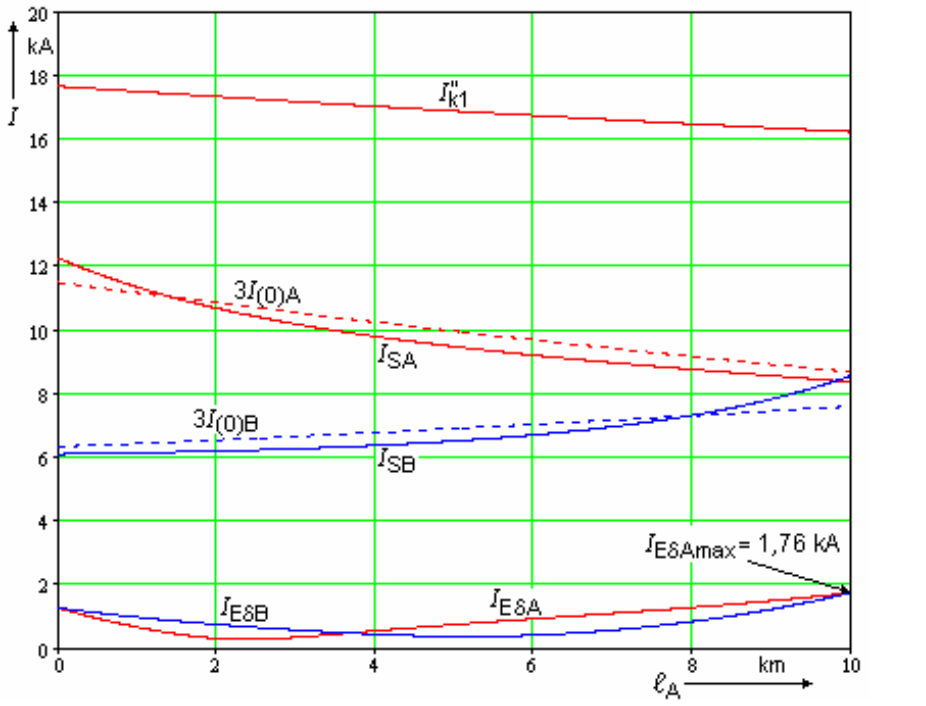


Figure D.7 – Répartition du courant pour le câble illustré à la Figure D.4 selon ℓ_A, R_{EF} = 5 Ω

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

3, rue de Varembé
PO Box 131
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel: + 41 22 919 02 11
Fax: + 41 22 919 03 00
info@iec.ch
www.iec.ch

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale