

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

**Short-circuit currents – Calculation of effects –
Part 1: Definitions and calculation methods**

**Courants de court-circuit – Calcul des effects –
Partie 1: Définitions et méthodes de calcul**





THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2011 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 Varembe
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 It also gives information on projects, withdrawn and replaced publications.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



IEC 60865-1

Edition 3.0 2011-10

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

**Short-circuit currents – Calculation of effects –
Part 1: Definitions and calculation methods**

**Courants de court-circuit – Calcul des effects –
Partie 1: Définitions et méthodes de calcul**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX

XA

ICS 17.220.01; 29.240.20

ISBN 978-2-88912-771-9

CONTENTS

FOREWORD.....	4
1 Scope.....	6
2 Normative references	6
3 Terms, definitions, symbols and units	7
3.1 Terms and definitions	7
3.2 Symbols and units	9
4 General	12
5 Rigid conductor arrangements	13
5.1 General	13
5.2 Calculation of electromagnetic forces	13
5.2.1 Calculation of peak force between the main conductors during a three-phase short-circuit.....	13
5.2.2 Calculation of peak force between the main conductors during a line-to-line short-circuit.....	13
5.2.3 Calculation of peak value of force between coplanar sub-conductors.....	14
5.3 Effective distance between main conductors and between sub-conductors	14
5.4 Calculation of stresses in rigid conductors.....	16
5.4.1 Calculation of stresses	16
5.4.2 Section modulus and factor q of main conductor composed of sub-conductors.....	17
5.4.3 Permitted conductor stress	20
5.5 Structure loads due to rigid conductors	21
5.6 Consideration of automatic reclosing	21
5.7 Calculation with special regard to conductor oscillation	22
5.7.1 General	22
5.7.2 Determination of relevant natural frequency.....	23
5.7.3 The factors V_F , $V_{\sigma m}$, $V_{\sigma s}$, V_{rm} and V_{rs}	23
6 Flexible conductor arrangements	26
6.1 General	26
6.2 Effects on horizontal main conductors	27
6.2.1 General	27
6.2.2 Characteristic dimensions and parameter	27
6.2.3 Tensile force $F_{t,d}$ during short-circuit caused by swing out (short-circuit tensile force) without dropper in midspan	30
6.2.4 Dynamic change of sag due to elongation of conductor and change of shape of the conductor curve.....	31
6.2.5 Tensile force $F_{t,d}$ during short-circuit caused by swing out (short-circuit tensile force) with dropper in the middle of the span.....	32
6.2.6 Tensile force $F_{f,d}$ after short-circuit caused by drop (drop force).....	33
6.2.7 Horizontal span displacement b_H and minimum air clearance a_{min}	33
6.3 Effects on vertical main conductors (droppers)	34
6.4 Effects on bundled conductors	35
6.4.1 Characteristic dimensions and parameter	35
6.4.2 Tensile force $F_{pi,d}$ in the case of clashing sub-conductors	38
6.4.3 Tensile force $F_{pi,d}$ in the case of non-clashing sub-conductors	38
6.5 Structure loads due to flexible conductors	41
6.5.1 Design load for post insulators, their supports and connectors	41

6.5.2	Design load for structures, insulators and connectors with tensile forces transmitted by insulator chains.....	41
6.5.3	Design load for foundations	42
7	The thermal effect on bare conductors.....	42
7.1	General.....	42
7.2	Calculation of thermal equivalent short-circuit current	42
7.3	Calculation of temperature rise and rated short-time withstand current density for conductors	43
7.4	Calculation of thermal short-time strength for different durations of the short-circuit	44
Annex A (normative)	Equations for calculation of diagrams.....	46
Bibliography		51
Figure 1	– Factor k_{1s} for calculating the effective conductor distance.....	15
Figure 2	– Loading direction and bending axis for multiple conductor arrangements	18
Figure 3	– Factor e for the influence of connecting pieces in Equation (17)	24
Figure 4	– Factors V_F , $V_{\sigma m}$ and $V_{\sigma s}$ to be used with the three-phase and line-to-line short-circuits.....	25
Figure 5	– Factors V_{rm} and V_{rs} to be used with three-phase automatic reclosing.....	26
Figure 6	– Maximum swing out angle δ_{max} for a given maximum short-circuit duration T_{k1}	30
Figure 7	– Factor ψ for tensile force in flexible conductors.....	31
Figure 8	– Geometry of a dropper	33
Figure 9	– ν_2 as a function of ν_1	37
Figure 10	– $\nu_3 \cdot \sin \frac{180^\circ}{n}$ as a function of a_s/d	37
Figure 11	– ξ as a function of j and ε_{st}	38
Figure 12	– η as a function of j and ε_{st}	41
Figure 13	– Relation between rated short-circuit withstand current density ($T_{kr} = 1$ s) and conductor temperature	44
Table 1	– Effective distance a_s between sub-conductors for rectangular cross-section dimensions	16
Table 2	– Maximum possible values of $V_{\sigma m}V_{rm}$, $V_{\sigma s}V_{rs}$, V_FV_{rm}	19
Table 3	– Factors α , β , γ for different busbar support arrangements.....	20
Table 4	– Factor q	22
Table 5	– Section moduli W_m of main conductors with two or more stiffening elements between two adjacent supports. The stiffening elements are black.....	22
Table 6	– Recommended highest temperatures for mechanically stressed conductors during a short-circuit.....	43

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**SHORT-CIRCUIT CURRENTS –
CALCULATION OF EFFECTS –****Part 1: Definitions and calculation methods****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 itself does not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC is not responsible for any services carried out by independent certification bodies.
- 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 60865-1 has been prepared by IEC technical committee 73: Short-circuit currents.

This third edition cancels and replaces the second edition published in 1993. This edition constitutes a technical revision.

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

- The determinations for automatic reclosure together with rigid conductors have been revised.
- The influence of mid-span droppers to the span has been included.
- For vertical cable-connection the displacement and the tensile force onto the lower fixing point may now be calculated.
- Additional recommendations for foundation loads due to tensile forces have been added.

- The subclause for determination of the thermal equivalent short-circuits current has been deleted (it is now part of IEC 60909-0).
- The regulations for thermal effects of electrical equipment have been deleted.
- The standard has been reorganized and some of the symbols have been changed to follow the conceptual characteristic of international standards.

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

CDV	Report on voting
73/152/CDV	73/153/RVC

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 60865 series, under the general title, *Short-circuit currents – Calculation of effects* can be found on the IEC website.

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until the stability 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.

SHORT-CIRCUIT CURRENTS – CALCULATION OF EFFECTS –

Part 1: Definitions and calculation methods

1 Scope

This part of IEC 60865 is applicable to the mechanical and thermal effects of short-circuit currents. It contains procedures for the calculation of

- the electromagnetic effect on rigid conductors and flexible conductors,
- the thermal effect on bare conductors.

For cables and insulated conductors, reference is made, for example, to IEC 60949 and IEC 60986. For the electromagnetic and thermal effects in d.c. auxiliary installations of power plants and substations reference is made to IEC 61660-2.

Only a.c. systems are dealt with in this standard.

The following points should, in particular, be noted:

- a) The calculation of short-circuit currents should be based on IEC 60909. For the determination of the greatest possible short-circuit current, additional information from other IEC standards may be referred to, e.g. details about the underlying circuitry of the calculation or details about current-limiting devices, if this leads to a reduction of the mechanical stress.
- b) Short-circuit duration used in this standard depends on the protection concept and should be considered in that sense.
- c) These standardized procedures are adjusted to practical requirements and contain simplifications which are conservative. Testing or more detailed methods of calculation or both may be used.
- d) In Clause 5 of this standard, for arrangements with rigid conductors, only the stresses caused by short-circuit currents are calculated. Furthermore, other stresses can exist, e.g. caused by dead-load, wind, ice, operating forces or earthquakes. The combination of these loads with the short-circuit loading should be part of an agreement and/or be given by standards, e.g. erection-codes.

The tensile forces in arrangements with flexible conductors include the effects of dead-load. With respect to the combination of other loads the considerations given above are valid.

- e) The calculated loads are design loads and should be used as exceptional loads without any additional partial safety factor according to installation codes of, for example, IEC 61936-1 [1]¹.

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 (all parts) *Short-circuit current calculation in three-phase a.c. systems*

¹ Figures in square brackets refer to the bibliography.

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

IEC 60949, *Calculation of thermally permissible short-circuit currents, taking into account non-adiabatic heating effects*

IEC 60986, *Short-circuit temperature limits of electric cables with rated voltages from 6 kV ($U_m = 7,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV)*

IEC 61660-2, *Short-circuit currents in d.c. auxiliary installations in power plants and substations – Part 2: Calculation of effects*

3 Terms, definitions, symbols and units

3.1 Terms and definitions

For the purposes of this document the following terms and definitions apply.

3.1.1

main conductor

conductor or arrangement composed of a number of conductors which carries the total current in one phase

3.1.2

sub-conductor

single conductor which carries a certain part of the total current in one phase and is a part of the main conductor

3.1.3

fixed support

support of a rigid conductor in which moments are imposed in the regarded plane

3.1.4

simple support

support of a rigid conductor in which no moments are imposed in the regarded plane

3.1.5

connecting piece

any additional mass within a span which does not belong to the uniform conductor material, including among others, spacers, stiffening elements, bar overlappings, branchings, etc.

3.1.6

spacer

mechanical element between sub-conductors, rigid or flexible, which, at the point of installation, maintains the clearance between sub-conductors

3.1.7

stiffening element

special spacer intended to reduce the mechanical stress of rigid conductors

3.1.8

relevant natural frequency

f_{cm}

first natural frequency of the free vibration of a single span beam without damping and natural frequency of order ν of beams with ν spans without damping

3.1.9

short-circuit tensile force

$F_{t,d}$

maximum tensile force (design value) in a flexible main conductor due to swing out reached during the short-circuit

3.1.10

drop force

$F_{f,d}$

maximum tensile force (design value) in a flexible main conductor which occurs when the span drops down after swing out

3.1.11

pinch force

$F_{pi,d}$

maximum tensile force (design value) in a bundled flexible conductor during the short-circuit due to the attraction of the sub-conductors in the bundle

3.1.12

duration of the first short-circuit current flow

T_{k1}

time interval between the initiation of the short-circuit and the first breaking of the current

3.1.13

thermal equivalent short-circuit current

I_{th}

r.m.s. value of current having the same thermal effect and the same duration as the actual short-circuit current, which can contain d.c. component and can subside in time

3.1.14

thermal equivalent short-circuit current density

S_{th}

ratio of the thermal equivalent short-circuit current and the cross-section area of the conductor

3.1.15

rated short-time withstand current density, S_{thr} , for conductors

r.m.s. value of the current density which a conductor is able to withstand for the rated short time

3.1.16

duration of short-circuit current

T_k

sum of the time durations of the short-circuit current flow from the initiation of the first short-circuit to the final breaking of the current in all phases

3.1.17

rated short-time

T_{kr}

time duration for which a conductor can withstand a current density equal to its rated short-time withstand current density

3.2 Symbols and units

All equations used in this standard are quantity equations in which quantity symbols represent physical quantities possessing both numerical values and dimensions.

The symbols used in this standard and the SI-units concerned are given in the following lists.

A	Cross-section of one main-conductor	m^2
A_s	Cross-section of one sub-conductor	m^2
a	Centre-line distance between conductors	m
a_m	Effective distance between main conductors	m
$a_{\min}$	Minimum air clearance	m
a_s	Effective distance between sub-conductors	m
a_{1n}	Centre-line distance between sub-conductor 1 and sub-conductor n	m
a_{1s}	Centre-line distance between sub-conductors	m
b_h	Maximum horizontal displacement	m
b_m	Dimension of a main conductor perpendicular to the direction of the force	m
b_s	Dimension of a sub-conductor perpendicular to the direction of the force	m
C_D	Dilatation factor	1
C_F	Form factor	1
c_m	Dimension of a main conductor in the direction of the force	m
c_s	Dimension of a sub-conductor in the direction of the force	m
c_{th}	Material constant	$\text{m}^4/(\text{A}^2\text{s})$
d	Outer diameter of a tubular or flexible conductor	m
E	Young's modulus	N/m^2
E_{eff}	Actual Young's modulus	N/m^2
e	Factor for the influence of connecting pieces	1
F	Force acting between two parallel long conductors during a short-circuit	N
F'	Characteristic electromagnetic force per unit length on flexible main conductors	N/m
F_m	Force between main conductors during a short-circuit	N
F_{m2}	Force between main conductors during a line-to-line short-circuit	N
F_{m3}	Force on the central main conductor during a balanced three-phase short-circuit	N
$F_{r,d}$	Force on support of rigid conductors (peak value, design value)	N
$F_{f,d}$	Drop force of one main conductor (design value)	N
$F_{pi,d}$	Pinch force of one main conductor (design value)	N
F_s	Force between sub-conductors during a short-circuit	N
F_{st}	Static tensile force of one flexible main conductor	N
$F_{t,d}$	Short-circuit tensile force of one main conductor (design value)	N

F_v	Short-circuit current force between the sub-conductors in a bundle	N
f	System frequency	Hz
f_{cm}	Relevant natural frequency of a main conductor	Hz
f_{cs}	Relevant natural frequency of a sub-conductor	Hz
f_{ed}	Dynamic conductor sag at midspan	m
f_{es}	Equivalent static conductor sag at midspan	m
f_{st}	Static conductor sag at midspan	m
f_y	Stress corresponding to the yield point	N/m ²
g	Conventional value of acceleration of gravity	m/s ²
h	Height of the dropper	m
I_k''	Initial symmetrical three-phase short-circuit current (r.m.s.)	A
I_{k1}''	Initial line-to-earth short-circuit current (r.m.s.)	A
I_{k2}''	Initial symmetrical line-to-line short-circuit current (r.m.s.)	A
I_{th}	Thermal equivalent short-circuit current	A
i_p	Peak short-circuit current	A
i_{p2}	Peak short-circuit current in case of a line-to-line short-circuit	A
i_1, i_2	Instantaneous values of the currents in the conductors	A
J_m	Second moment of main conductor area	m ⁴
J_s	Second moment of sub-conductor area	m ⁴
j	Parameter determining the bundle configuration during short-circuit current flow	1
k	Number of sets of spacers or stiffening elements	1
k_{1n}	Factor for the effective distance between sub-conductor 1 and sub-conductor, n	1
k_{1s}	Factor for effective conductor distance	1
l	Centre-line distance between supports	m
l_c	Cord length of a flexible main conductor in the span	m
l_i	Length of one insulator chain	m
l_s	Centre-line distance between connecting pieces or between one connecting piece and the adjacent support	m
l_v	Cord length of a dropper	m
m'_m	Mass per unit length of main conductor	kg/m
m'_s	Mass per unit length of one sub-conductor	kg/m
m_z	Total mass of one set of connecting pieces	kg
N	Stiffness norm of an installation with flexible conductors	1/N
n	Number of sub-conductors of a main conductor	1
q	Factor of plasticity	1
r	The ratio of electromechanic force on a conductor under short-circuit conditions to gravity	1
S	Resultant spring constant of both supports of one span	N/m
S_{th}	Thermal equivalent short-circuit current density	A/mm ²

S_{thr}	Rated short-time withstand current density	A/mm ²
T	Period of conductor oscillation	s
T_k	Duration of short-circuit current	s
T_{ki}	Duration of short-circuit i at repeating short-circuits	s
T_{kr}	Rated short-time	s
T_{k1}	Duration of the first short-circuit current flow	s
T_{res}	Resulting period of the conductor oscillation during the short-circuit current flow	s
t	Wall thickness of tubes	m
V_F	Ratio of dynamic and static force on supports	1
V_{rm}	Ratio of dynamic stress (forces on the supports, contribution of main conductor bending stress) caused by forces between main conductors with unsuccessful three-phase automatic reclosing and dynamic stress with successful three-phase automatic reclosing	1
V_{rs}	Ratio of contribution of dynamic stress caused by forces between sub-conductors with unsuccessful three-phase automatic reclosing and contribution of dynamic stress with successful three-phase automatic reclosing	1
V_{om}	Ratio of dynamic and static contribution of main conductor stress	1
V_{os}	Ratio of dynamic and static contribution of sub-conductor stress	1
W_m	Section modulus of main conductor	m ³
W_s	Section modulus of sub-conductor	m ³
w	Width of dropper	m
α	Factor for force on support	1
β	Factor for main conductor stress	1
γ	Factor for relevant natural frequency estimation	1
δ	Actual maximum swing-out angle due to the limitation of the swing-out movement by the dropper	degrees
δ_{end}	Swing-out angle at the end of the short-circuit current flow	degrees
δ_{max}	Maximum swing-out angle	degrees
δ_1	Angular direction of the force	degrees
ε_{ela}	Elastic expansion	1
$\varepsilon_{pi}, \varepsilon_{st}$	Strain factor of the bundle contraction	1
ε_{th}	Thermal expansion	1
ζ	Stress factor of the flexible main conductor	1
η	Factor for calculating $F_{pi,d}$ in the case of non-clashing sub-conductors	1
θ_b	Conductor temperature of the beginning of a short-circuit	°C
θ_e	Conductor temperature at the end of a short-circuit	°C
κ	Factor for the calculation of the peak short-circuit current	1
μ_0	Magnetic constant, permeability of vacuum	H/m
ν	Number of spans of a continuous beam	1

$\nu_e, \nu_1, \nu_2, \nu_3, \nu_4,$	Factors for calculating $F_{pi,d}$	1
ξ	Factor for calculating $F_{pi,d}$ in the case of clashing sub-conductors	1
σ_{fin}	Lowest value of cable stress when Young's modulus becomes constant	N/m ²
$\sigma_{m,d}$	Bending stress caused by the forces between main conductors (design value)	N/m ²
$\sigma_{s,d}$	Bending stress caused by the forces between sub-conductors (design value)	N/m ²
$\sigma_{tot,d}$	Total conductor stress (design value)	N/m ²
χ	Quantity for the maximum swing-out angle	1
φ, ψ	Factors for the tensile force in a flexible conductor	1

4 General

With the calculation methods presented in this standard

- stresses in rigid conductors,
- tensile forces in flexible conductors,
- forces on insulators and substructures, which might expose them to bending, tension and/or compression,
- span displacements of flexible conductors and
- heating of conductors

can be estimated.

Electromagnetic forces are induced in conductors by the currents flowing through them. Where such electromagnetic forces interact on parallel conductors, they cause stresses that have to be taken into account at the substations. For this reason:

- the forces between parallel conductors are set forth in the following clauses;
- the electromagnetic force components set up by conductors with bends and/or cross-overs may normally be disregarded.

In the case of metal-clad systems, the change of the electromagnetic forces between the conductors due to magnetic shielding can be taken into account. In addition, however, the forces acting between each conductor and its enclosure and between the enclosures shall be considered.

When parallel conductors are long compared to the distance between them, the forces will be evenly distributed along the conductors and are given by Equation (1)

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} i_1 i_2 \frac{l}{a} \quad (1)$$

where

- i_1 and i_2 are the instantaneous values of the currents in the conductors;
- l is the centre-line distance between the supports;
- a is the centre-line distance between the conductors.

When the currents in the two conductors have the same direction, the forces are attractive. When the directions of the currents are opposite, the forces are repulsive.

5 Rigid conductor arrangements

5.1 General

Rigid conductors can be supported in different ways, either fixed or simple or in a combination of both. Depending on the type of support and the number of supports, the stresses in the conductors and the forces on the supports will be different for the same short-circuit current. The equations given also include the elasticity of the supports.

The stresses in the conductors and the forces on the supports also depend on the ratio between the relevant natural frequency of the mechanical system and the electrical system frequency. For example, in the case of resonance or near to resonance, the stresses and forces in the system can be amplified. If $f_{cm}/f < 0,5$ the response of the system decreases and the maximum stresses are in the outer phases.

5.2 Calculation of electromagnetic forces

5.2.1 Calculation of peak force between the main conductors during a three-phase short-circuit

In a three-phase system with the main conductors arranged with the same centre-line distances on the same plane, the maximum force acts on the central main conductor during a three-phase short-circuit and is given by:

$$F_{m3} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{\sqrt{3}}{2} i_p^2 \frac{l}{a_m} \quad (2)$$

where

i_p is the peak value of the short-circuit current in the case of a balanced three-phase short-circuit. For the calculation, see the IEC 60909 series;

l is the maximum centre-line distance between adjacent supports;

a_m is the effective distance between main conductors in 5.3.

NOTE Equation (2) can also be used for calculating the resulting peak force when conductors with circular cross-sections are in the corners of an equilateral triangle and where a_m is the length of the side of the triangle.

5.2.2 Calculation of peak force between the main conductors during a line-to-line short-circuit

The maximum force acting between the conductors carrying the short-circuit current during a line-to-line short-circuit in a three-phase system or in a two-line single-phase-system is given by:

$$F_{m2} = \frac{\mu_0}{2\pi} i_{p2}^2 \frac{l}{a_m} \quad (3)$$

where

i_{p2} is the peak short-circuit current in the case of a line-to-line short-circuit;

l is the maximum centre-line distance between adjacent supports;

a_m is the effective distance between main conductors in 5.3.

5.2.3 Calculation of peak value of force between coplanar sub-conductors

The maximum force acts on the outer sub-conductors and is between two adjacent connecting pieces given by:

$$F_s = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{i_p}{n} \right)^2 \frac{l_s}{a_s} \quad (4)$$

where

n is the number of sub-conductors;

l_s is the maximum existing centre-line distance between two adjacent connecting pieces;

a_s is the effective distance between sub-conductors;

i_p is equal to i_p for a three-phase system or to i_{p2} for a two-line single-phase system.

5.3 Effective distance between main conductors and between sub-conductors

The forces between conductors carrying short-circuit currents depend on the geometrical configuration and the profile of the conductors. For this reason the effective distance a_m between main conductors has been introduced in 5.2.1 and 5.2.2 and the effective distance a_s between sub-conductors in 5.2.3. They shall be taken as follows:

Effective distance a_m between coplanar main conductors with the centre-line distance a :

- Main conductors consisting of single circular cross-sections:

$$a_m = a \quad (5)$$

- Main conductors consisting of single rectangular cross-sections and main conductors composed of sub-conductors with rectangular cross-sections:

$$a_m = \frac{a}{k_{12}} \quad (6)$$

k_{12} shall be taken from Figure 1, with $a_{1s} = a$, $b_s = b_m$ and $c_s = c_m$.

Effective distance a_s between the n coplanar sub-conductors of a main conductor:

- Sub-conductors with circular cross-sections:

$$\frac{1}{a_s} = \frac{1}{a_{12}} + \frac{1}{a_{13}} + \frac{1}{a_{14}} + \dots + \frac{1}{a_{1s}} + \dots + \frac{1}{a_{1n}} \quad (7)$$

- Sub-conductors with rectangular cross-sections:

Some values for a_s are given in Table 1. For other distances and sub-conductor dimensions the equation

$$\frac{1}{a_s} = \frac{k_{12}}{a_{12}} + \frac{k_{13}}{a_{13}} + \frac{k_{14}}{a_{14}} + \dots + \frac{k_{1s}}{a_{1s}} + \dots + \frac{k_{1n}}{a_{1n}} \quad (8)$$

can be used. The values for $k_{12}, \dots, k_{1n}$ shall be taken from Figure 1.

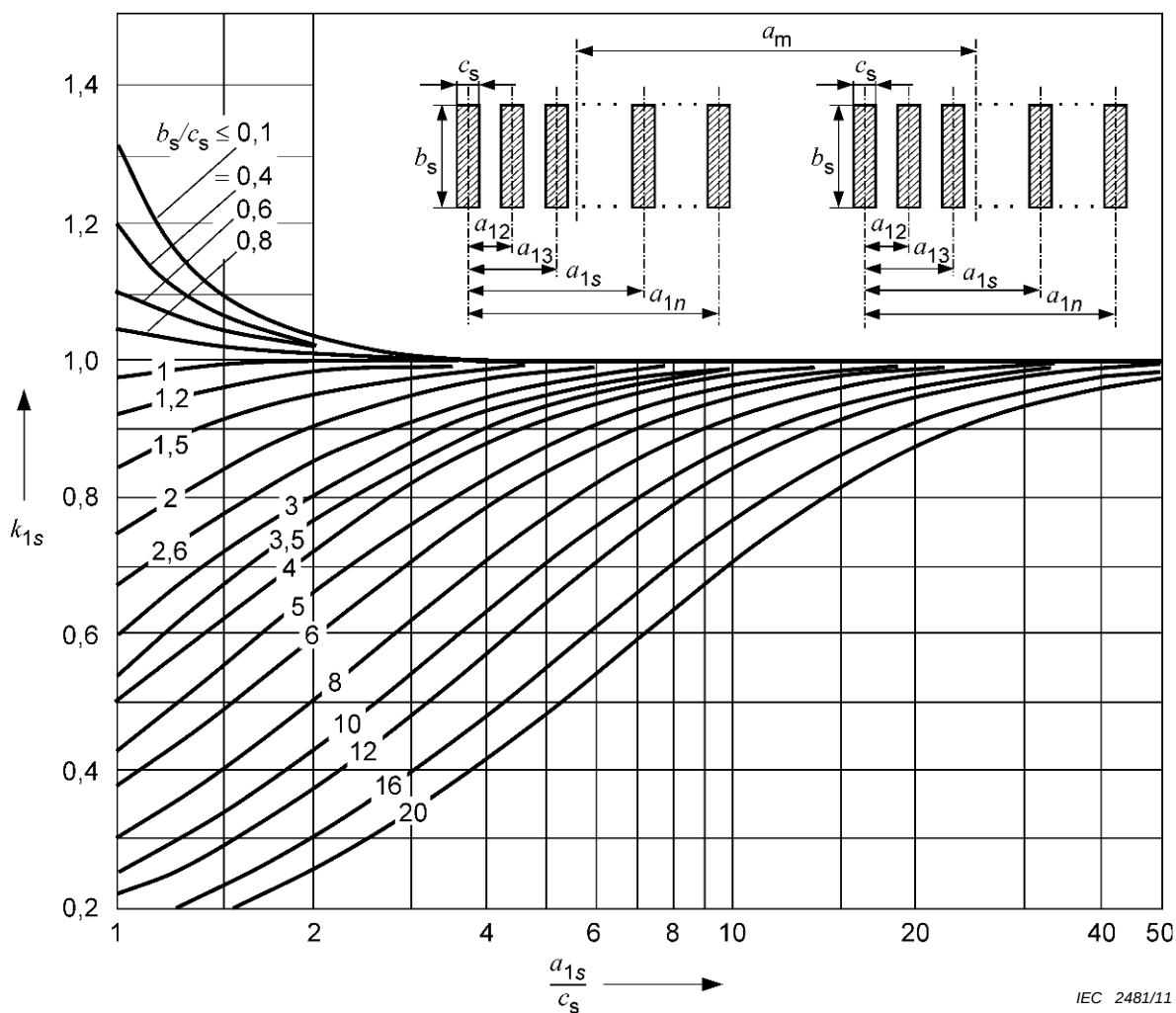
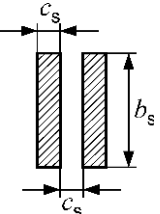
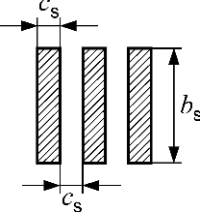
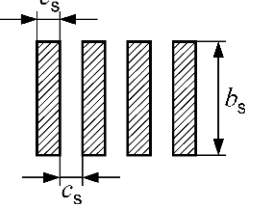
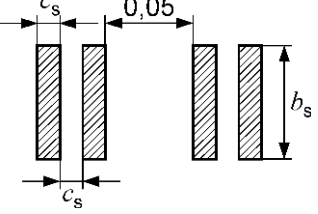


Figure 1 – Factor k_{1s} for calculating the effective conductor distance

For programming, the Equation is given in Clause A.2.

Table 1 – Effective distance a_s between sub-conductors for rectangular cross-section dimensions^a

Rectangular cross sections	b_s c_s	0,04	0,05	0,06	0,08	0,10	0,12	0,16	0,20
	0,005	0,020	0,024	0,027	0,033	0,040	–	–	–
	0,010	0,028	0,031	0,034	0,041	0,047	0,054	0,067	0,080
	0,005	–	0,013	0,015	0,018	0,022	–	–	–
	0,010	0,017	0,019	0,020	0,023	0,027	0,030	0,037	0,043
	0,005	–	–	–	–	–	–	–	–
	0,010	0,014	0,015	0,016	0,018	0,020	0,022	0,026	0,031
	0,005	–	0,014	0,015	0,018	0,020	–	–	–
	0,010	0,017	0,018	0,020	0,022	0,025	0,027	0,032	–

^a All dimensions are given in metres.

5.4 Calculation of stresses in rigid conductors

5.4.1 Calculation of stresses

Conductors have to be fixed in a way that axial forces can be disregarded. Under this assumption the forces acting are bending forces and the general equation for the bending stress caused by the forces between main conductors is given by:

$$\sigma_{m,d} = V_{\sigma m} V_{rm} \beta \frac{F_m l}{8W_m} \quad (9)$$

where

F_m is either the value F_{m3} of three-phase systems according to Equation (2) or F_{m2} of two-line single-phase systems according to Equation (3);

W_m is the section modulus of the main conductor and shall be calculated with respect to the direction of forces between main conductors.

The bending stress caused by the forces between sub-conductors is given by:

$$\sigma_{s,d} = V_{\sigma s} V_{rs} \frac{F_s l_s}{16W_s} \quad (10)$$

where

F_s according to Equation (4) shall be used;

W_s is the section modulus of the sub-conductor and shall be calculated with respect to the direction of forces between sub-conductors.

$V_{\sigma m}$, $V_{\sigma s}$, V_{rm} and V_{rs} are factors which take into account the dynamic phenomena, and β is a factor depending on the type and the number of supports. The maximum possible values of $V_{\sigma m}$, V_{rm} and $V_{\sigma s}$, V_{rs} shall be taken from Table 2 and the factor β shall be taken from Table 3.

NOTE The factor β describes the reduction of the bending stress at the place of its supports, taking into account the plastic deformation of the conductor (see Table 3).

Non-uniform spans in continuous beams may be treated, with sufficient degree of accuracy by assuming the maximum span applied throughout. This means that

- the end supports are not subjected to greater stress than the inner ones,
- span lengths less than 20 % of the adjacent ones shall be avoided. If that does not prove to be possible, the conductors shall be decoupled using flexible joints at the supports. If there is a flexible joint within a span, the length of this span should be less than 70 % of the lengths of the adjacent spans.

If it is not evident whether a beam is supported or fixed, the worst case shall be taken into account.

For further consideration, see 5.7

5.4.2 Section modulus and factor q of main conductor composed of sub-conductors

The bending stress and, consequently, the mechanical withstand of the conductor, depends on the section modulus.

If the stress occurs in accordance with Figure 2a, the section modulus W_m is independent of the number of connecting pieces and is equal to the sum of the section moduli W_s of the sub-conductors (W_s with respect to the axis x-x). The factor q has then the value 1,5 for rectangular cross-sections and 1,19 for U and I sections.

If the stress occurs in accordance with Figure 2b and in the case there is only one or no stiffening element within a supported distance, the section modulus W_m is equal to the sum of the section moduli W_s of the sub-conductors (W_s with respect to the axis y-y). The factor q has then the value 1,5 for rectangular cross-sections and 1,83 for U and I sections.

When, within a supported distance, there are two or more stiffening elements, higher values of section moduli may be used:

- for main conductors composed of sub-conductors of rectangular cross-sections with a space between the bars equal to the bar thickness, the section moduli are given in Table 5;
- for conductor groups having U and I cross-sections, 50 % of the section moduli with respect to the axis 0-0 should be used.

The factor q then has a value of 1,5 for rectangular cross-section and 1,83 for U and I sections.

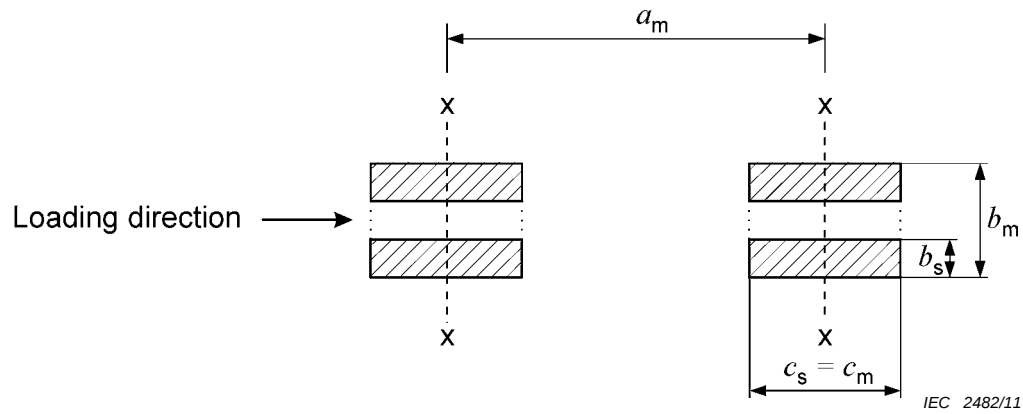


Figure 2a – Loading along the surface

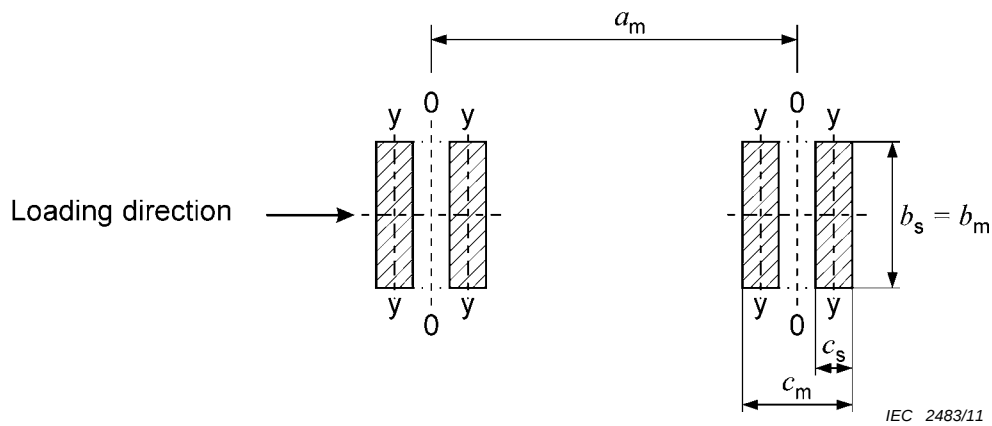


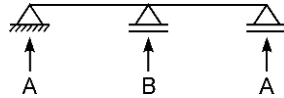
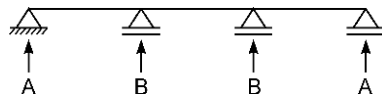
Figure 2b – Loading perpendicular to the surface

Figure 2 – Loading direction and bending axis for multiple conductor arrangements

Table 2 – Maximum possible values of $V_{\sigma m} V_{rm}$, $V_{\sigma s} V_{rs}$, $V_F V_{rm}$

Type of short-circuit	System			
	Without three-phase automatic reclosing	With three-phase automatic reclosing		With and without three-phase automatic reclosing
	$V_{\sigma m} V_{rm}, V_{\sigma s} V_{rs}$	$V_{\sigma m} V_{rm}, V_{\sigma s} V_{rs}$		$V_F V_{rm}$
		First current flow	Second current flow	
Line-to-line	1,0	1,0	1,8	$2,0$ for $\frac{\sigma_{tot,d}}{0,8 f_y} \leq 0,5$ $\frac{0,8 f_y}{\sigma_{tot,d}}$ for $0,5 < \frac{\sigma_{tot,d}}{0,8 f_y} < 1,0$ $1,0$ for $1,0 \leq \frac{\sigma_{tot,d}}{0,8 f_y}$ range 1 2 3
Three-phase	1,0	1,0	1,8	$2,7$ for $\frac{\sigma_{tot,d}}{0,8 f_y} \leq 0,37$ $\frac{0,8 f_y}{\sigma_{tot,d}}$ for $0,37 < \frac{\sigma_{tot,d}}{0,8 f_y} < 1,0$ $1,0$ for $1,0 \leq \frac{\sigma_{tot,d}}{0,8 f_y}$ range 1 2 3

Table 3 – Factors α , β , γ for different busbar support arrangements

Type of beam and support			α	$\beta^*)$	γ
Single span beam	A and B: simple supports		A: 0,5 B: 0,5	1,0	1,57
	A: fixed support B: simple support		A: 0,625 B: 0,375	$\frac{8}{11} = 0,73$	2,45
	A and B: fixed supports		A: 0,5 B: 0,5	$\frac{8}{16} = 0,5$	3,56
Continuous beam with equidistant simple supports	Two spans		A: 0,375 B: 1,25	$\frac{8}{11} = 0,73$	2,45
	Three or more spans		A: 0,4 B: 1,1	$\frac{8}{11} = 0,73$	3,56
* Plasticity effects included.					

5.4.3 Permitted conductor stress

A single conductor is assumed to withstand the short-circuit forces when:

$$\sigma_{m,d} \leq q f_y \quad (11)$$

where f_y is the stress corresponding to the yield point.

The factor q shall be taken from Table 4, see also 5.4.2.

NOTE The factor q as given in Table 4 and in 5.4.2 describes the increase of the permitted stress of the conductor due to its plastic behaviour at places outside of its supports taking into account the shape of the conductor.

When a main conductor consists of two or more sub-conductors the total stress in the conductor is given by:

$$\sigma_{tot,d} = \sigma_{m,d} + \sigma_{s,d} \quad (12)$$

The conductor is assumed to withstand the short-circuit forces when:

$$\sigma_{tot,d} \leq q f_y \quad (13)$$

It is necessary to verify that the short-circuit does not affect the distance between sub-conductors too much, therefore a value

$$\sigma_{s,d} \leq f_y \quad (14)$$

is recommended.

In Table 4 the highest acceptable values for q for different cross-sections are given. For $\sigma_{m,d} = q f_y$ respectively $\sigma_{tot,d} = q f_y$ small permanent deformations can occur, approximately 1 % of the distance between supports for q -values according to Table 4, which do not jeopardize the safety of operation as long as by this the minimum clearances between main conductors or between a main conductor and the earthed structure are not violated.

For the yield point of conductor materials, f_y , the standards often state ranges with minimum and maximum values. If only such limit values rather than actual readings are available, the minimum value should be used in 5.4.3 and the maximum value in Table 2.

NOTE A possible static stress in the conductor (e.g. due to its dead load) is not regarded in Equations (11) to (14). If applicable, it should be combined with the stress due to short-circuit corresponding to the direction of action.

5.5 Structure loads due to rigid conductors

The equivalent static force $F_{r,d}$ on supports of rigid conductors shall be calculated from:

$$F_{r,d} = V_F V_{rm} \alpha F_m \quad (15)$$

where F_m is either the value F_{m3} of three-phase systems according to Equation (2) or F_{m2} of two-line single-phase systems according to Equation (3) shall be used.

The maximum possible values of $V_F V_{rm}$ shall be taken from Table 2.

The factor α is dependent on the type and the number of supports and shall be taken from Table 3.

For further consideration, see 5.7 .

The force $F_{r,d}$ shall not be greater than the withstand value given by the manufacturer of supports and insulators. For an insulator stressed by a bending force, the rated withstand value is given as a force acting at the insulator head.

NOTE For a force acting at a point higher than the insulator head, a withstand value lower than the rated withstand value should be used, based on the withstand bending moment at the critical insulator cross-section.

5.6 Consideration of automatic reclosing

At rigid conductors, automatic reclosing has to be regarded if three-phase automatic reclosing is used.

In networks with three-phase automatic reclosing different mechanical stresses occur during the first and the second current flow duration. Thus, different forces can result on the supports during the two current flow durations. That's why the force $F_{r,d}$ shall be calculated as follows:

- calculation of $\sigma_{tot,d}$ according to 5.4 with $V_{\sigma m} V_{rm}$, $V_{\sigma s} V_{rs}$ from Table 2 for the first current flow duration and determination of $V_F V_{rm}$ from Table 2;
- calculation of $\sigma_{tot,d}$ according to 5.4 with $V_{\sigma m} V_{rm}$, $V_{\sigma s} V_{rs}$ from Table 2 for the second current flow duration and determination of $V_F V_{rm}$ from Table 2;
- calculation of $F_{r,d}$ according to Equation (15) with the maximum value of $V_F V_{rm}$ out of the two current flow durations.

Table 4 – Factor q

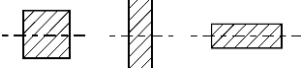
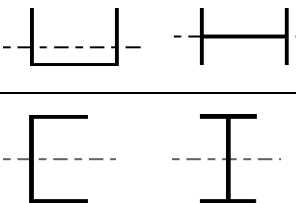
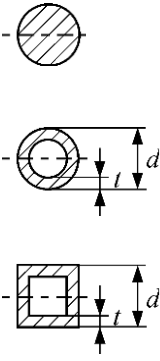
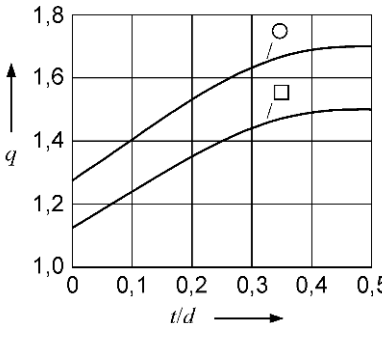
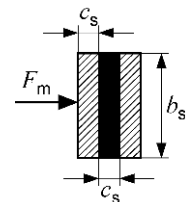
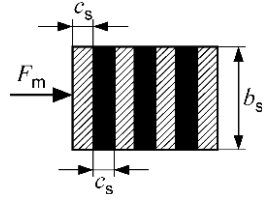
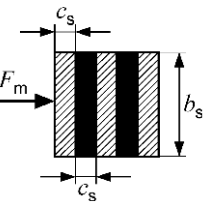
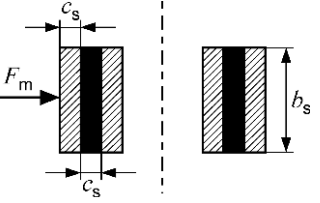
Cross section	Cross section
 $q = 1,5$	 $q = 1,83$ $q = 1,19$
 $q = 1,7$ $q = 1,7 \frac{1 - (1 - 2t/d)^3}{1 - (1 - 2t/d)^4}$ $q = 1,5 \frac{1 - (1 - 2t/d)^3}{1 - (1 - 2t/d)^4}$	
q is valid for the dotted bending axis. The forces are perpendicular to it.	

Table 5 – Section moduli W_m of main conductors with two or more stiffening elements between two adjacent supports

Rectangular sections	W_m	Rectangular sections	W_m
	$0,867 c_s^2 b_s$		$3,48 c_s^2 b_s$
	$1,98 c_s^2 b_s$		$1,73 c_s^2 b_s$
The stiffening elements are black.			

5.7 Calculation with special regard to conductor oscillation

5.7.1 General

The equations in 5.4.1 and 5.5 contain factors $V_{\sigma m}$, $V_{\sigma s}$, V_F , V_{rm} and V_{rs} which take into account oscillatory nature of the stresses and forces.

The upper limits of these factors are given in Table 2. Lower values than these are permitted, if they are estimated by this subclause. It is necessary to calculate the relevant natural frequency f_{cm} taking into account the accuracy of the data.

5.7.2 Determination of relevant natural frequency

The relevant natural frequency of a conductor can be calculated from:

$$f_{cm} = \frac{\gamma}{l^2} \sqrt{\frac{E J_m}{m'_m}} \quad (16)$$

Equation (16) is directly applicable to main conductors consisting of single cross-sections.

The factor γ is dependent on the type and number of supports and is given in Table 3.

NOTE 1 The relevant natural frequency is calculated slightly too high with Equation (16) for continuous beam having three or more spans. A more exact calculation can be made with additional effort only. That's why it is recommended to use Equation (16).

If the main conductor is composed of sub-conductors of rectangular cross-section, the relevant natural frequency of the main conductor shall be calculated from:

$$f_{cm} = e \frac{\gamma}{l^2} \sqrt{\frac{E J_s}{m'_s}} \quad (17)$$

The factor e shall be taken from Figure 3b or Figure 3c. In the case of no connecting pieces $e = 1$.

For a main conductor composed of sub-conductors of U and I sections f_{cm} is calculated from Equation (16): J_m and m'_m shall apply to the main conductor design.

For the calculation of sub-conductor stress, taking the relevant natural frequency into account, the equation

$$f_{cs} = \frac{3,56}{l_s^2} \sqrt{\frac{E J_s}{m'_s}} \quad (18)$$

shall be used.

NOTE 2 The second moments of area J_m and J_s are calculated according to Figures 2a or 2b.

5.7.3 The factors V_F , $V_{\sigma m}$, $V_{\sigma s}$, V_{rm} and V_{rs}

The factors V_F , $V_{\sigma m}$, $V_{\sigma s}$, V_{rm} and V_{rs} as functions of the ratio f_{cm}/f and f_{cs}/f , where f is the system frequency, are a little different if a three-phase short-circuit or a line-to-line short-circuit is to be concerned, and they are also dependent on the mechanical damping of the conductor system. For practical calculations, these factors shall be taken from Figure 4.

NOTE 1 Short-circuit duration $T_{k1} \leq 0,1$ s can cause an appreciable reduction of the stress in structures with $f_{cm}/f \leq 1$.

NOTE 2 In the case of elastic supports, the relevant natural frequency is lower than calculated with Equation (16). This is to be considered when using Figure 4, if the value of $f_{cm}/f > 2,4$.

For three-phase automatic reclosing, the factors V_{rm} and V_{rs} shall be taken from Figure 5; in other cases $V_{rm} = 1$, $V_{rs} = 1$.

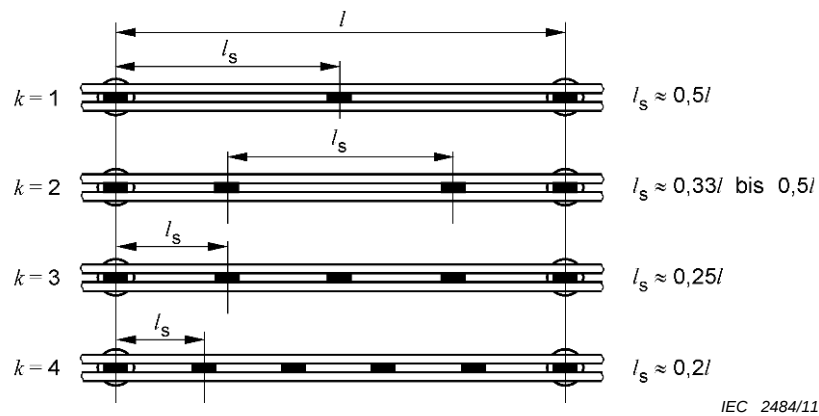


Figure 3a – Arrangement of connecting pieces within the span

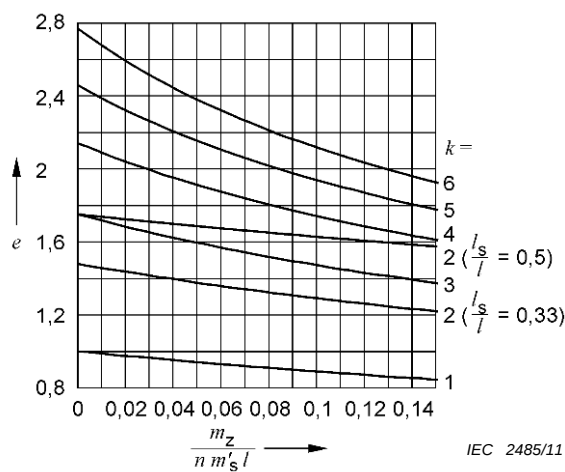


Figure 3b – Connecting pieces are stiffening elements

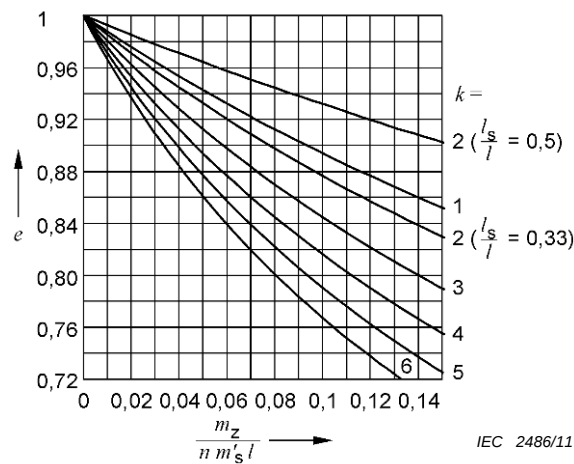


Figure 3c – Connecting pieces are, or operate as, spacers

Factor e shall be taken from the Figure 3b or Figure 3c as shown:

		Within a span there are	
		k stiffening elements	k spacers
Direction of oscillation perpendicular to the surface		Factor e from Figure 3b	Factor e from Figure 3c
Direction of oscillation along the surface		Factor e from Figure 3c	Factor e from Figure 3c

IEC 2487/11

Figure 3 – Factor e for the influence of connecting pieces in Equation (17)

For programming, the equation is given in Clause A.3.

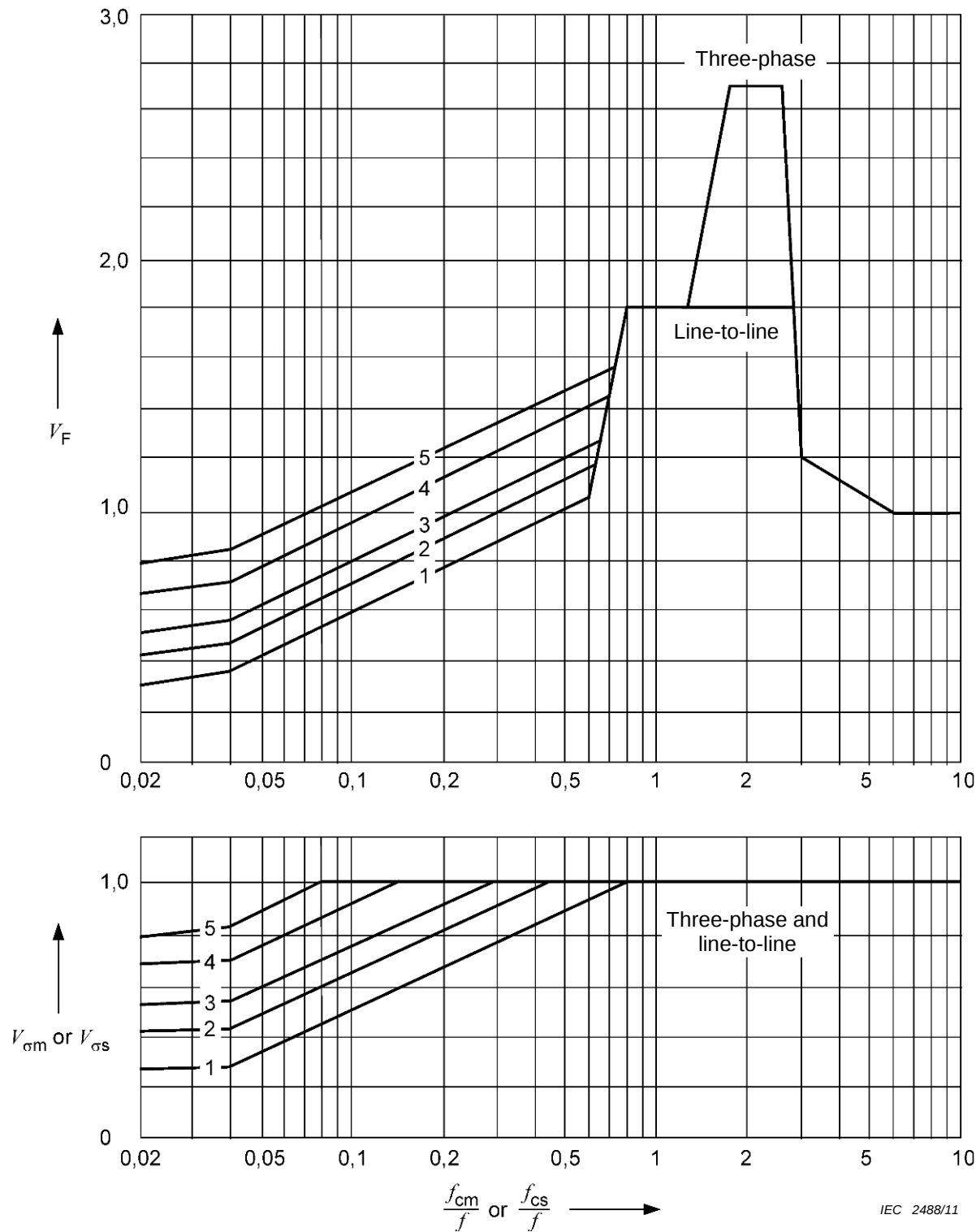


Figure 4 – Factors V_F , $V_{\sigma m}$ and $V_{\sigma s}$ to be used with the three-phase and line-to-line short-circuits

For programming, the equations are given in Clause A.4.

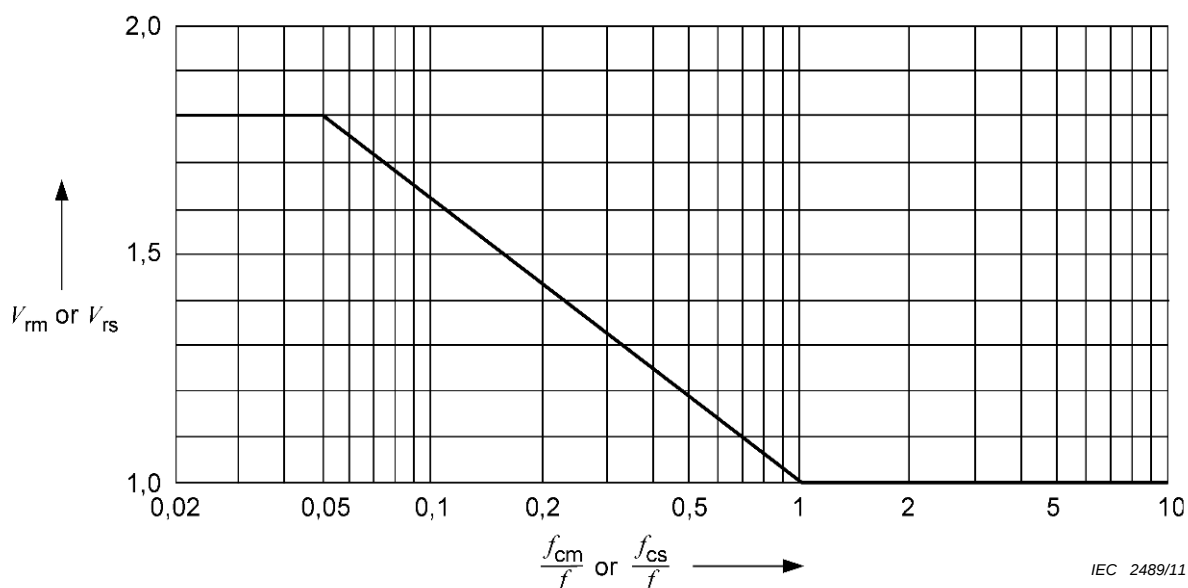


Figure 5 – Factors V_{rm} and V_{rs} to be used with three-phase automatic reclosing

For programming, the equation is given in Clause A.5.

6 Flexible conductor arrangements

6.1 General

In a span, there is a difference between the tensile force $F_{t,d}$ due to the swing-out of the conductor during the short-circuit, the tensile force $F_{f,d}$ after the short-circuit when the conductor drops back and the tensile force $F_{pi,d}$ caused by the pinch effect in the conductor bundle. The effects on horizontal main conductors are calculated in 6.2. After calculation of the characteristic parameters for the configuration and type of short-circuit in 6.2.2, the tensile force $F_{t,d}$ without dropper in the span is calculated in 6.2.3. The dynamic change of sag due to elongation of conductor and change of shape of the conductor curve is determined in 6.2.4 and afterwards the tensile force $F_{t,d}$ with droppers in the span in 6.2.5. The tensile force $F_{f,d}$ after the short-circuit follows in 6.2.6. The horizontal displacement of the span b_h and the minimum air clearance between conductors a_{min} during the swing-out of the conductors is calculated in 6.2.7. The effects on vertical main conductors are determined in 6.3. The tensile force $F_{pi,d}$ is calculated in 6.4. Design loads are given with 6.5.

In installations with flexible conductors, the stresses occurring in line-to-line short-circuits and balanced three-phase short-circuits are approximately equal. However, for line-to-line short-circuits, conductor swing out typically results in decreasing minimum clearances, (i.e. when adjacent conductors carrying short-circuit current move towards one another after the short-circuit). In the case of balanced three-phase short-circuit, the centre conductor moves only slightly because of its inertia and the alternating bidirectional forces which act on it. Consequently $F_{t,d}$, $F_{f,d}$ and b_h are therefore calculated for a line-to-line short-circuit.

The tensile forces $F_{t,d}$, $F_{f,d}$ and $F_{pi,d}$ include the tensile forces caused by the dead-load.

The following calculations shall be carried out on the basis of the static tensile force F_{st} existing at the local minimum winter temperature, e.g. $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, and also on the basis of the static tensile force F_{st} existing at the maximum operating temperature, e.g. $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. For each tensile force, the worst case shall be taken into account for design purposes.

6.2 Effects on horizontal main conductors

6.2.1 General

The following subclauses apply to single conductors and to bundle configurations.

In addition to the stresses calculated here, the stresses due to the sub-conductors according to 6.4 have to be calculated. Arrangements with and without droppers within the span are regarded.

The following sections are valid for horizontal, side by side arranged cables. In other arrangements, smaller tensile forces can occur. Due to the effort of such calculations, it is recommended to use the given equation in these cases as well. If the difference in the height of fixing points is more than 25 % of the span, the calculation shall be made according to 6.3.

The following equations apply for span lengths up to approximately 120 m and ratios of sag to span-length to approximately 8 %. For longer spans, the movement of the conductor can result in lower stresses than calculated using the equations. If this can be proved by computation or measurement, lower loads may be taken into account.

NOTE Droppers near to the fixing point of the main conductor have little effect on the tensile forces and the movement of the main conductor. In this case, it is recommended to calculate according to 6.2 without regarding the droppers.

The share of concentrated masses in the span e.g. by clamps, droppers or connectors should be regarded when calculating the static tensile force F_{st} and the static sag f_{st} . For the dropper, half of its mass should be estimated in this case.

The sum of existing concentrated masses shall be converted to an additional mass per unit length across the span when calculating for the tensile forces $F_{t,d}$ and $F_{f,d}$. However, the mass of the dropper in the middle of span and its clamp shall not be regarded.

6.2.2 Characteristic dimensions and parameter

The characteristic electromagnetic load per unit length on flexible main conductors in three-phase systems is given

- if the current flows along the whole length of the main conductor span with and without dropper by:

$$F' = \frac{\mu_0}{2\pi} 0,75 \frac{(I_k'')^2}{a} \frac{l_c}{l} \quad (19a)$$

- if the current flows along half of the length of the main conductor span and along the dropper by:

$$F' = \frac{\mu_0}{2\pi} 0,75 \frac{(I_k'')^2}{a} \frac{l_c/2 + l_v/2}{l} \quad (19b)$$

where

I_k'' is the three-phase initial symmetrical short-circuit current (r.m.s.);

a is the centre-line distance between main conductor mid-points;

l_c is the cord length of the main conductor in the span;

l_v is the cord length of the dropper.

For slack conductors which exert bending forces on the support insulators $l_c = l$. For spans with strained conductors $l_c = l - 2l_i$, where l_i is the length of one insulator chain.

In the case of two-line single-phase systems replace $0,75 (I_k'')^2$ in Equation (19) by $(I_{k2}'')^2$.

NOTE 1 The calculation procedure does not consider the contribution of the aperiodic component of the short-circuit current. This will, however, significantly influence the result only if the duration of the short-circuit current flow is less than 0,1 s. In this case reference is made to [2].

The ratio of electromagnetic force under short-circuit conditions to the gravitational force on a conductor is an important parameter given by

$$r = \frac{F'}{n m'_S g} \quad (20)$$

and gives the direction of the resulting force exerted on the conductor:

$$\delta_1 = \arctan r \quad (21)$$

The equivalent static conductor sag at midspan is given by

$$f_{es} = \frac{n m'_S g l^2}{8 F_{St}} \quad (22)$$

The period T of the conductor oscillations is given by

$$T = 2\pi \sqrt{0,8 \frac{f_{es}}{g}} \quad (23)$$

and applies for small swing-out angles without current flow in the conductor.

The resulting period T_{res} of the conductor oscillation during the short-circuit current flow is given by:

$$T_{res} = \frac{T}{\sqrt[4]{1+r^2} \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \left(\frac{\delta_1}{90^\circ} \right)^2 \right]} \quad (24)$$

where δ_1 shall be given in degrees.

The stiffness norm is given by:

$$N = \frac{1}{S l} + \frac{1}{n E_{eff} A_S} \quad (25)$$

NOTE 2 If the exact value of S is not known in Equation (25), the value $S = 100 \times 10^3$ N/m may be used for slack conductors which exert bending forces on support insulators.

NOTE 3 If the exact value of S for spans with strained conductors is not known, the value of **one** structure in following ranges may be used:

- 150×10^3 N/m to $1\,300 \times 10^3$ N/m at a rated voltage of 123 kV;
- 400×10^3 N/m to $2\,000 \times 10^3$ N/m at a rated voltage of 245 kV;
- 600×10^3 N/m to $3\,000 \times 10^3$ N/m at a rated voltage of 420 kV.

S in Equation (25) is the resulting spring constant of both fixing points.

E_{eff} is the actual Young's modulus

$$E_{\text{eff}} = \begin{cases} E \left[0,3 + 0,7 \sin \left(\frac{F_{\text{st}}}{n A_s \sigma_{\text{fin}}} 90^\circ \right) \right] & \text{for } \frac{F_{\text{st}}}{n A_s} \leq \sigma_{\text{fin}} \\ E & \text{for } \frac{F_{\text{st}}}{n A_s} > \sigma_{\text{fin}} \end{cases} \quad (26)$$

where

$$\sigma_{\text{fin}} = 50 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad (27)$$

σ_{fin} is the lowest value of the cable stress when Young's modulus becomes constant. The final Young's modulus E for stranded conductors shall be used.

The stress factor ζ of the main conductor is given by:

$$\zeta = \frac{(n g m'_s l)^2}{24 F_{\text{st}}^3 N} \quad (28)$$

During or at the end of the short-circuit current flow, the span will have oscillated out of the steady-state position to the angle given by:

$$\delta_{\text{end}} = \begin{cases} \delta_1 \left[1 - \cos \left(360^\circ \frac{T_{k1}}{T_{\text{res}}} \right) \right] & \text{for } 0 \leq \frac{T_{k1}}{T_{\text{res}}} \leq 0,5 \\ 2 \delta_1 & \text{for } \frac{T_{k1}}{T_{\text{res}}} > 0,5 \end{cases} \quad (29)$$

Insofar as the duration of the first short-circuit current flow T_{k1} as defined in 3.1.12 is known, the maximum swing-out angle δ_{max} may be determined as per Figure 6 or calculated as given below. Otherwise, or if T_{k1} is greater than the value $0,4 T$, then the value $0,4 T$ shall be used for T_{k1} in Equations (29), (32) and (35).

During or after the short-circuit current flow, the span without dropper in midspan will have oscillated to the maximum swing-out angle δ_{max} which is obtained with:

$$\chi = \begin{cases} 1 - r \sin \delta_{\text{end}} & \text{for } 0 \leq \delta_{\text{end}} \leq 90^\circ \\ 1 - r & \text{for } \delta_{\text{end}} > 90^\circ \end{cases} \quad (30)$$

from:

$$\delta_{\text{max}} = \begin{cases} 1,25 \arccos \chi & \text{for } 0,766 \leq \chi \leq 1 \\ 10^\circ + \arccos \chi & \text{for } -0,985 \leq \chi \leq 0,766 \\ 180^\circ & \text{for } \chi < -0,985 \end{cases} \quad (31)$$

NOTE 4 The calculated swing-out angle δ_{max} is the maximum value which can occur for the "worst case" which is a short-circuit duration less than or equal to the stated short-circuit duration T_{k1} .

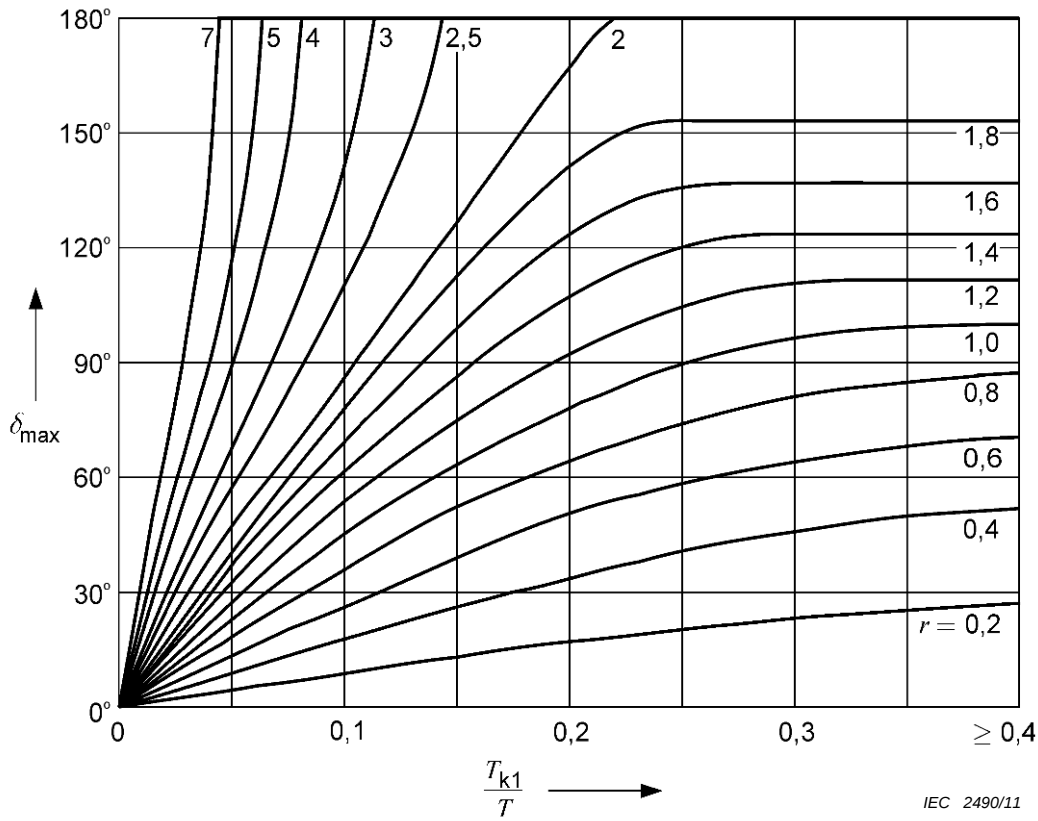


Figure 6 – Maximum swing out angle $\delta_{\max}$ for a given maximum short-circuit duration T_{k1}

For programming, refer to Equations (31) and (19) to (30).

6.2.3 Tensile force $F_{t,d}$ during short-circuit caused by swing out (short-circuit tensile force) without dropper in midspan

The load parameter φ is obtained as follows:

$$\varphi = \begin{cases} 3 \left(\sqrt{1+r^2} - 1 \right) & \text{for } T_{k1} \geq T_{res} / 4 \\ 3 \left(r \sin \delta_{end} + \cos \delta_{end} - 1 \right) & \text{for } T_{k1} < T_{res} / 4 \end{cases} \quad (32)$$

The factor ψ is a function of ζ and φ and is determined in Figure 7.

The tensile force $F_{t,d}$ is given by

$$F_{t,d} = F_{st} (1 + \varphi \psi) \quad (33)$$

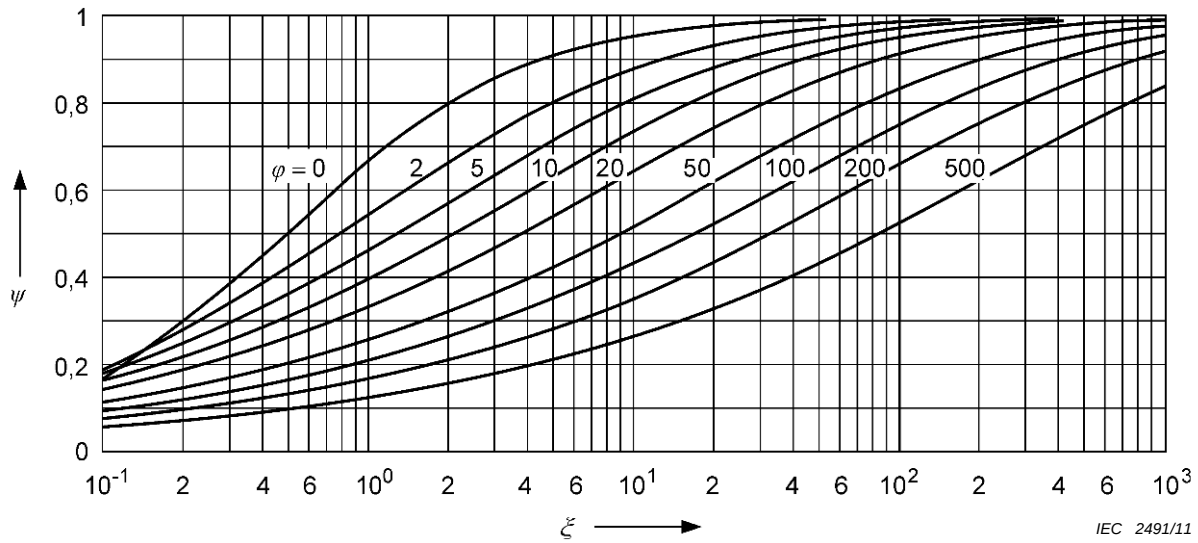


Figure 7 – Factor ψ for tensile force in flexible conductors

For programming, the equation is given in Clause A.6.

6.2.4 Dynamic change of sag due to elongation of conductor and change of shape of the conductor curve

The elastic expansion is given by:

$$\varepsilon_{\text{ela}} = N(F_{\text{t,d}} - F_{\text{st}}) \quad (34)$$

The short-circuit tensile force $F_{\text{t,d}}$ shall always be calculated with Equation (33) for spans without dropper in the middle of the span. For arrangements with dropper in the middle of the span, the actual swing-out angle δ shall be determined in 6.2.5. For this purpose, the elastic expansion for a span without dropper in the middle of the span shall be calculated with $F_{\text{t,d}}$ according to Equation (33).

The thermal expansion is given by:

$$\varepsilon_{\text{th}} = \begin{cases} c_{\text{th}} \left(\frac{I_k''}{n A_s} \right)^2 T_{\text{res}} / 4 & \text{for } T_{k1} \geq T_{\text{res}} / 4 \\ c_{\text{th}} \left(\frac{I_k''}{n A_s} \right)^2 T_{k1} & \text{for } T_{k1} < T_{\text{res}} / 4 \end{cases} \quad (35)$$

For c_{th} use:

- $0,27 \times 10^{-18} \text{ m}^4/(\text{A}^2\text{s})$ for aluminium, aluminium alloy and aluminium/steel conductors with a cross section ratio of Al/St > 6 ;
- $0,17 \times 10^{-18} \text{ m}^4/(\text{A}^2\text{s})$ for aluminium/steel conductors with a cross section ratio of Al/St ≤ 6 ;
- $0,088 \times 10^{-18} \text{ m}^4/(\text{A}^2\text{s})$ for copper.

In the case of two-line, single-phase systems, replace I_k'' in Equation (35) by I_{k2}'' .

The factor C_D allows for sag increases caused by elastic and thermal elongation of the conductor and is given by

$$C_D = \sqrt{1 + \frac{3}{8} \left[\frac{l}{f_{es}} \right]^2} (\varepsilon_{ela} + \varepsilon_{th}) \quad (36)$$

The factor C_F allows for a possible increase in the dynamic sag of the conductor caused by a change in shape of the conductor curve and is given by:

$$C_F = \begin{cases} 1,05 & \text{for } r \leq 0,8 \\ 0,97 + 0,1 r & \text{for } 0,8 < r < 1,8 \\ 1,15 & \text{for } r \geq 1,8 \end{cases} \quad (37)$$

The dynamic sag results with

$$f_{ed} = C_F C_D f_{es} \quad (38)$$

6.2.5 Tensile force $F_{t,d}$ during short-circuit caused by swing out (short-circuit tensile force) with dropper in the middle of the span

Droppers within a span have an effect to the movement of the main-conductor. Adequate short droppers hinder the swing-out of the main conductor and the maximum swing-out angle δ_{max} of a similar main conductor without dropper will not be reached.

NOTE 1 The equations may also be used if the upper fixing point of the dropper is apart from the middle up to 10 % of the main conductor length.

NOTE 2 As an alternative to the following equations, it may be calculated with 6.2.3.

The plane of the dropper in Figure 8 can be parallel or perpendicular to the main conductors. The actual swing-out angle due to the limitation of the swing-out movement by the dropper is given by:

$$\delta = \begin{cases} \arccos \frac{(h + f_{es})^2 + f_{ed}^2 - (l_v^2 - w^2)}{2 f_{ed} (h + f_{es})} & \text{plane parallel} \\ \arccos \frac{(h + f_{es})^2 + f_{ed}^2 - (l_v^2 - w^2)}{2 f_{ed} \sqrt{(h + f_{es})^2 + w^2}} + \arccos \frac{h + f_{es}}{\sqrt{(h + f_{es})^2 + w^2}} & \text{plane perpendicular} \end{cases} \quad (39)$$

with

h, w height of dropper, width of dropper according to Figure 8;

l_v cord length of the dropper.

If $l_v \geq \sqrt{(h + f_{es} + f_{ed})^2 + w^2}$ in the case of parallel plane or if $l_v \geq \sqrt{(h + f_{es})^2 + w^2} + f_{ed}$ in the case of perpendicular plane, the calculation has to be done with 6.2.2.

At the calculation of load parameter φ a distinction has to be made between the following cases:

- $\delta \geq \delta_1$:
The swing-out of the main conductor is not influenced within $T_{res} / 4$ by the dropper. The load parameter φ is calculated with

$$\varphi = \begin{cases} 3 \left(\sqrt{1+r^2} - 1 \right) & \text{for } T_{k1} \geq T_{res} / 4 \\ 3 \left(r \sin \delta_{end} + \cos \delta_{end} - 1 \right) & \text{for } T_{k1} < T_{res} / 4 \end{cases} \quad (40)$$

- $\delta < \delta_1$:

The swing-out of the main conductor is influenced within $T_{res} / 4$ by the dropper. The load parameter φ is calculated with

$$\varphi = \begin{cases} 3 \left(r \sin \delta + \cos \delta - 1 \right) & \text{for } \delta_{end} \geq \delta \\ 3 \left(r \sin \delta_{end} + \cos \delta_{end} - 1 \right) & \text{for } \delta_{end} < \delta \end{cases} \quad (41)$$

The factor ψ is a function of ζ and φ and given in Figure 7. The short-circuit tensile force $F_{t,d}$ is calculated with:

$$F_{t,d} = F_{st} (1 + \varphi \psi) \quad (42)$$

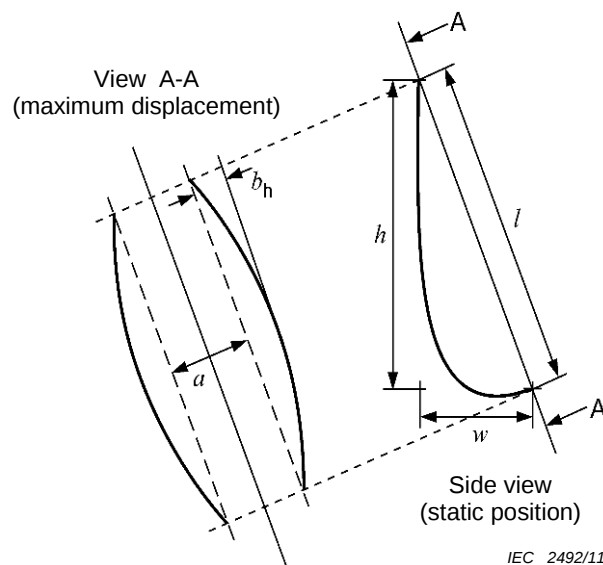


Figure 8 – Geometry of a dropper

6.2.6 Tensile force $F_{f,d}$ after short-circuit caused by drop (drop force)

On termination of the short-circuit the span oscillates or drops back. The maximum value $F_{f,d}$ for a span on termination of the drop is only significant for $r > 0,6$ if $\delta_{max} \geq 70^\circ$ and with a dropper in the middle of the span additionally $\delta \geq 60^\circ$. In this case, the drop force is given by:

$$F_{f,d} = 1,2 F_{st} \sqrt{1 + 8 \zeta \frac{\delta_{max}}{180^\circ}} \quad (43)$$

NOTE In short spans the bending stiffness of the span reduces the span drop, which means that the span drop is calculated to be too large if the span length is less than approximately 100 times the diameter of the single conductor, i.e. $l < 100 d$.

6.2.7 Horizontal span displacement b_h and minimum air clearance a_{min}

The maximum horizontal displacement in midspan, b_h , due to a short-circuit is given by the following for spans with slack conductors $l_c = l$ connected to support insulators and equipment:

$$b_h = \begin{cases} f_{ed} & \text{for } \delta_{\max} \geq 90^\circ \\ f_{ed} \sin \delta_{\max} & \text{for } \delta_{\max} < 90^\circ \end{cases} \quad \text{for } l_c = l \quad (44)$$

The maximum horizontal displacement in midspan, b_h , due to a short-circuit is given by the following for spans with strained conductors $l_c = l - 2l_i$ connected to portals with tension insulator strings:

$$b_h = \begin{cases} f_{ed} \sin \delta_1 & \text{for } \delta_{\max} \geq \delta_1 \\ f_{ed} \sin \delta_{\max} & \text{for } \delta_{\max} < \delta_1 \end{cases} \quad \text{for } l_c = l - 2l_i \quad (45)$$

$\delta_{\max}$, and δ_1 are defined in 6.2.2 and f_{ed} in 6.2.4.

The maximum horizontal displacement in midspan, b_h , due to a short-circuit for spans with strained conductors $l_c = l - 2l_i$ connected to portals with tension insulator strings and which have a dropper in midspan, is depending to the length of the dropper. It is calculated for the two cases:

- $\delta \geq \delta_{\max}$:

The dropper has no influence to the movement of the cable and the maximum horizontal displacement is calculated with:

$$b_h = \begin{cases} f_{ed} \sin \delta_1 & \text{for } \delta_{\max} \geq \delta_1 \\ f_{ed} \sin \delta_{\max} & \text{for } \delta_{\max} < \delta_1 \end{cases} \quad \text{for } l_c = l - 2l_i \quad (46)$$

- $\delta < \delta_{\max}$:

The dropper has influence to the movement of the cable and the maximum horizontal displacement is calculated with:

$$b_h = \begin{cases} f_{ed} \sin \delta_1 & \text{for } \delta \geq \delta_1 \\ f_{ed} \sin \delta & \text{for } \delta < \delta_1 \end{cases} \quad \text{for } l_c = l - 2l_i \quad (47)$$

δ_1 , f_{ed} and δ has to be determined according to 6.2.2, 6.2.4 and 6.2.5, respectively.

NOTE Alternatively to Equations (46) and (47), calculation may be done with Equation (45).

Due to a short-circuit, conductors in a single plane configuration are displaced at the midpoint of the span in the worst case in a circle of radius b_h about straight line connection of the two adjacent anchor points. The distance between the midpoints of the two main conductors during a line-to-line two-phase short-circuit is given in the worst case by:

$$a_{\min} = a - 2b_h \quad (48)$$

6.3 Effects on vertical main conductors (droppers)

Droppers according to this subclause are mainly cable connections running vertically which are normally used between differently high equipment or insulators. Precondition for the application of this subclause is that the resulting spring coefficient of the lower and upper fixing point does not stride fundamentally under the value $S = 100 \times 10^3$ N/m recommended in 6.2.2.

At bundle configuration, 6.4 shall be taken into account additionally.

Unlike the calculation of the conductors running horizontally according to 6.2 the height of the maximum short-circuit force at the lower fixing point and the cable deflection are independent

of cable mass, static cable tension and short-circuit duration. For the behaviour during the short-circuit, cable geometry consisting of width and height of the connection as well as the cable length l_v are relevant only.

Besides the geometry the bending force at the lower fixing point is, in addition, dependent on the short-circuit current and the centre line distance of conductors and is calculated for cable length $1,4 w \leq l_v \leq 3,3 w$ to:

$$F_{t,d} = \frac{5}{3} l_v \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{(I_k'')^2}{a} \frac{l_v}{w} \quad (49)$$

with sizes according Figure 8

where

- l_v is the length of cable;
- a is the centre line distance between conductors;
- w is the width of dropper.

The displacement depends on geometry only and is calculated for cable length $l_v \leq 2 l$ to:

$$b_h = \left[0,60 \sqrt{\frac{l_v}{l} - 1} + 0,44 \left(\frac{l_v}{l} - 1 \right) - 0,32 \ln \frac{l_v}{l} \right] \frac{l^2}{l_v} \quad (50)$$

with the diagonal distance l between two fixing points according to Figure 8.

6.4 Effects on bundled conductors

6.4.1 Characteristic dimensions and parameter

The following applies to regular bundle configurations, where the midpoints of the sub-conductors are located on a circle with equal distances a_s between adjacent sub-conductors.

For regular bundle configurations up to four subconductors, the tensile force is calculated by

$$F_{pi,d} = 1,1 F_{t,d} \quad (51)$$

if the clearance between sub-conductors and the configuration of the spacers are such that the sub-conductors of the bundle clash effectively during a short-circuit. $F_{t,d}$ is calculated in 6.2.

Sub-conductors are considered to clash effectively if the clearance a_s between the midpoints of adjacent sub-conductors, as well as the distance l_s between two adjacent spacers fulfil either Equations (52) or (53):

$$a_s / d \leq 2,0 \quad \text{and} \quad l_s \geq 50 a_s \quad (52)$$

$$a_s / d \leq 2,5 \quad \text{and} \quad l_s \geq 70 a_s \quad (53)$$

If the regular bundle configuration does not fulfil the conditions stated above, the following equations apply to calculating $F_{pi,d}$.

The short-circuit current force is given by:

$$F_v = (n-1) \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{I_k''}{n} \right)^2 \frac{l_s}{a_s} \frac{\nu_2}{\nu_3} \quad (54)$$

In single-phase a.c. systems, I_k'' in Equations (54), (55), (60) and (63) shall be replaced by I_{k2}'' . If the line-to-earth initial short-circuit current I_{k1}'' is greater than the three-phase initial symmetrical short-circuit current I_k'' , the latter shall be replaced by I_{k1}'' in Equations (54), (55), (60) and (63).

The factor ν_2 is given by Figure 9, as a function of

$$\nu_1 = f \frac{1}{\sin \frac{180^\circ}{n}} \sqrt{\frac{(a_s - d) m_s'}{\frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{I_k''}{n} \right)^2 \frac{n-1}{a_s}}} \quad (55)$$

where f is the system frequency. The factor ν_3 is given by Figure 10.

The strain factors characterizing the contraction of the bundle shall be calculated from

$$\varepsilon_{st} = 15 \frac{F_{st} l_s^2 N}{(a_s - d)^2} \left(\sin \frac{180^\circ}{n} \right)^2 \quad (56)$$

$$\varepsilon_{pi} = 0,375 \ n \frac{F_v l_s^3 N}{(a_s - d)^3} \left(\sin \frac{180^\circ}{n} \right)^3 \quad (57)$$

The parameter

$$j = \sqrt{\frac{\varepsilon_{pi}}{1 + \varepsilon_{st}}} \quad (58)$$

determines the bundle configuration during short-circuit current flow as follows:

- $j \geq 1$ The sub-conductors clash. The tensile force $F_{pi,d}$ is calculated in 6.4.2;
- $j < 1$ The sub-conductors reduce their distance but do not clash. The tensile force $F_{pi,d}$ is calculated in 6.4.3.

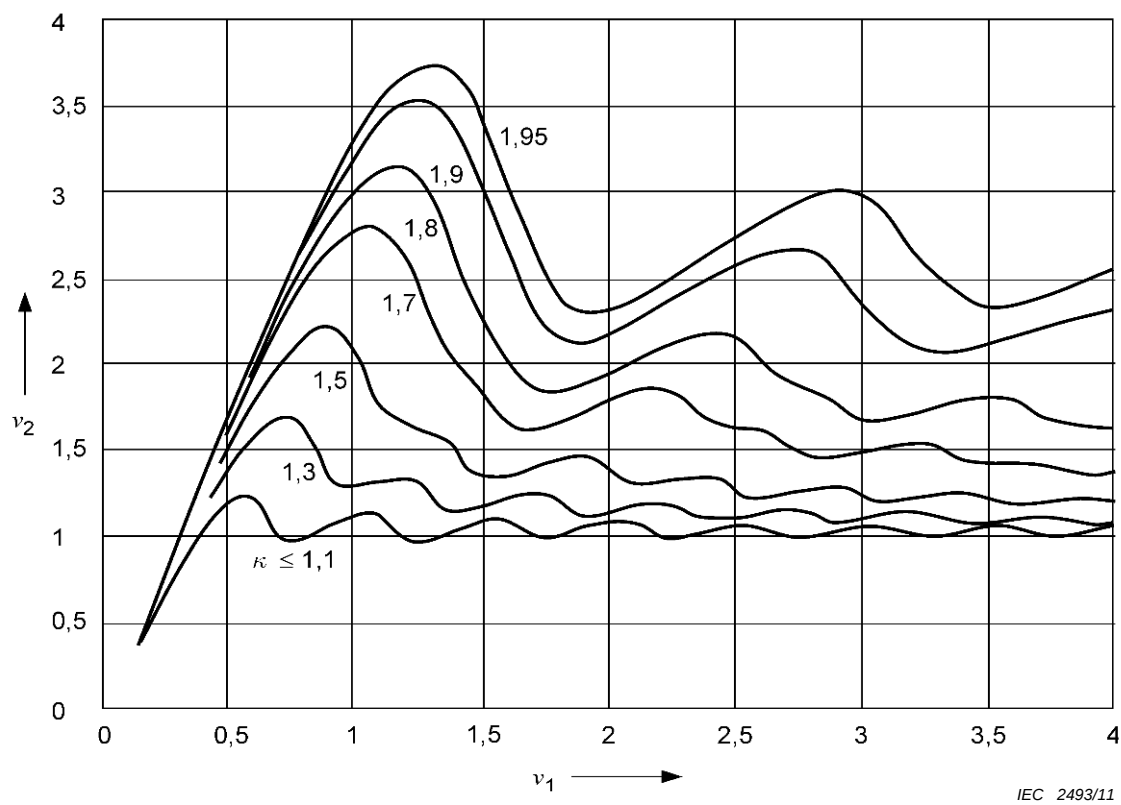


Figure 9 – ν_2 as a function of ν_1

For programming, the equation is given in Clause A.7.

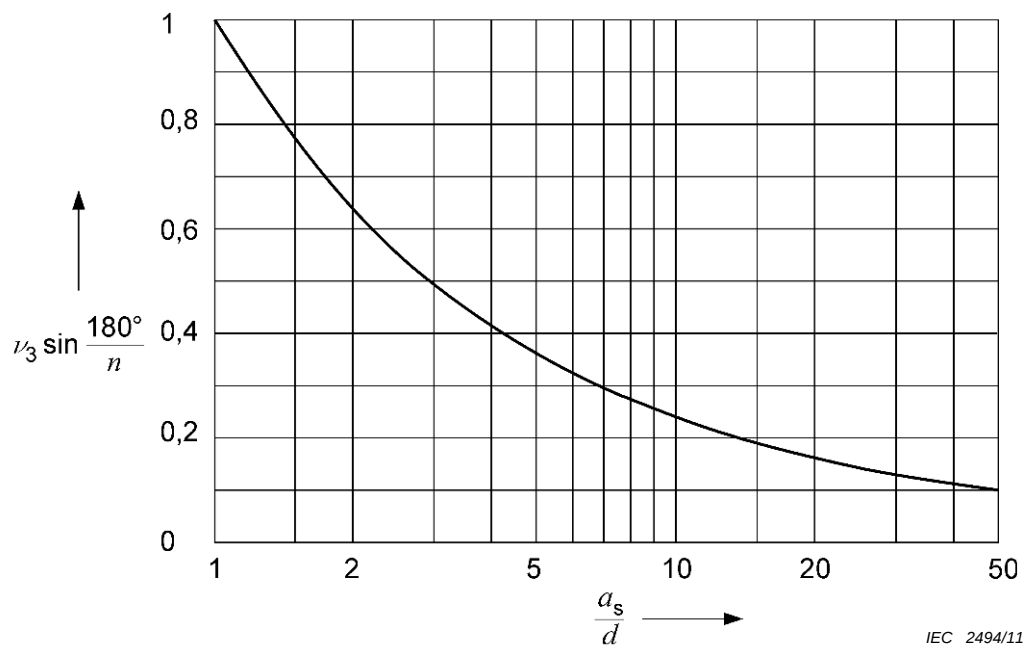


Figure 10 – $\nu_3 \times \sin \frac{180^\circ}{n}$ as a function of a_s/d

For programming, the equation is given in Clause A.8.

6.4.2 Tensile force $F_{pi,d}$ in the case of clashing sub-conductors

If $j \geq 1$, the tensile force $F_{pi,d}$ is obtained from

$$F_{pi,d} = F_{st} \left(1 + \frac{\nu_e}{\varepsilon_{st}} \xi \right); \quad (59)$$

ξ is given by Figure 11.

ν_e is given by

$$\nu_e = \frac{1}{2} + \left[\frac{9}{8} n (n-1) \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{I_k''}{n} \right)^2 N \nu_2 \left(\frac{l_s}{a_s - d} \right)^4 \frac{\left(\sin \frac{180^\circ}{n} \right)^4}{\xi^3} \left\{ 1 - \frac{\arctan \sqrt{\nu_4}}{\sqrt{\nu_4}} \right\} - \frac{1}{4} \right]^{1/2} \quad (60)$$

with

$$\nu_4 = \frac{a_s - d}{d} \quad (61)$$

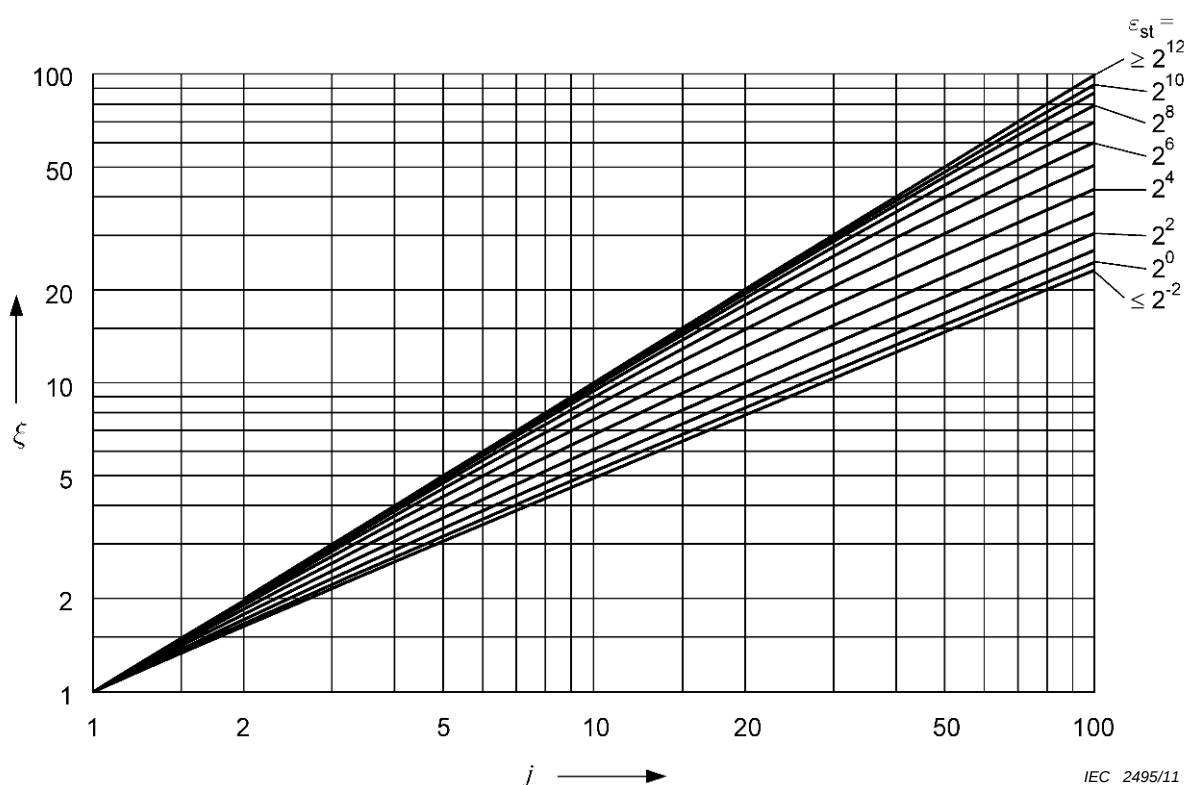


Figure 11 – ξ as a function of j and ε_{st}

For programming, the equation is given in Clause A.9.

6.4.3 Tensile force $F_{pi,d}$ in the case of non-clashing sub-conductors

If $j < 1$, the tensile force $F_{pi,d}$ is obtained from

$$F_{pi,d} = F_{st} \left(1 + \frac{v_e}{\varepsilon_{st}} \eta^2 \right) \quad (62)$$

η is then given by one of the diagrams in Figure 12, depending on the parameter a_s/d .

v_e is given by

$$v_e = \frac{1}{2} + \left[\frac{9}{8} n(n-1) \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{I_k''}{n} \right)^2 N v_2 \left(\frac{l_s}{a_s - d} \right)^4 \frac{\left(\sin \frac{180^\circ}{n} \right)^4}{\eta^4} \left\{ 1 - \frac{\arctan \sqrt{v_4}}{\sqrt{v_4}} \right\} - \frac{1}{4} \right]^{1/2} \quad (63)$$

with

$$v_4 = \eta \frac{a_s - d}{a_s - \eta(a_s - d)} \quad (64)$$

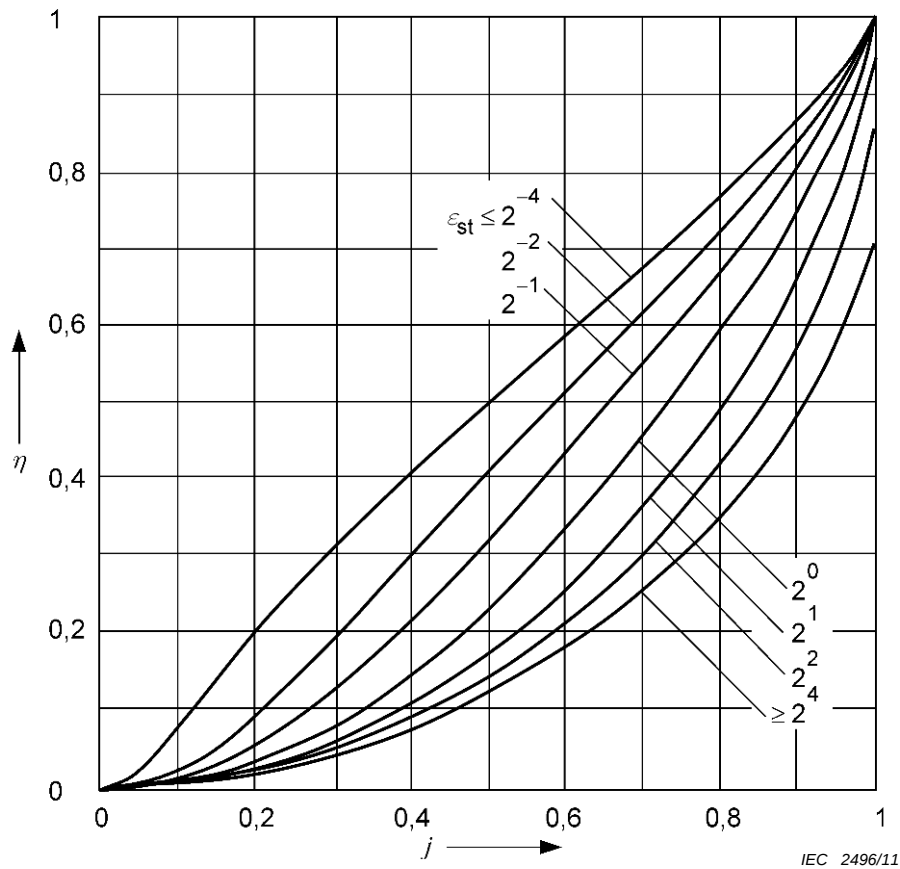


Figure 12a – $2,5 < a_s/d \leq 5,0$

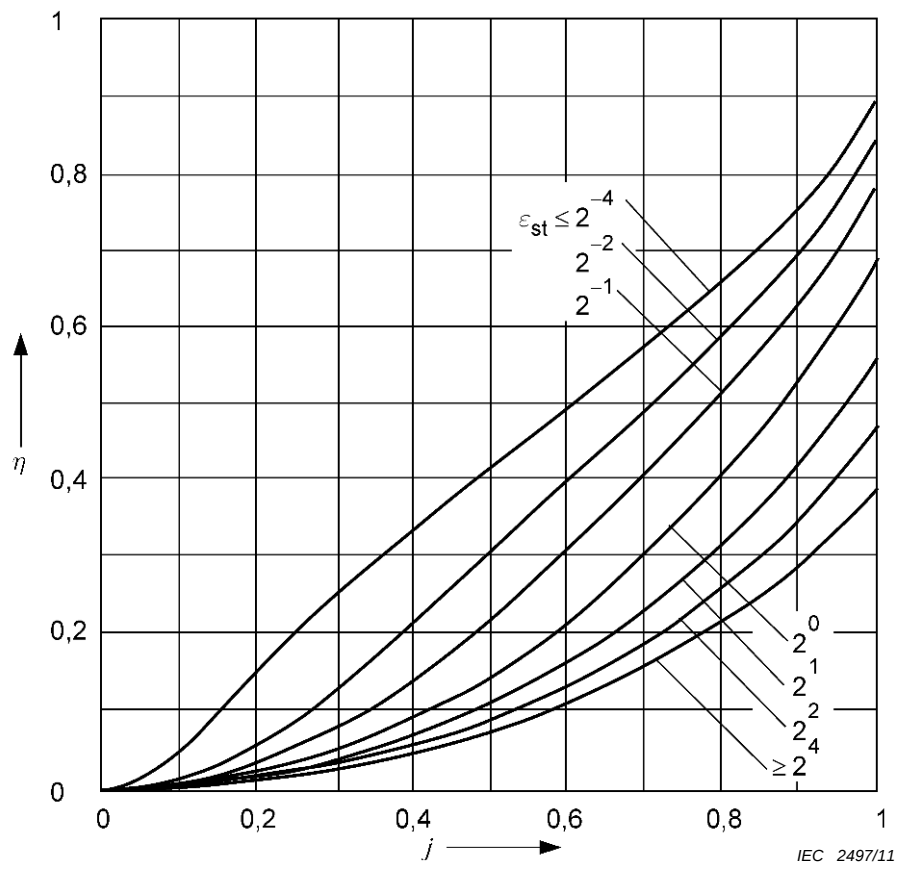
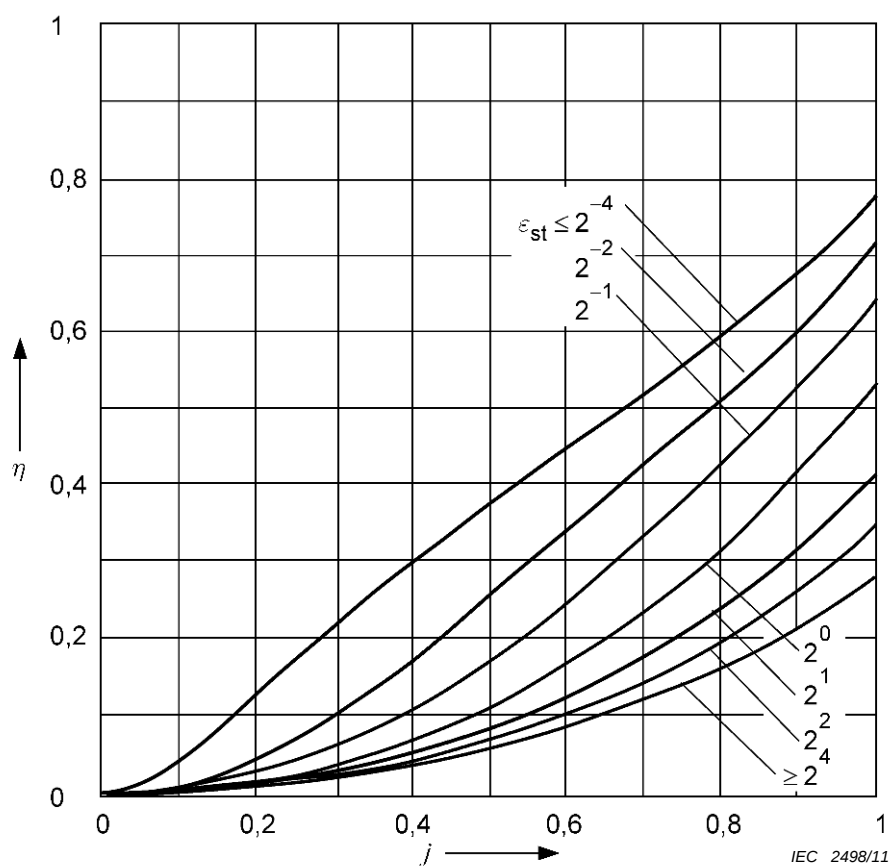


Figure 12b – $5,0 < a_s/d \leq 10,0$

Figure 12c – $10,0 < a_s/d \leq 15,0$ Figure 12 – η as a function of j and ε_{st}

For programming, the equation is given in Clause A.10.

6.5 Structure loads due to flexible conductors

6.5.1 Design load for post insulators, their supports and connectors

The maximum value of $F_{t,d}$, $F_{f,d}$ or $F_{pi,d}$ for flexible conductor arrangements shall not be greater than the withstand value given by the manufacturer of supports and insulators. For an insulator stressed by a bending force, the rated withstand value is given as a force acting at the insulator head.

NOTE 1 For a force acting at a point higher than the insulator head, a withstand value lower than the rated withstand value should be used, based on the withstand bending moment at the critical insulator cross-section.

Connectors for flexible conductors shall be rated on the basis of the maximum value of $1,5 F_{t,d}$, $1,0 F_{f,d}$ or $1,0 F_{pi,d}$.

NOTE 2 The factor 1,5 takes into account that the energy of oscillations is absorbed by the mass of the insulators.

6.5.2 Design load for structures, insulators and connectors with tensile forces transmitted by insulator chains

The maximum value of $F_{t,d}$, $F_{f,d}$ or $F_{pi,d}$ of flexible conductor spans shall be applied to the structure, the insulators and the connectors as a static load.

NOTE 1 In the design of three-phase structures for three-phase short-circuits it should be remembered that the maximum value of $F_{t,d}$ or $F_{f,d}$ will appear in two phases, and the third phase will be subjected only to the static tension.

NOTE 2 In the design of three-phase structures for three-phase short-circuits, different maximum values of $F_{pi,d}$ can occur at different times in the three phases. This effect is met approximately by applying the calculated $F_{pi,d}$ to two phases of the structure.

6.5.3 Design load for foundations

For the design of foundations, 6.5.1 and 6.5.2 apply accordingly.

NOTE Due to inertia and the dynamic character of a short-circuit, effects of instability need not be regarded at the design stage of monolithic foundations (monobloc foundations). It may be assumed that stability is given if a design according to other load cases and loads such as static tensile force or wind load has taken place.

7 The thermal effect on bare conductors

7.1 General

The heating of conductors due to short-circuit currents involves several phenomena of a non-linear character and other factors that have been either neglected or approximated in order to make the mathematical approach possible.

For the purpose of this clause the following assumptions have been made:

- skin-effect (magnetic influence of a conductor itself) and proximity-effect (magnetic influence of nearby parallel conductors) are disregarded;
- resistance-temperature characteristic is assumed linear;
- the specific heat of the conductor is considered constant;
- the heating is considered adiabatic.

When repeated short-circuits occur with a short-time interval between them (e.g. rapid automatic reclosing) the cooling in the short dead-time is of relatively little importance, and the heating can still be considered adiabatic. In cases where the dead-time interval is of longer duration (e.g. delayed automatic reclosing), the heat loss may be taken into account.

The calculation does not take into account the skin effect or the proximity effect, i.e. the current is regarded as evenly distributed over the conductor cross-section area. For large cross sections above 600 mm², the skin effect shall be taken into account. For such calculations, reference should be made to the literature.

NOTE If the main conductor is composed of sub-conductors, uneven current distribution between the sub-conductors will influence the temperature rise of sub-conductors.

7.2 Calculation of thermal equivalent short-circuit current

The thermal equivalent short-circuit current shall be calculated according to IEC 60909-0 using the short-circuit current r.m.s. value and the factors for the time-dependent heat effects of the d.c. and a.c. components of the short-circuit current. If by automatic reclosure a number of short-circuits occur, a resulting thermal equivalent short-circuit current has to be calculated.

For the calculation of the thermal equivalent short-circuit current I_{th} in a three-phase system, the three-phase balanced short-circuit is normally decisive. For single-phase systems, the thermal equivalent short-circuit current should be calculated according to IEC 60909-0 in the same way.

For current-limiting devices the thermal equivalent short-circuit current I_{th} and the associated duration of short-circuit current T_k are given by the manufacturer.

7.3 Calculation of temperature rise and rated short-time withstand current density for conductors

The temperature rise of a conductor caused by a short-circuit is a function of the duration of the short-circuit current, the thermal equivalent short-circuit current and the conductor material.

By use of the graphs in Figure 13, it is possible to calculate the temperature rise of a conductor when the rated short-time withstand current density is known, or vice versa.

The recommended highest temperatures during a short-circuit for different conductors are given in Table 6. If they are reached, a negligible decrease in strength can occur which does not empirically jeopardize the safety in operation. The maximum permitted temperature of the support shall be taken into account.

Table 6 – Recommended highest temperatures for mechanically stressed conductors during a short-circuit

Type of conductor	Recommended highest conductor temperature during a short-circuit °C
Bare conductors, solid or stranded: Cu, Al or Al alloy	200
Bare conductors, solid or stranded: steel	300

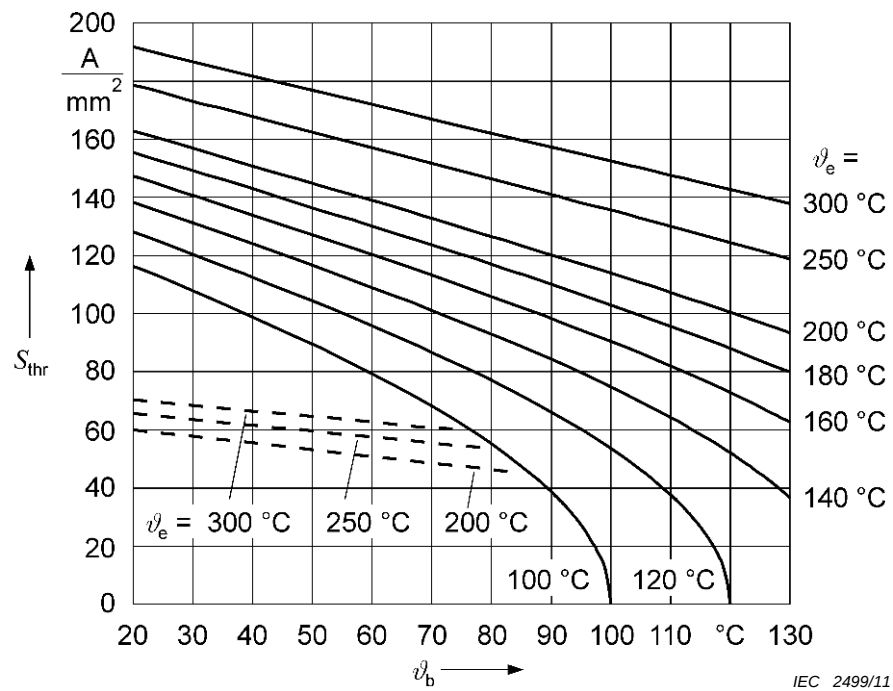


Figure 13a – Full lines, copper; dotted lines, low-alloyed steel

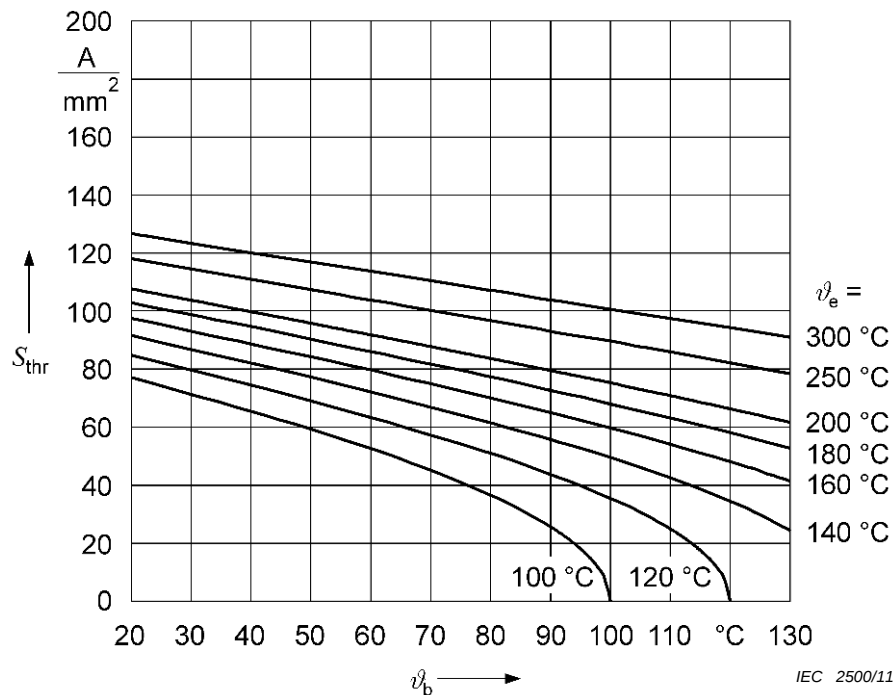


Figure 13b – Aluminium, aluminium alloy, aluminium conductor steel reinforced (ACSR)

Figure 13 – Relation between rated short-circuit withstand current density ($T_{kr} = 1$ s) and conductor temperature

For programming, the equations are given in Clause A.11.

7.4 Calculation of thermal short-time strength for different durations of the short-circuit

Bare conductors have sufficient thermal short-time strength as long as the following relation holds for the thermal equivalent short-circuit current density S_{th} for all T_k values:

$$S_{th} \leq S_{thr} \sqrt{\frac{T_{kr}}{T_k}} \quad (65)$$

The rated short-time withstand current density S_{thr} is shown in Figure 13, for $T_{kr} = 1$ s.

The steel core of the steel reinforced aluminium conductor (ACSR) shall not be taken into account when calculating the cross-section area for the estimation of the current density.

When a number of short-circuits occur with a short time interval between them, the resulting short-circuit duration is

$$T_k = \sum_{i=1}^n T_{ki} \quad (66)$$

Annex A (normative)

Equations for calculation of diagrams

A.1 Symbols

In addition to 3.2 the following symbols are used:

a_{sw}	Effective distance between the sub-conductor of a bundle	m
c	Specific thermal capacity	J/(kg K)
c_c	Factor for the stiffening of connecting pieces	1
f_η	Factor to describe the approach of the sub-conductor in the bundle	1
T_{pi}	Time from the start of the short-circuit up to the arriving of $F_{pi,d}$	s
y_a	Clearance of non-clashing bundles during the short-circuit	m
α_{20}	Temperature coefficient	1/K
ξ_m	Factor for the influence of the mass of connecting pieces on the relevant natural frequency	1
κ_{20}	Specific conductivity at 20 °C	1/(Ωm)
ρ	Specific mass	kg/m ³

A.2 Figure 1

The factor k_{1s} is given by the following equation:

$$\begin{aligned}
 k_{1s} = & \left\{ - \left(\frac{(a_{1s}/c_s) + 1}{b_s/c_s} \right)^3 \ln \frac{[(a_{1s}/c_s) + 1]^2 + (b_s/c_s)^2}{[(a_{1s}/c_s) + 1]^2} + 2 \left(\frac{a_{1s}/c_s}{b_s/c_s} \right)^3 \ln \frac{(a_{1s}/c_s)^2 + (b_s/c_s)^2}{(a_{1s}/c_s)^2} \right. \\
 & - \left(\frac{(a_{1s}/c_s) - 1}{b_s/c_s} \right)^3 \ln \frac{[(a_{1s}/c_s) - 1]^2 + (b_s/c_s)^2}{[(a_{1s}/c_s) - 1]^2} \\
 & + 3 \left[\frac{a_{1s}/c_s}{b_s/c_s} \ln \frac{[(a_{1s}/c_s) + 1]^2 + (b_s/c_s)^2}{(a_{1s}/c_s)^2 + (b_s/c_s)^2} + \frac{1}{b_s/c_s} \ln \frac{[(a_{1s}/c_s) + 1]^2 + (b_s/c_s)^2}{[(a_{1s}/c_s) - 1]^2 + (b_s/c_s)^2} \right. \\
 & \left. \left. - \frac{a_{1s}/c_s}{b_s/c_s} \ln \frac{(a_{1s}/c_s)^2 + (b_s/c_s)^2}{[(a_{1s}/c_s) - 1]^2 + (b_s/c_s)^2} \right] \right. \\
 & + 6 \left[\left(\frac{(a_{1s}/c_s) + 1}{b_s/c_s} \right)^2 \arctan \frac{b_s/c_s}{(a_{1s}/c_s) + 1} - 2 \left(\frac{a_{1s}/c_s}{b_s/c_s} \right)^2 \arctan \frac{b_s/c_s}{a_{1s}/c_s} \right. \\
 & \left. + \left(\frac{(a_{1s}/c_s) - 1}{b_s/c_s} \right)^2 \arctan \frac{b_s/c_s}{(a_{1s}/c_s) - 1} \right] \\
 & \left. + 2 \left[\arctan \frac{(a_{1s}/c_s) + 1}{b_s/c_s} - 2 \arctan \frac{a_{1s}/c_s}{b_s/c_s} + \arctan \frac{(a_{1s}/c_s) - 1}{b_s/c_s} \right] \right\} \frac{a_{1s}/c_s \cdot b_s/c_s}{6}
 \end{aligned}$$

A.3 Figure 3

The factor e is given by the equation:

$$e = \frac{c_c}{\sqrt{1 + \xi_m \frac{m_z}{n m'_s l}}}$$

with

k	l_s / l	ξ_m	c_c	
			Figure 3b	Figure 3c
0	–	0,0	1,0	1,0
1	0,5	2,5	1,0	1,0
2	0,33	3,0	1,48	1,0
2	0,5	1,5	1,75	1,0
3	0,25	4,0	1,75	1,0
4	0,2	5,0	2,14	1,0
5	0,17	6,0	2,46	1,0
6	0,14	7,0	2,77	1,0

A.4 Figure 4

The factor V_F is given by:

f_{cm}/f	Factor V_F	
	Three-phase short-circuit	Line-to-line-short-circuit
<0,04	$0,232 + 3,52 e^{-145\kappa} + 0,166 \lg(f_{cm}/f)^a$	
0,04 ... 0,8	maximum value of V_{F1} or V_{F2} $V_{F1} = 0,839 + 3,52 e^{-145\kappa} + 0,6 \lg(f_{cm}/f)^a$ $V_{F2} = 2,38 + 6,00 \lg(f_{cm}/f)$	
0,8 ... 1,2		1,8
1,2 ... 1,6	$1,23 + 7,2 \lg(f_{cm}/f)$	1,8
1,6 ... 2,4	2,7	1,8
2,4 ... 2,74	$8,59 - 15,5 \lg(f_{cm}/f)$	1,8
2,74 ... 3,0	$8,59 - 15,5 \lg(f_{cm}/f)$	
3,0 ... 6,0	$1,50 - 0,646 \lg(f_{cm}/f)$	
>6,0	1,0	
^a If $\kappa > 1,6$ then $\kappa = 1,6$ shall be used.		

The factor $V_{\sigma m}$ is given by:

f_{cm}/f	Factor $V_{\sigma m}$
$<0,04$	$0,0929 + 4,49 e^{-1,68\kappa} + 0,0664 \lg(f_{cm}/f)^a$
$0,04 \dots 0,8$	minimum value of $V_{\sigma 1}$ or $V_{\sigma 2}$ $V_{\sigma 1} = 0,756 + 4,49 e^{-1,68\kappa} + 0,54 \lg(f_{cm}/f)^a$ $V_{\sigma 2} = 1,0$
$>0,8$	1
^a If $\kappa > 1,6$ then $\kappa = 1,6$ shall be used.	

In the case of $V_{\sigma s}$, the same equations shall be used as for $V_{\sigma m}$, but f_{cm}/f shall be replaced by f_{cs}/f .

A.5 Figure 5

The factors V_{rm} and V_{rs} are given by:

$$V_{rm} = \begin{cases} 1,8 & \text{for } f_{cm}/f \leq 0,05 \\ 1,0 - 0,615 \lg(f_{cm}/f) & \text{for } 0,05 < f_{cm}/f < 1,0 \\ 1,0 & \text{for } f_{cm}/f \geq 1,0 \end{cases}$$

$$V_{rs} = \begin{cases} 1,8 & \text{for } f_{cs}/f \leq 0,05 \\ 1,0 - 0,615 \lg(f_{cs}/f) & \text{for } 0,05 < f_{cs}/f < 1,0 \\ 1,0 & \text{for } f_{cs}/f \geq 1,0 \end{cases}$$

A.6 Figure 7

Factor ψ is a function of ζ and φ . It can be calculated as the real solution of the equation:

$$\varphi^2 \psi^3 + \varphi(2 + \zeta) \psi^2 + (1 + 2\zeta) \psi - \zeta(2 + \varphi) = 0$$

with $0 < \psi \leq 1$.

A.7 Figure 9

The factor v_2 is given by:

$$v_2 = 1 - \frac{\sin(4\pi f T_{pi} - 2\gamma) + \sin 2\gamma}{4\pi f T_{pi}} + \frac{f\tau}{f T_{pi}} \left(1 - e^{-\frac{2f T_{pi}}{f\tau}} \right) \sin^2 \gamma$$

$$- \frac{8\pi f \tau \sin \gamma}{1 + (2\pi f \tau)^2} \left\{ \left(2\pi f \tau \frac{\cos(2\pi f T_{pi} - \gamma)}{2\pi f T_{pi}} + \frac{\sin(2\pi f T_{pi} - \gamma)}{2\pi f T_{pi}} \right) e^{-\frac{f T_{pi}}{f\tau}} + \frac{\sin \gamma - 2\pi f \tau \cos \gamma}{2\pi f T_{pi}} \right\}$$

where τ is the time constant of the network and can be calculated according to IEC 60909-0:

$$\frac{1}{\tau} = -\frac{2\pi f}{3} \ln \frac{\kappa - 1,02}{0,98} \quad \text{with} \quad \kappa \geq 1,1 \quad \text{and} \quad \gamma = \arctan(2\pi f \tau)$$

If $\kappa < 1,1$ then $\kappa = 1,1$ shall be used.

$f T_{pi}$ is the solution of the equation:

$$v_1 = f T_{pi} \sqrt{v_2}$$

A.8 Figure 10

The factor v_3 is given by:

$$v_3 = \frac{d/a_s}{\sin \frac{180^\circ}{n}} \frac{\sqrt{(a_s/d) - 1}}{\arctan \sqrt{(a_s/d) - 1}}$$

A.9 Figure 11

ξ is the real solution of the equation:

$$\xi^3 + \varepsilon_{st} \xi^2 - j^2 (1 + \varepsilon_{st}) = 0$$

with $j^{2/3} \leq \xi \leq j$

A.10 Figure 12

The function η in Figure 12 may be calculated numerically by solving the cubic equation with non-linear coefficients:

$$\eta^3 + \varepsilon_{st} \eta - j^2 (1 + \varepsilon_{st}) f_\eta = 0$$

with $0 < \eta \leq 1$, and

$$f_\eta = \frac{v_3}{a_{sw}/a_s}$$

$$a_{sw}/a_s = \frac{2 y_a/a_s}{\sin \frac{180^\circ}{n}} \frac{\sqrt{\frac{1 - 2 y_a/a_s}{2 y_a/a_s}}}{\arctan \sqrt{\frac{1 - 2 y_a/a_s}{2 y_a/a_s}}}$$

$$2 y_a/a_s = 1 - \eta (1 - d/a_s)$$

A.11 Figure 13

The rated short-circuit withstand current density S_{thr} is given by:

$$S_{\text{thr}} = \frac{1}{\sqrt{T_{\text{kr}}}} \sqrt{\frac{\kappa_{20} c \rho}{\alpha_{20}} \ln \frac{1 + \alpha_{20} (\vartheta_{\text{e}} - 20 \text{ °C})}{1 + \alpha_{20} (\vartheta_{\text{b}} - 20 \text{ °C})}}$$

with the following data of material:

Symbol	SI-unit	Copper	Aluminium alloy, aluminium conductor Steel reinforced (ACSR)	Steel
c	J/(kg K)	390	910	480
ρ	kg/m ³	8 900	2 700	7 850
κ_{20}	1/(Ωm)	56×10^6	$34,8 \times 10^6$	$7,25 \times 10^6$
α_{20}	1/K	0,003 9	0,004	0,004 5

If base-temperatures other than 20 °C are used, the equation for S_{thr} has to be changed.

Bibliography

- [1] IEC 61936-1, *Power installations exceeding 1 kV a.c. – Part 1: Common rules*
 - [2] CIGRE, *The mechanical effects of short-circuit currents in open air substations (Rigid and flexible conductors)*. Vol. 105. Paris: CIGRÉ SC 23, WG 11, 1996.
 - [3] CIGRE, *The mechanical effects of short-circuit currents in open air substations (Part II)*. Vol. 214. Paris: CIGRÉ SC 23, WG 03, 2002.
-

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	55
1 Domaine d'application	57
2 Références normatives	57
3 Termes, définitions, symboles et unités	58
3.1 Termes et définitions	58
3.2 Symboles et unités	60
4 Généralités	63
5 Installations comportant des conducteurs rigides	64
5.1 Généralités	64
5.2 Calcul des forces électromagnétiques	64
5.2.1 Calcul de la valeur de crête de la force entre les conducteurs principaux pendant un court-circuit triphasé	64
5.2.2 Calcul de la valeur de crête de la force entre les conducteurs principaux pendant un court-circuit biphasé	64
5.2.3 Calcul de la valeur de crête des forces entre sous-conducteurs coplanaires	65
5.3 Distance équivalente entre conducteurs principaux et entre sous- conducteurs	65
5.4 Calcul des contraintes dans les conducteurs rigides	67
5.4.1 Calcul des contraintes	67
5.4.2 Module de section et facteur q des conducteurs principaux composés de sous-conducteurs	68
5.4.3 Contrainte admissible dans un conducteur	71
5.5 Charges de structure résultant des conducteurs rigides	72
5.6 Prise en compte du réenclenchement automatique	72
5.7 Calcul tenant compte de l'oscillation des conducteurs	73
5.7.1 Généralités	73
5.7.2 Calcul de la fréquence propre appropriée	74
5.7.3 Facteurs V_F , $V_{\sigma m}$, $V_{\sigma s}$, V_{rm} et V_{rs}	74
6 Installations comportant des conducteurs souples	77
6.1 Généralités	77
6.2 Effets sur les conducteurs principaux horizontaux	78
6.2.1 Généralités	78
6.2.2 Dimensions et paramètres caractéristiques	78
6.2.3 Force de tension $F_{t,d}$ pendant un court-circuit provoqué par une oscillation (force de tension de court-circuit) sans billette de support en milieu de portée	81
6.2.4 Modification dynamique de la flèche résultant de l'allongement du conducteur et de la déformation de la courbe du conducteur	82
6.2.5 Force de tension $F_{t,d}$ pendant un court-circuit provoqué par une oscillation (force de tension de court-circuit) avec billette de support en milieu de portée	83
6.2.6 Force de tension $F_{f,d}$ après un court-circuit provoqué par une chute (force de chute)	84
6.2.7 Déplacement horizontal de la portée b_h et distance minimale dans l'air a_{min}	85
6.3 Effets sur les conducteurs principaux verticaux (billettes de support)	85
6.4 Effets des conducteurs en faisceau	86

6.4.1	Dimensions et paramètres caractéristiques.....	86
6.4.2	Force de tension de $F_{pi,d}$ dans le cas de sous-conducteurs s'entrechoquant.....	89
6.4.3	Force de tension de $F_{pi,d}$ dans le cas de sous-conducteurs ne s'entrechoquant pas	90
6.5	Charges de structure résultant des conducteurs souples	92
6.5.1	Charge de conception pour les supports isolants, leurs supports et leurs connecteurs	92
6.5.2	Charge de conception pour les structures, les isolateurs et les connecteurs avec des forces de tension transmises par les chaînes d'isolateurs.....	93
6.5.3	Charge de conception pour les fondations	93
7	Effet thermique sur les conducteurs nus	93
7.1	Généralités.....	93
7.2	Calcul du courant de court-circuit équivalent thermique.....	93
7.3	Calcul de l'échauffement et de la densité de courant de tenue de courte durée assigné des conducteurs	94
7.4	Calcul de la résistance thermique de courte durée pour différentes durées de court-circuit	96
Annexe A (normative) Équations pour la détermination des schémas.....		97
Bibliographie.....		102
Figure 1 – Facteur k_{1s} pour le calcul de la distance équivalente des conducteurs		66
Figure 2 – Direction de la charge et axe de flexion dans le cas de dispositions à conducteurs multiples		69
Figure 3 – Facteur e pour l'influence des pièces de liaison dans l'Equation (17).....		75
Figure 4 – Facteurs V_F , $V_{\sigma m}$ et $V_{\sigma s}$ à utiliser dans le cas de courts-circuits triphasés ou biphasés		76
Figure 5 – Facteurs V_{rm} et V_{rs} à utiliser dans le cas de réenclenchement automatique triphasé		77
Figure 6 – Angle d'oscillation maximal δ_{max} relatif à une durée de court-circuit maximale donnée T_{k1}		81
Figure 7 – Facteur ψ pour la force de tension des conducteurs souples		82
Figure 8 – Géométrie d'une billette de support.....		84
Figure 9 – Relation entre v_2 et v_1		88
Figure 10 – Relation entre $v_3 \sin \frac{180^\circ}{n}$ et a_s/d		88
Figure 11 – Relation entre ξ et j et ε_{st}		89
Figure 12 – Relation entre η et j ainsi que ε_{st}		92
Figure 13 – Relation entre la densité de courant de tenue de court-circuit assigné ($T_{kr} = 1$ s) et la température du conducteur		95
Tableau 1 – Distance équivalente entre sous-conducteurs, a_s pour des sections rectangulaires ^a		67
Tableau 2 – Valeurs maximales possibles de $V_{\sigma m} V_{rm}$, $V_{\sigma s} V_{rs}$, $V_F V_{rm}$		70
Tableau 3 – Facteurs α , β , γ pour différentes dispositions de supports de jeux de barres		71
Tableau 4 – Facteur q		73

Tableau 5 – Modules de section W_m de conducteurs principal avec deux raidisseurs ou plus entre deux supports adjacents. Les raidisseurs sont représentés en noir	73
Tableau 6 – Températures maximales recommandées pour des conducteurs contraints mécaniquement pendant un court-circuit.....	94

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**COURANTS DE COURT-CIRCUIT –
CALCUL DES EFFECTS –****Partie 1: Définitions et méthodes de calcul****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 elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de la CEI. La CEI n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 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 brevet. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 60865-1 a été établie par comité d'études 73 de la CEI: Courants de court-circuit.

Cette troisième édition annule et remplace la deuxième édition parue en 1993. Cette édition constitue une révision technique.

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

- Les déterminations liées à la refermeture automatique ainsi qu'aux conducteurs rigides ont été révisées.
- L'influence des billettes de support en milieu de portée sur la portée a été incluse.

- Pour le raccordement de câbles verticaux, le déplacement et la force de traction sur le point de fixation le plus bas peuvent à présent être calculés.
- Des recommandations supplémentaires liées aux charges pour les fondations dues aux forces de traction ont été ajoutées.
- Le paragraphe relatif à la détermination du courant de court-circuit thermique équivalent a été supprimé (il fait à présent partie de la CEI 60909-0).
- Les régulations concernant les effets thermiques du matériel électrique ont été supprimées.
- La norme a été restructurée et certains symboles ont été modifiés afin de mieux correspondre aux caractéristiques conceptuelles des normes internationales.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

CDV	Rapport de vote
73/152/CDV	73/153/RVC

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 60865, présentées sous le titre général, *Courant de court-circuit – Calcul des effets*, 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 stabilité 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.

COURANTS DE COURT-CIRCUIT – CALCUL DES EFFETS –

Partie 1: Définitions et méthodes de calcul

1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 60865 s'applique aux effets mécaniques et thermiques des courants de court-circuit. Elle contient les modes opératoires de calcul de:

- l'effet électromagnétique sur les conducteurs rigides et souples;
- l'effet thermique sur les conducteurs nus.

Pour les câbles et les conducteurs isolés, se référer par exemple à la CEI 60949 et à la CEI 60986. Pour les effets électromagnétiques et thermiques dans les installations auxiliaires alimentées en courant continu dans les centrales et les postes, il est fait référence à la CEI 61660-2.

Seuls les systèmes alimentés en courant alternatif sont abordés dans la présente norme.

Il convient de noter en particulier les points suivants:

- a) Il convient que le calcul des courants de court-circuit se base sur la CEI 60909. Pour déterminer le courant de court-circuit le plus élevé possible, des informations supplémentaires issues d'autres normes CEI peuvent être prises en compte (les caractéristiques du circuit sous-jacent du calcul ou des dispositifs de limitation du courant, par exemple, si cela permet de réduire la contrainte mécanique).
- b) La durée de court-circuit utilisée dans la présente norme dépend du concept de la protection, et il convient de la considérer dans ce sens.
- c) Ces procédures normalisées sont adaptées aux exigences pratiques et contiennent des simplifications classiques. Des essais ou des méthodes de calcul plus détaillées peuvent être utilisés.
- d) Dans l'Article 5 de la présente norme, dans le cas d'installations avec des conducteurs rigides, seules les contraintes provoquées par les courants de court-circuit sont calculées. De plus, d'autres contraintes peuvent exister (celles causées par les poids morts, le vent, la glace, les forces de fonctionnement, les séismes, par exemple). Il convient que la combinaison de ces charges avec celles provenant d'un court-circuit fasse l'objet d'un accord et/ou soit indiquée par des normes (des règles d'installation, par exemple).
Les forces de tension dans les installations avec des conducteurs souples comprennent les effets des poids morts. En ce qui concerne la combinaison des autres charges, les considérations ci-dessus sont valables.
- e) Les charges calculées sont des charges nominales, et il convient de les considérer comme des charges exceptionnelles sans coefficient partiel de sécurité supplémentaire conformément aux codes d'installation de la CEI 61936-1 [1]¹, par exemple.

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).

¹ Les chiffres entre crochets se réfèrent à la bibliographie.

CEI 60909 (toutes parties), *Courants de court-circuit dans les réseaux triphasés à courant alternatif*

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

CEI 60949, *Calcul des courants de court-circuit admissibles au plan thermique, tenant compte des effets d'un échauffement non adiabatique*

CEI 60986, *Limites de température de court-circuit des câbles électriques de tension assignées de 6 kV ($U_m = 7,2$ kV) à 30 kV ($U_m = 36$ kV)*

CEI 61660-2, *Courants de court-circuit dans les installations auxiliaires alimentées en courant continu dans les centrales et les postes – Partie 2: Calcul des effets*

3 Termes, définitions, symboles et unités

3.1 Termes et définitions

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

3.1.1

conducteur principal

conducteur unique ou assemblage de plusieurs conducteurs parcouru par le courant total d'une phase

3.1.2

sous-conducteur

conducteur parcouru par une partie du courant total d'une phase et faisant partie du conducteur principal

3.1.3

support encastré

support d'un conducteur rigide dans lequel les moments sont imposés dans le plan considéré

3.1.4

support simple

support d'un conducteur rigide dans lequel aucun moment n'est imposé dans le plan considéré

3.1.5

pièce de liaison

toute masse additionnelle dans les limites d'une portée qui ne fait pas partie du conducteur proprement dit; cela inclut, entre autres: les entretoises, les raidisseurs, les recouvrements de barre, les dérivations, etc.

3.1.6

entretoise

élément mécanique, rigide ou flexible, placé entre des sous-conducteurs et qui, au point d'installation, maintient l'écartement entre les sous-conducteurs

3.1.7

raidisseur

entretoise spéciale destinée à réduire la contrainte mécanique des conducteurs rigides

3.1.8**fréquence propre appropriée** f_{cm}

première fréquence propre de la vibration libre d'une poutre à une seule portée sans amortissement et fréquence propre d'ordre ν des poutres avec portées ν sans amortissement

3.1.9**force de tension de court-circuit** $F_{t,d}$

force de tension maximale (valeur de calcul) dans un conducteur principal souple due à l'oscillation atteinte pendant le court-circuit

3.1.10**force de chute** $F_{f,d}$

force de tension maximale (valeur de calcul) dans un conducteur principal souple qui se produit lorsque la portée retombe après une oscillation

3.1.11**force de pincement** $F_{pi,d}$

force de tension maximale (valeur de calcul) dans un conducteur souple en faisceau lors du court-circuit, due à l'attraction des sous-conducteurs dans le faisceau

3.1.12**durée du premier passage de courant de court-circuit** T_{k1}

intervalle de temps entre l'apparition du court-circuit et la première coupure du courant

3.1.13**courant de court-circuit équivalent thermique** I_{th}

valeur efficace du courant dont l'effet thermique et la durée sont identiques à celles du courant de court-circuit réel, pouvant contenir la composante de courant continu et diminuer avec le temps

3.1.14**densité de courant de court-circuit équivalent thermique** S_{th}

rapport entre le courant de court-circuit équivalent thermique et la section du conducteur

3.1.15**densité du courant de tenue de courte durée assigné, S_{thr} , pour les conducteurs**

densité de courant, en valeur efficace, qu'un conducteur peut supporter pendant la courte durée assignée

3.1.16**durée du courant de court-circuit** T_k

somme des durées des passages du courant de court-circuit, depuis l'apparition du premier court-circuit jusqu'à la coupure finale du courant dans toutes les phases

3.1.17**courte durée assignée** T_{kr}

durée pendant laquelle un conducteur peut supporter une densité de courant égale à sa densité du courant de tenue de courte durée assigné

3.2 Symboles et unités

Toutes les équations utilisées dans la présente norme sont des équations entre grandeurs, dans lesquelles les symboles représentent des grandeurs physiques dotées de valeurs et de dimensions numériques.

Les symboles utilisés dans la présente norme et les unités SI concernées sont répertoriés ci-dessous.

A	Section d'un conducteur principal	m^2
A_s	Section d'un sous-conducteur	m^2
a	Entraxe des conducteurs	m
a_m	Distance équivalente entre des conducteurs principaux	m
a_{min}	Distance minimale dans l'air	m
a_s	Distance équivalente entre sous-conducteurs	m
a_{1n}	Entraxe du sous-conducteur 1 et du sous-conducteur n	m
a_{1s}	Entraxe des sous-conducteurs	m
b_h	Déplacement horizontal maximal	m
b_m	Dimension d'un conducteur principal perpendiculairement à la direction de la force	m
b_s	Dimension d'un sous-conducteur perpendiculairement à la direction de la force	m
C_D	Facteur de dilatation	1
C_F	Facteur de forme	1
c_m	Dimension d'un conducteur principal dans le sens de la force	m
c_s	Dimension d'un sous-conducteur dans le sens de la force	m
c_{th}	Constante du matériau	$m^4/(A^2s)$
d	Diamètre extérieur d'un conducteur tubulaire ou souple	m
E	Module de Young	N/m^2
E_{eff}	Module de Young réel	N/m^2
e	Facteur relatif à l'influence des pièces de liaison	1
F	Force exercée entre deux conducteurs parallèles de grande longueur pendant un court-circuit	N
F'	Force électromagnétique caractéristique par unité de longueur sur des conducteurs principaux souples	N/m
F_m	Force entre conducteurs principaux pendant un court-circuit	N
F_{m2}	Force entre conducteurs principaux pendant un court-circuit biphasé	N
F_{m3}	Force sur le conducteur principal central pendant un court-circuit triphasé symétrique	N
$F_{r,d}$	Force sur le support des conducteurs rigides (valeur de crête, valeur de calcul)	N
$F_{f,d}$	Force de chute d'un conducteur principal (valeur de calcul)	N
$F_{pi,d}$	Force de pincement d'un conducteur principal (valeur de calcul)	N
F_s	Force entre sous-conducteurs pendant un court-circuit	N
F_{st}	Force de tension statique dans un conducteur principal souple	N

$F_{t,d}$	Force de tension de court-circuit dans un conducteur principal (valeur de calcul)	N
F_v	Force de courant de court-circuit entre les sous-conducteurs d'un faisceau	N
f	Fréquence du réseau	Hz
f_{cm}	Fréquence propre appropriée d'un conducteur principal	Hz
f_{cs}	Fréquence propre appropriée d'un sous-conducteur	Hz
f_{ed}	Flèche dynamique du conducteur en milieu de portée	m
f_{es}	Flèche statique équivalente du conducteur en milieu de portée	m
f_{st}	Flèche statique du conducteur en milieu de portée	m
f_y	Contrainte correspondant à la limite élastique	N/m ²
g	Valeur conventionnelle de l'accélération de la pesanteur	m/s ²
h	Hauteur de la billette de support	m
I_k''	Courant de court-circuit triphasé symétrique initial (valeur efficace)	A
I_{k1}''	Courant de court-circuit monophasé initial (valeur efficace)	A
I_{k2}''	Courant de court-circuit biphasé symétrique initial (valeur efficace)	A
I_{th}	Courant de court-circuit équivalent thermique	A
i_p	Valeur de crête du courant de court-circuit	A
i_{p2}	Valeur de crête du courant de court-circuit biphasé	A
i_1, i_2	Valeurs instantanées des courants dans les conducteurs	A
J_m	Moment quadratique de la section d'un conducteur principal	m ⁴
J_s	Moment quadratique de la section d'un sous-conducteur	m ⁴
j	Paramètre déterminant la configuration d'un faisceau pendant le passage du courant de court-circuit	1
k	Nombre de jeux d'entretoises ou de raidisseurs	1
k_{1n}	Facteur relatif à la distance équivalente entre le sous-conducteur 1 et le sous-conducteur n	1
k_{1s}	Facteur relatif à distance équivalente d'un conducteur	1
l	Entraxe des supports	m
l_c	Longueur à la corde d'un conducteur principal souple dans la portée	m
l_i	Longueur d'une chaîne d'isolateurs	m
l_s	Entraxe des pièces de liaison ou d'une pièce de liaison et du support adjacent	m
l_v	Longueur à la corde d'une billette de support	m
m'_m	Masse du conducteur principal par unité de longueur	kg/m
m'_s	Masse d'un sous-conducteur par unité de longueur	kg/m
m_z	Masse totale d'un jeu de pièces de liaison	kg
N	Norme de rigidité d'une installation comportant des conducteurs souples	1/N
n	Nombre de sous-conducteurs d'un conducteur principal	1
q	Facteur de plasticité	1

r	Rapport entre la force électromagnétique sur un conducteur dans des conditions de court-circuit et la pesanteur	1
S	Constante d'élasticité résultante des deux supports d'une portée	N/m
S_{th}	Densité de courant de court-circuit équivalent thermique	A/mm ²
S_{thr}	Densité de courant de tenue de courte durée assigné	A/mm ²
T	Période d'oscillation du conducteur	s
T_k	Durée du courant de court-circuit	s
T_{ki}	Durée du court-circuit i lors de courts-circuits récurrents	s
T_{kr}	Courte durée admissible	s
T_{k1}	Durée du premier passage du courant de court-circuit	s
T_{res}	Période résultante de l'oscillation du conducteur pendant le passage du courant de court-circuit	s
t	Épaisseur de paroi des tubes	m
V_F	Rapport entre les forces dynamiques et statiques exercées sur les supports	1
V_{rm}	Rapport entre la contrainte dynamique (forces exercées sur les supports, contribution de la contrainte de flexion du conducteur principal) engendrée par les forces entre les conducteurs principaux avec réenclenchement automatique triphasé manqué et la contrainte dynamique avec réenclenchement automatique triphasé réussi	1
V_{rs}	Rapport entre la contribution de la contrainte dynamique engendrée par les forces entre les sous-conducteurs avec réenclenchement automatique triphasé manqué et la contribution de la contrainte dynamique avec réenclenchement automatique triphasé réussi	1
V_{om}	Rapport entre les contributions dynamique et statique de la contrainte du conducteur principal	1
V_{os}	Rapport entre les contributions dynamique et statique de la contrainte du sous-conducteur	1
W_m	Module de section du conducteur principal	m ³
W_s	Module de section du sous-conducteur	m ³
w	Largeur de la billette de support	m
α	Facteur relatif à la force sur un support	1
β	Facteur relatif à la contrainte d'un conducteur principal	1
γ	Facteur relatif à l'évaluation de la fréquence propre appropriée	1
δ	Angle d'oscillation maximal réel suite au mouvement d'oscillation limité par la billette de support	degrés
δ_{end}	Angle d'oscillation à la fin du passage du courant de court-circuit	degrés
δ_{max}	Angle d'oscillation maximal	degrés
δ_1	Direction angulaire de la force	degrés
ε_{ela}	Extension élastique	1
$\varepsilon_{pi}, \varepsilon_{st}$	Facteur de déformation de la contraction du faisceau	1
ε_{th}	Dilatation thermique	1
ζ	Facteur de contrainte d'un conducteur principal souple	1

η	Facteur relatif au calcul de $F_{pi,d}$ dans le cas de sous-conducteurs ne s'entrechoquant pas	1
θ_b	Température d'un conducteur au début d'un court-circuit	°C
θ_e	Température d'un conducteur à la fin d'un court-circuit	°C
κ	Facteur relatif au calcul de la valeur de crête du courant de court-circuit	1
μ_0	Constante magnétique, perméabilité du vide	H/m
ν	Nombre de portées d'une poutre continue	1
$\nu_e, \nu_1, \nu_2, \nu_3, \nu_4,$	Facteurs relatifs au calcul de $F_{pi,d}$	1
ξ	Facteur relatif au calcul de $F_{pi,d}$ dans le cas de sous-conducteurs s'entrechoquant	1
σ_{fin}	Valeur la plus basse de la contrainte du câble lorsque le module de Young devient constant	N/m ²
$\sigma_{m,d}$	Contrainte de flexion provoquée par les forces entre conducteurs principaux (valeur de calcul)	N/m ²
$\sigma_{s,d}$	Contrainte de flexion provoquée par les forces entre sous-conducteurs (valeur de calcul)	N/m ²
$\sigma_{tot,d}$	Contrainte totale du conducteur (valeur de calcul)	N/m ²
χ	Grandeur de l'angle d'oscillation maximal	1
φ, ψ	Facteurs relatifs à la force de tension dans un conducteur souple	1

4 Généralités

Avec les méthodes de calcul indiquées dans la présente norme, il est possible d'estimer:

- les contraintes dans les conducteurs rigides,
- les forces de tension dans les conducteurs souples,
- les forces sur les isolateurs et les infrastructures, qui peuvent exposer ces éléments à des flexions, des tensions et/ou des compressions,
- les déplacements des portées des conducteurs souples et
- le réchauffement des conducteurs.

Les forces électromagnétiques sont induites dans les conducteurs par les courants qui les parcourent. Lorsque de telles forces agissent sur des conducteurs parallèles, elles provoquent des contraintes qui doivent être prises en compte dans les postes. Pour cette raison:

- les forces entre conducteurs parallèles sont exposées dans les articles ci-après;
- les composantes de la force électromagnétique qui s'établit dans les conducteurs avec des angles et/ou des croisements peuvent normalement être ignorées.

Dans le cas d'installations blindées, la modification des forces électromagnétiques entre les conducteurs à cause du blindage magnétique peut être prise en considération. Toutefois, les forces agissant entre chaque conducteur et son enveloppe, et celles entre les enveloppes, doivent également être prises en compte.

Lorsque des conducteurs parallèles sont longs par rapport à la distance qui les sépare, les forces sont régulièrement réparties le long des conducteurs, et sont données par l'Equation (1)

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} i_1 i_2 \frac{l}{a} \quad (1)$$

où

i_1 et i_2 sont les valeurs instantanées des courants dans les conducteurs;

l est l'entraxe des supports;

a est l'entraxe des conducteurs;

Lorsque les courants dans les deux conducteurs ont le même sens, les forces sont attractives. Lorsque les courants sont de sens opposé, les forces sont répulsives.

5 Installations comportant des conducteurs rigides

5.1 Généralités

Les conducteurs rigides peuvent être soutenus de différentes manières, encastré et/ou simple. Selon le type et le nombre de supports, les contraintes dont font l'objet les conducteurs, et les forces exercées sur les supports, sont différentes pour le même courant de court-circuit. Les équations données incluent également l'élasticité des supports.

Les contraintes dont font l'objet les conducteurs et les forces exercées sur les supports dépendent également du rapport entre la fréquence propre appropriée du système mécanique et la fréquence du système électrique. Par exemple, dans le cas de la résonance ou de la quasi-résonance, les contraintes et les forces dans le système peuvent être amplifiées. Si $f_{cm}/f < 0,5$ la réponse du système diminue et les contraintes maximales se trouvent dans les phases extérieures.

5.2 Calcul des forces électromagnétiques

5.2.1 Calcul de la valeur de crête de la force entre les conducteurs principaux pendant un court-circuit triphasé

Dans une installation triphasée dont les conducteurs principaux sont disposés avec les mêmes entraxes sur le même plan, la force maximale pendant un court-circuit triphasé s'exerce sur le conducteur principal central, et est donnée par:

$$F_{m3} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{\sqrt{3}}{2} i_p^2 \frac{l}{a_m} \quad (2)$$

où

i_p est la valeur de crête du courant de court-circuit dans le cas d'un court-circuit triphasé symétrique. Pour le calcul, voir la série CEI 60909;

l est l'entraxe maximal des supports adjacents;

a_m est la distance équivalente entre conducteurs principaux selon 5.3.

NOTE L'Equation (2) peut également être utilisée pour le calcul de la valeur de crête de la force résultante lorsque des conducteurs avec des sections circulaires sont placés aux sommets d'un triangle équilatéral, avec a_m représentant la longueur du côté du triangle.

5.2.2 Calcul de la valeur de crête de la force entre les conducteurs principaux pendant un court-circuit biphasé

La force maximale s'exerçant entre les conducteurs parcourus par le courant de court-circuit pendant un court-circuit biphasé dans un réseau triphasé ou dans un réseau monophasé à deux conducteurs, est donnée par:

$$F_{m2} = \frac{\mu_0}{2\pi} i_{p2}^2 \frac{l}{a_m} \quad (3)$$

où

i_{p2} est la valeur de crête du courant de court-circuit dans le cas d'un court-circuit biphasé;

l est l'entraxe maximal des supports adjacents;

a_m est la distance équivalente entre conducteurs principaux selon 5.3.

5.2.3 Calcul de la valeur de crête des forces entre sous-conducteurs coplanaires

La force maximale s'exerce sur les sous-conducteurs extérieurs et est égale, entre deux pièces de liaison adjacentes, à:

$$F_s = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{i_p}{n} \right)^2 \frac{l_s}{a_s} \quad (4)$$

où

n est le nombre de sous-conducteurs;

l_s est l'entraxe maximal existant de deux pièces de liaison adjacentes;

a_s est la distance équivalente entre sous-conducteurs;

i_p est égal à i_p dans le cas d'un réseau triphasé ou à i_{p2} dans le cas d'un réseau monophasé à deux conducteurs.

5.3 Distance équivalente entre conducteurs principaux et entre sous-conducteurs

Les forces entre les conducteurs parcourus par les courants de court-circuit dépendent de leur configuration géométrique et de leur profil. Pour cette raison, la distance équivalente a_m entre conducteurs principaux a été introduite en 5.2.1 et 5.2.2 et la distance équivalente a_s entre sous-conducteurs a été introduite en 5.2.3. Elles doivent être prises comme suit:

Distance équivalente a_m entre conducteurs principaux coplanaires avec un entraxe a :

- Conducteurs principaux constitués de sections circulaires simples:

$$a_m = a \quad (5)$$

- Conducteurs principaux constitués par des sections rectangulaires simples et conducteurs principaux composés de sous-conducteurs avec des sections rectangulaires:

$$a_m = \frac{a}{k_{12}} \quad (6)$$

k_{12} doit être pris sur la Figure 1, avec $a_{1s} = a$, $b_s = b_m$ et $c_s = c_m$.

Distance équivalente a_s entre les n sous-conducteurs coplanaires d'un conducteur principal:

- Sous-conducteurs avec des sections circulaires:

$$\frac{1}{a_s} = \frac{1}{a_{12}} + \frac{1}{a_{13}} + \frac{1}{a_{14}} + \dots + \frac{1}{a_{1s}} + \dots + \frac{1}{a_{1n}} \quad (7)$$

- Sous-conducteurs avec des sections rectangulaires:

Certaines valeurs de a_s sont données dans le Tableau 1. Pour d'autres distances et dimensions de sous-conducteur, l'équation

$$\frac{1}{a_s} = \frac{k_{12}}{a_{12}} + \frac{k_{13}}{a_{13}} + \frac{k_{14}}{a_{14}} + \dots + \frac{k_{1s}}{a_{1s}} + \dots + \frac{k_{1n}}{a_{1n}} \quad (8)$$

peut être utilisée. Les valeurs de $k_{12}, \dots, k_{1n}$ doivent être prises sur la Figure 1.

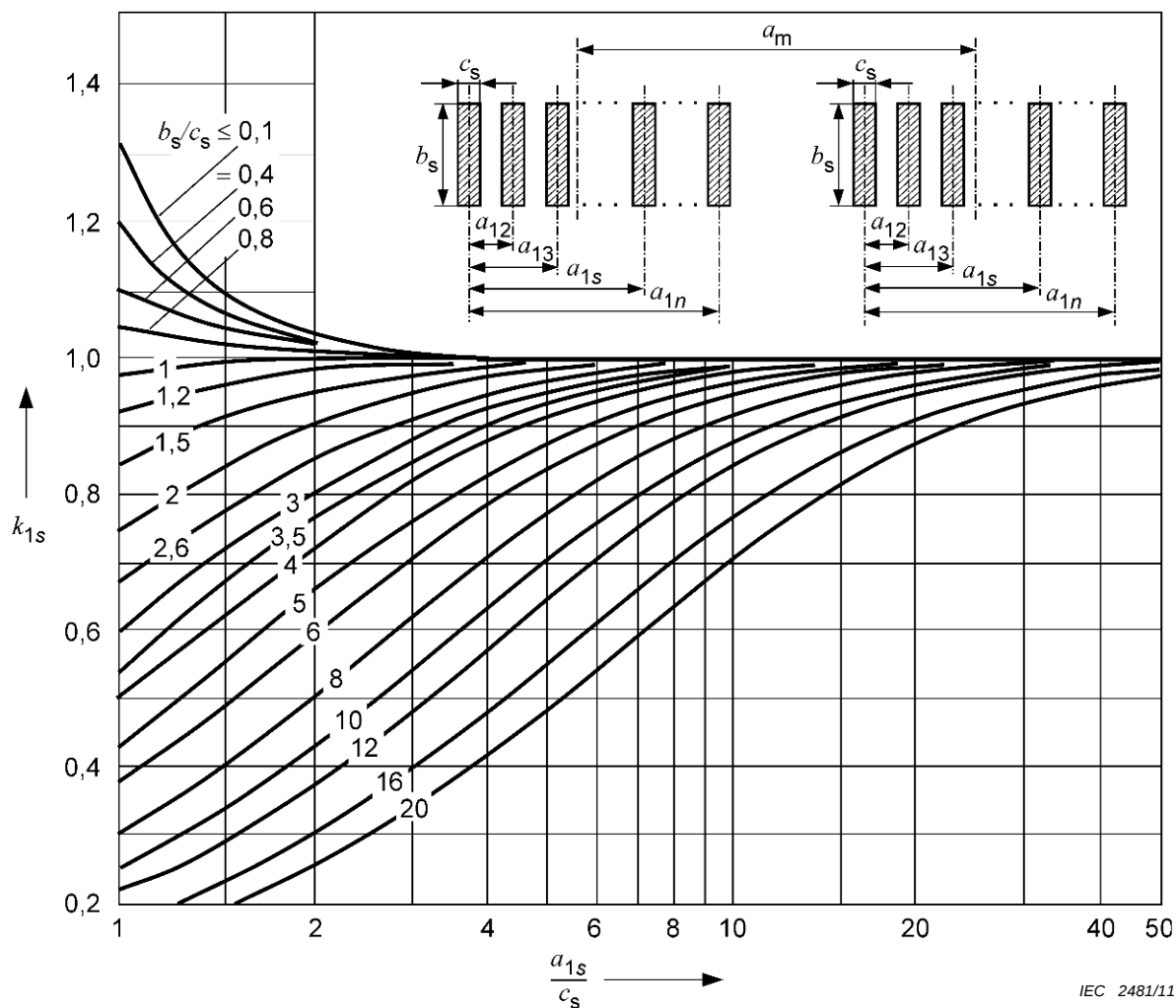
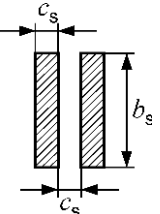
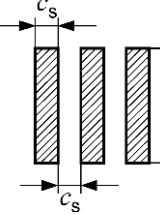
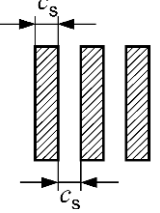
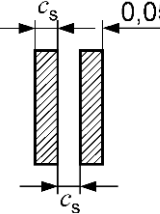


Figure 1 – Facteur k_{1s} pour le calcul de la distance équivalente des conducteurs

Pour la programmation, l'équation est donnée dans l'Article A.2.

**Tableau 1 – Distance équivalente entre sous-conducteurs,
 a_s pour des sections rectangulaires^a**

Sections rectangulaires	$\begin{matrix} b_s \\ c_s \end{matrix}$	0,04	0,05	0,06	0,08	0,10	0,12	0,16	0,20
	0,005	0,020	0,024	0,027	0,033	0,040	–	–	–
	0,010	0,028	0,031	0,034	0,041	0,047	0,054	0,067	0,080
	0,005	–	0,013	0,015	0,018	0,022	–	–	–
	0,010	0,017	0,019	0,020	0,023	0,027	0,030	0,037	0,043
	0,005	–	–	–	–	–	–	–	–
	0,010	0,014	0,015	0,016	0,018	0,020	0,022	0,026	0,031
	0,005	–	0,014	0,015	0,018	0,020	–	–	–
	0,010	0,017	0,018	0,020	0,022	0,025	0,027	0,032	–

^a Toutes les dimensions sont données en mètres.

5.4 Calcul des contraintes dans les conducteurs rigides

5.4.1 Calcul des contraintes

Les conducteurs doivent être encastres de manière à pouvoir ignorer les forces axiales. Dans cette hypothèse, les forces exercées sont des forces de flexion et l'équation générale pour la contrainte de flexion provoquée par les forces entre les conducteurs principaux est donnée par:

$$\sigma_{m,d} = V_{\sigma m} V_{rm} \beta \frac{F_m l}{8W_m} \quad (9)$$

où

F_m est soit la valeur F_{m3} selon l'Equation (2) dans le cas de réseaux triphasés, soit la valeur F_{m2} selon l'Equation (3) dans le cas des réseaux monophasés à deux conducteurs;

W_m est le module de section du conducteur principal et doit être calculé selon la direction des forces entre conducteurs principaux.

La contrainte de flexion provoquée par les forces entre les sous-conducteurs est donnée par:

$$\sigma_{s,d} = V_{\sigma s} V_{rs} \frac{F_s l_s}{16 W_s} \quad (10)$$

où

F_s doit être utilisé conformément à l'Equation (4);

W_s est le module de section du sous-conducteur et doit être calculé selon la direction des forces entre sous-conducteurs.

$V_{\sigma m}$, $V_{\sigma s}$, V_{rm} et V_{rs} sont des facteurs qui tiennent compte du phénomène dynamique et β est un facteur dépendant du type et du nombre de supports. Les valeurs maximales possibles de $V_{\sigma m}$, V_{rm} and $V_{\sigma s}$, V_{rs} doivent être prises dans le Tableau 2 et le facteur β doit être pris dans le Tableau 3.

NOTE Le coefficient β décrit la réduction de la contrainte de flexion à la place de ses supports en tenant compte de la déformation plastique du conducteur (voir le Tableau 3).

Les portées non uniformes des poutres continues peuvent être traitées avec un degré suffisant de précision en supposant que la portée maximale a été appliquée partout. Cela signifie que

- les supports d'extrémité ne sont pas soumis à des contraintes supérieures à celles des supports intérieurs,
- les longueurs de portée inférieures à 20 % de celles des portées adjacentes doivent être évitées. Si cela s'avère ne pas être possible, les conducteurs doivent être découplés à l'aide de joints flexibles à l'emplacement des supports. Si un joint flexible est placé dans une portée, il convient que la longueur de cette portée soit inférieure à 70 % de celles des portées adjacentes.

S'il n'est pas évident de déterminer si une poutre est soutenue ou encastrée, le cas le plus défavorable doit être pris en compte.

Pour un examen plus approfondi, voir 5.7

5.4.2 Module de section et facteur q des conducteurs principaux composés de sous-conducteurs

La contrainte de flexion et, par conséquent, la tenue mécanique du conducteur dépendent du module de section.

Si la contrainte se produit comme indiqué dans la Figure 2a, le module de section W_m est indépendant du nombre de pièces de liaison et est égal à la somme des modules de section W_s des sous-conducteurs (W_s par rapport à l'axe x-x). La valeur du facteur q est donc de 1,5 pour les sections rectangulaires et de 1,19 pour les sections en U et en I.

Si la contrainte se produit comme indiqué dans la Figure 2b et s'il n'y a qu'un seul raidisseur ou pas de raidisseur entre deux supports consécutifs, le module de section W_m est égal à la somme des modules de section W_s des sous-conducteurs (W_s par rapport à l'axe y-y). La valeur du facteur q est donc de 1,5 pour les sections rectangulaires et de 1,83 pour les sections en U et en I.

Lorsque, entre deux supports consécutifs, il y a deux raidisseurs ou plus, des valeurs de module de section plus élevées peuvent être utilisées:

- dans le cas de conducteurs principaux composés de sous-conducteurs de sections rectangulaires, avec un espace entre barres correspondant à l'épaisseur de celles-ci, les modules de section sont indiqués dans le Tableau 5;
- dans le cas des groupes de conducteurs avec des sections en U et en I, il convient d'utiliser des modules de section égaux à 50 % des modules de section par rapport à l'axe 0-0.

La valeur du facteur q est donc de 1,5 pour les sections rectangulaires et de 1,83 pour les sections en U et en I.

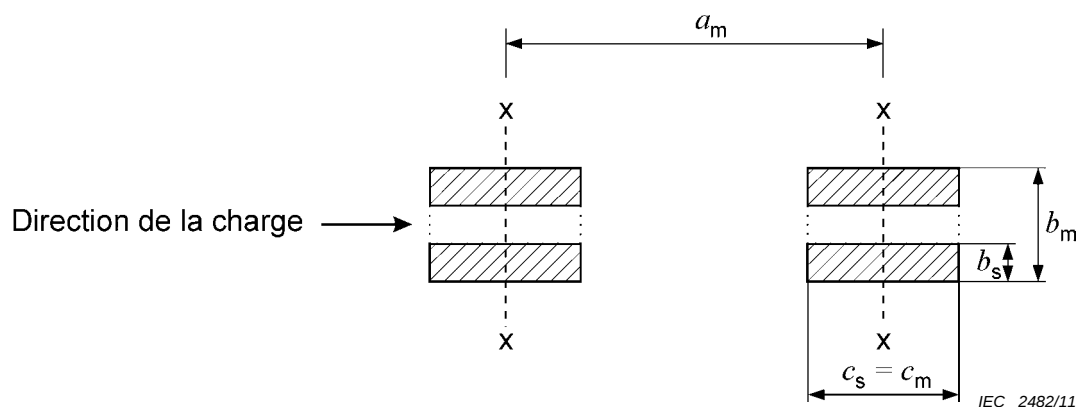


Figure 2a – Direction de la charge parallèle à la surface

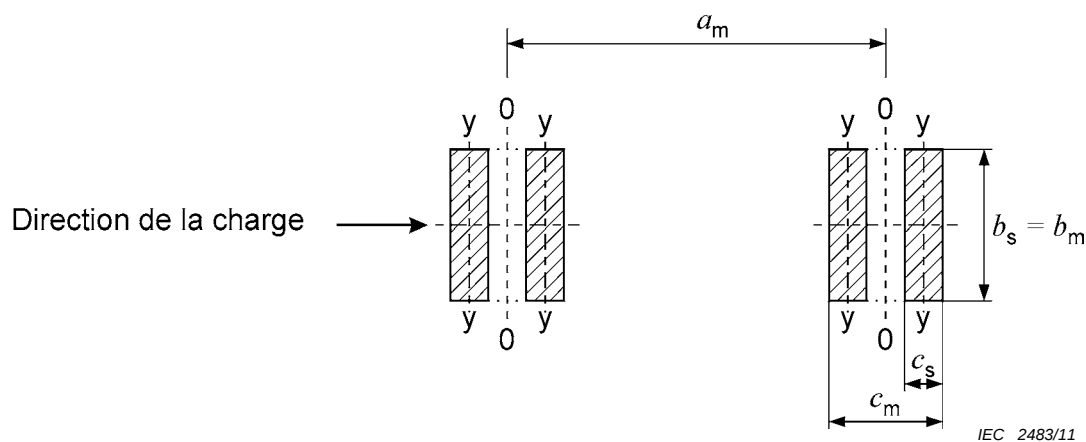


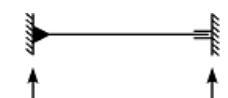
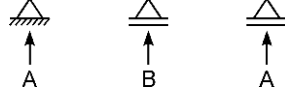
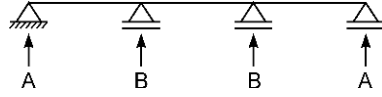
Figure 2b – Direction de la charge perpendiculaire à la surface

Figure 2 – Direction de la charge et axe de flexion dans le cas de dispositions à conducteurs multiples

Tableau 2 – Valeurs maximales possibles de $V_{\sigma m} V_{rm}$, $V_{\sigma s} V_{rs}$, $V_F V_{rm}$

Type de court-circuit	Réseau			
	Sans réenclenchement automatique triphasé	Avec réenclenchement automatique triphasé		Avec et sans réenclenchement automatique triphasé
	$V_{\sigma m} V_{rm}, V_{\sigma s} V_{rs}$	$V_{\sigma m} V_{rm}, V_{\sigma s} V_{rs}$		$V_F V_{rm}$
		Premier passage du courant	Deuxième passage du courant	
Biphasé	1,0	1,0	1,8	2,0 si $\frac{\sigma_{tot,d}}{0,8 f_y} \leq 0,5$ 1 $\frac{0,8 f_y}{\sigma_{tot,d}}$ si $0,5 < \frac{\sigma_{tot,d}}{0,8 f_y} < 1,0$ 2 1,0 si $1,0 \leq \frac{\sigma_{tot,d}}{0,8 f_y}$ 3 1 2 3 2,0 1,0 0,0 $V_F V_{rm}$ ↑ 0,5 1 2 $\frac{\sigma_{tot,d}}{0,8 f_y}$ →
Triphasé	1,0	1,0	1,8	2,7 si $\frac{\sigma_{tot,d}}{0,8 f_y} \leq 0,37$ 1 $\frac{0,8 f_y}{\sigma_{tot,d}}$ si $0,37 < \frac{\sigma_{tot,d}}{0,8 f_y} < 1,0$ 2 1,0 si $1,0 \leq \frac{\sigma_{tot,d}}{0,8 f_y}$ 3 1 2 3 2,7 1,0 0,0 $V_F V_{rm}$ ↑ 0,37 1 2 $\frac{\sigma_{tot,d}}{0,8 f_y}$ →

Tableau 3 – Facteurs α , β , γ pour différentes dispositions de supports de jeux de barres

Type de poutre et de support			α	$\beta^*)$	γ
Poutre à une seule portée	A et B: supports simples		A 0,5 B: 0,5	1,0	1,57
	A: support encastré B: support simple		A: 0,625 B: 0,375	$\frac{8}{11} = 0,73$	2,45
	A et B: supports encastrés		A: 0,5 B: 0,5	$\frac{8}{16} = 0,5$	3,56
Poutre continue avec supports simples équidistants	Deux portées		A: 0,375 B: 1,25	$\frac{8}{11} = 0,73$	2,45
	Au moins trois portées		A: 0,4 B: 1,1	$\frac{8}{11} = 0,73$	3,56
* Y compris les effets de plasticité.					

5.4.3 Contrainte admissible dans un conducteur

Un conducteur unique est supposé capable de supporter les forces de court-circuit lorsque:

$$\sigma_{m,d} \leq q f_y \quad (11)$$

où f_y est la contrainte correspondant à la limite élastique.

Le facteur q doit être pris dans le Tableau 4 (voir également 5.4.2).

NOTE Le facteur q donné dans le Tableau 4 et en 5.4.2 décrit l'augmentation de la contrainte admissible du conducteur en raison de son comportement plastique hors de ses supports, en tenant compte de sa forme.

Dans le cas d'un conducteur principal constitué de deux sous-conducteurs ou plus, la contrainte totale dans le conducteur est donnée par:

$$\sigma_{tot,d} = \sigma_{m,d} + \sigma_{s,d} \quad (12)$$

Le conducteur est supposé supporter les forces de court-circuit lorsque:

$$\sigma_{tot,d} \leq q f_y \quad (13)$$

Il est nécessaire de vérifier que le court-circuit n'affecte pas trop la distance entre sous-conducteurs. Par conséquent, une valeur

$$\sigma_{s,d} \leq f_y \quad (14)$$

est recommandée.

Le Tableau 4 indique les valeurs acceptables les plus élevées de q pour différentes sections. Pour $\sigma_{m,d} = q f_y$ respectivement, de petites déformations permanentes $\sigma_{tot,d} = q f_y$ peuvent se produire, de l'ordre de 1 % de la distance entre supports pour les valeurs de q indiquées dans le Tableau 4; elles ne mettent pas la sécurité en cause pourvu que les distances minimales entre les conducteurs principaux ou entre un conducteur principal et la structure reliée à la terre soient respectées.

Les normes indiquent souvent pour la limite élastique des matériaux conducteurs, f_y , des plages comprises entre des valeurs minimales et des valeurs maximales. Si seules de telles valeurs limites sont disponibles au lieu des valeurs réelles, il convient d'utiliser la valeur minimale en 5.4.3 et la valeur maximale dans le Tableau 2.

NOTE Une éventuelle contrainte statique dans le conducteur (à cause, par exemple, de son poids mort) n'est pas prise en compte dans les Equations (11) à (14). Le cas échéant, il convient de la combiner à la contrainte résultant du court-circuit correspondant au sens de l'action.

5.5 Charges de structure résultant des conducteurs rigides

La force statique équivalente $F_{r,d}$ exercée sur les supports des conducteurs rigides doit être calculée à partir de:

$$F_{r,d} = V_F V_{rm} \alpha F_m \quad (15)$$

où F_m est la valeur F_{m3} des systèmes triphasés conformément à l'Equation (2) ou la valeur F_{m2} des systèmes monophasés à deux lignes conformément à l'Equation (3) doit être utilisée.

Les valeurs maximales possibles de $V_F V_{rm}$ doivent être prises dans le Tableau 2.

Le coefficient α dépend du type et du nombre de supports et doit être pris dans le Tableau 3.

Pour un examen plus approfondi, voir 5.7.

La force $F_{r,d}$ ne doit pas être supérieure à la valeur de tenue donnée par le fabricant des supports et des isolateurs. Dans le cas d'un isolateur contraint par une force de flexion, la valeur de tenue assignée est donnée sous la forme d'une force s'exerçant au niveau de la tête d'isolateur.

NOTE Dans le cas d'une force agissant sur un point plus élevé que la tête de l'isolateur, il convient d'utiliser une valeur de tenue inférieure à la valeur de tenue assignée, en fonction du moment de tenue de flexion au niveau de la section critique de l'isolateur.

5.6 Prise en compte du réenclenchement automatique

Au niveau des conducteurs rigides, le réenclenchement automatique doit être pris en compte si un réenclenchement automatique triphasé est utilisé.

Dans les réseaux à réenclenchement automatique triphasé, différentes contraintes mécaniques se produisent lors de la première et de la deuxième durée de passage du courant. Par conséquent, différentes forces peuvent s'exercer sur les supports lors des deux durées de passage du courant. C'est la raison pour laquelle la force $F_{r,d}$ doit être calculée comme suit:

- calcul de $\sigma_{tot,d}$ conformément à 5.4, $V_{\sigma m} V_{rm}$, $V_{\sigma s} V_{rs}$ provenant du Tableau 2 pour la première durée du passage du courant, et détermination de $V_F V_{rm}$ à l'aide du Tableau 2;
- calcul de $\sigma_{tot,d}$ conformément à 5.4, $V_{\sigma m} V_{rm}$, $V_{\sigma s} V_{rs}$ provenant du Tableau 2 pour la deuxième durée de passage du courant, et détermination de $V_F V_{rm}$ à l'aide du Tableau 2;
- calcul de $F_{r,d}$ conformément à l'Equation (15) avec la valeur maximale de $V_F V_{rm}$ hors des deux durées de passage du courant.

Tableau 4 – Facteur q

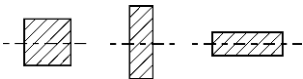
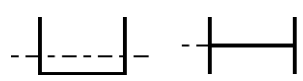
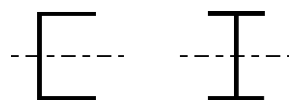
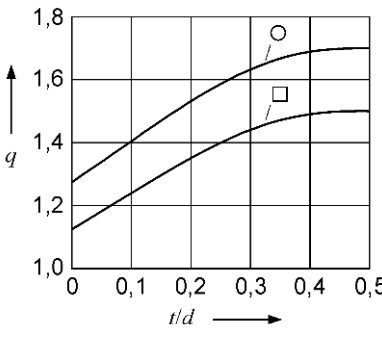
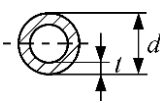
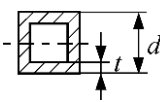
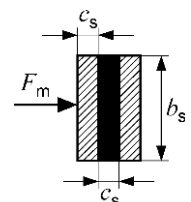
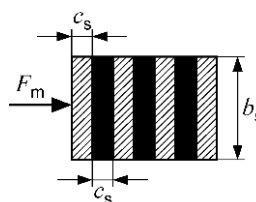
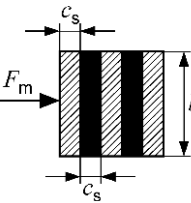
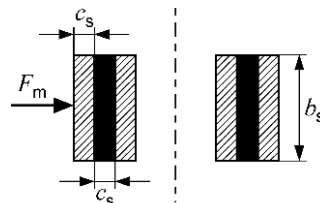
Section	Section
 $q = 1,5$	 $q = 1,83$
	 $q = 1,19$
 $q = 1,7$	
 $q = 1,7 \frac{1 - (1 - 2t/d)^3}{1 - (1 - 2t/d)^4}$	
 $q = 1,5 \frac{1 - (1 - 2t/d)^3}{1 - (1 - 2t/d)^4}$	
q correspond à l'axe de flexion en pointillé. Les forces sont perpendiculaires à cet axe.	

Tableau 5 – Modules de section W_m de conducteurs principaux avec deux raidisseurs ou plus entre deux supports adjacents

Sections rectangulaires	W_m	Sections rectangulaires	W_m
	$0,867 c_s^2 b_s$		$3,48 c_s^2 b_s$
	$1,98 c_s^2 b_s$		$1,73 c_s^2 b_s$
Les raidisseurs sont représentés en noir.			

5.7 Calcul tenant compte de l'oscillation des conducteurs

5.7.1 Généralités

Les équations en 5.4.1 et en 5.5 contiennent les facteurs $V_{\sigma m}$, $V_{\sigma s}$, V_F , V_m et V_{rs} qui tiennent compte de la nature oscillatoire des contraintes et des forces.

Les limites supérieures de ces facteurs sont indiquées dans le Tableau 2. Des valeurs inférieures à celles-ci sont autorisées si elles sont évaluées à l'aide du présent paragraphe. Il

est nécessaire de calculer la fréquence propre appropriée f_{cm} en tenant compte de la précision des données.

5.7.2 Calcul de la fréquence propre appropriée

La fréquence propre appropriée d'un conducteur peut être calculée à partir de l'équation:

$$f_{cm} = \frac{\gamma}{l^2} \sqrt{\frac{E J_m}{m'_m}} \quad (16)$$

L'Equation (16) est directement applicable aux conducteurs principaux constitués de sections uniques.

Le facteur γ dépend du type et du nombre de supports et est indiqué dans le Tableau 3.

NOTE 1 Le calcul de la fréquence propre appropriée avec l'Equation (16) donne un résultat sensiblement trop élevé pour la poutre continue comportant au moins trois portées. Un calcul plus précis peut être réalisé avec un effort supplémentaire uniquement. C'est la raison pour laquelle il est recommandé d'utiliser l'Equation (16).

Pour un conducteur principal composé de sous-conducteurs de section rectangulaire, la fréquence propre appropriée du conducteur principal doit être calculée à partir de l'équation:

$$f_{cm} = e \frac{\gamma}{l^2} \sqrt{\frac{E J_s}{m'_s}} \quad (17)$$

Le facteur e doit être pris dans la Figure 3b or 3c. En l'absence de pièce de liaison, $e = 1$.

Pour un conducteur principal composé de sous-conducteurs de sections en U et en I, f_{cm} est calculée à partir de l'Equation (16): J_m et m'_m doivent s'appliquer à la conception du conducteur principal.

Pour le calcul de la contrainte dans un sous-conducteur, en tenant compte de la fréquence propre appropriée, l'équation

$$f_{cs} = \frac{3,56}{l_s^2} \sqrt{\frac{E J_s}{m'_s}} \quad (18)$$

doit être utilisée.

NOTE 2 Les moments quadratiques de surface J_m et J_s sont calculés conformément à la Figure 2a ou 2b.

5.7.3 Facteurs V_F , $V_{\sigma m}$, $V_{\sigma s}$, V_{rm} et V_{rs}

Les facteurs V_F , $V_{\sigma m}$, $V_{\sigma s}$, V_{rm} et V_{rs} , en tant que fonctions des rapports f_{cm}/f et f_{cs}/f , où f est la fréquence du réseau, sont légèrement différents dans le cas d'un court-circuit triphasé ou dans celui d'un court-circuit biphasé, et dépendent également de l'amortissement mécanique du système de conducteurs. Pour les calculs pratiques, ces facteurs doivent être pris dans la Figure 4.

NOTE 1 Une durée de court-circuit $T_{k1} \leq 0,1$ s peut provoquer une réduction sensible de la contrainte dans les structures lorsque $f_{cm}/f \leq 1$.

NOTE 2 Dans le cas de supports élastiques, la fréquence propre appropriée est inférieure à celle calculée avec l'Equation (16). Il convient de prendre ceci en considération dans la Figure 4, si la valeur de $f_{cm}/f > 2,4$.

Dans le cas de réenclenchements automatiques triphasés, les facteurs V_{rm} et V_{rs} doivent être pris dans la Figure 5; dans les autres cas, $V_{rm} = 1$, $V_{rs} = 1$.

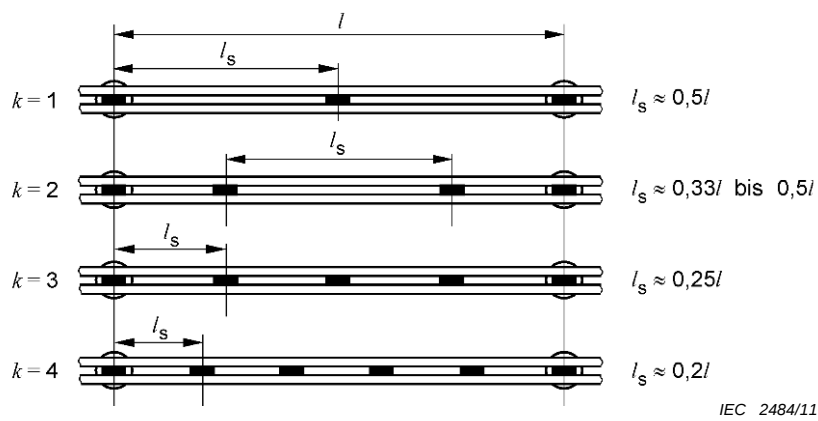


Figure 3a – Disposition des pièces de liaison dans la portée

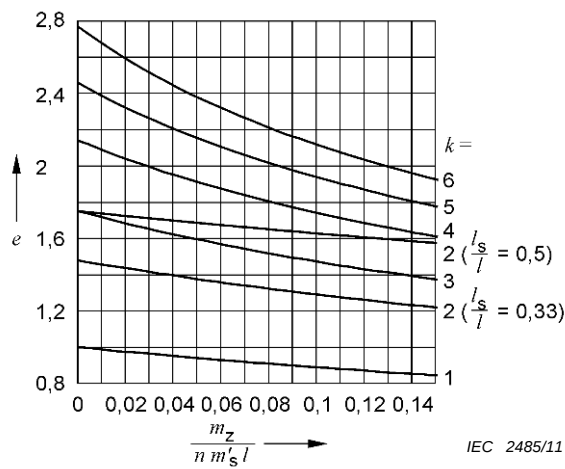


Figure 3b – Pièces de liaison constituées de raidisseurs

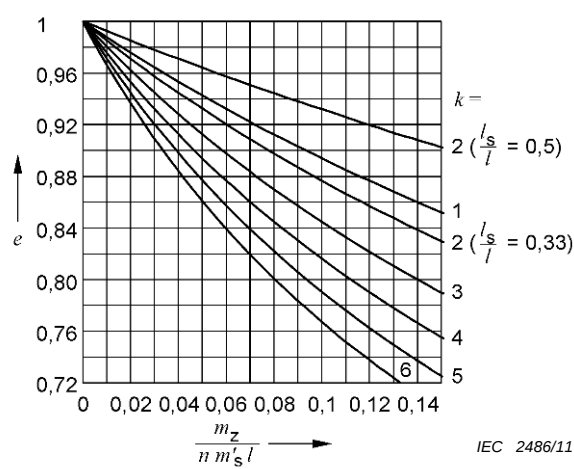


Figure 3c – Pièces de liaison constituées d'entretoises, ou fonctionnant comme des entretoises

Le facteur e doit être pris dans la Figure 3b ou 3c, comme indiqué:

		Dans une portée, il y a	
		k raidisseurs	k entretoises
Direction de l'oscillation perpendiculaire à la surface		Facteur e à prendre dans la Figure 3b	Facteur e à prendre dans la Figure 3c
Direction de l'oscillation parallèle à la surface		Facteur e à prendre dans la Figure 3c	Facteur e à prendre dans la Figure 3c

IEC 2487/11

Figure 3 – Facteur e pour l'influence des pièces de liaison dans l'Equation (17)

Pour la programmation, l'équation est donnée à l'Article A.3.

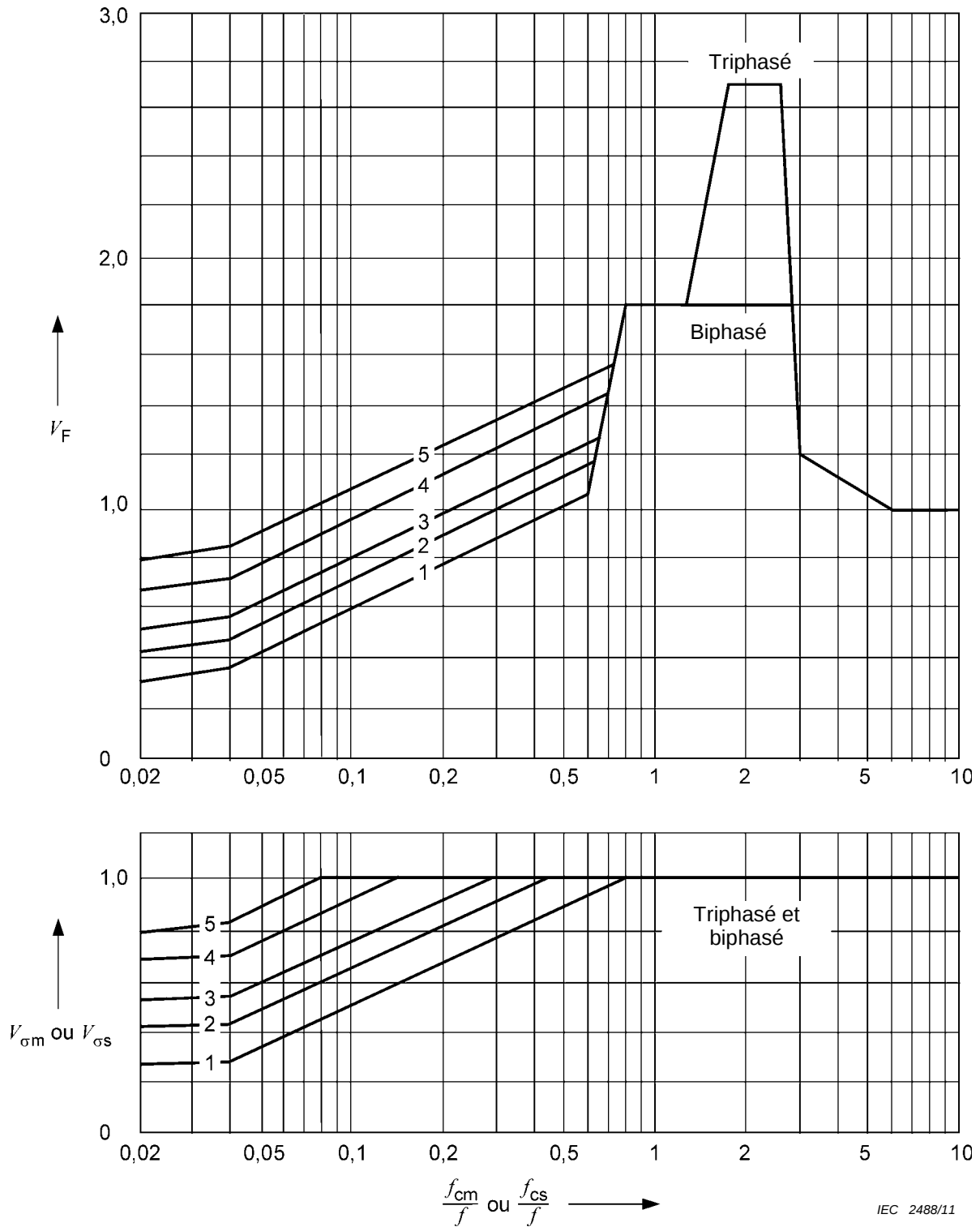


Figure 4 – Facteurs V_F , $V_{\sigma m}$ et $V_{\sigma s}$ à utiliser dans le cas de courts-circuits triphasés ou biphasés

Pour la programmation, les équations sont données à l'Article A.4.

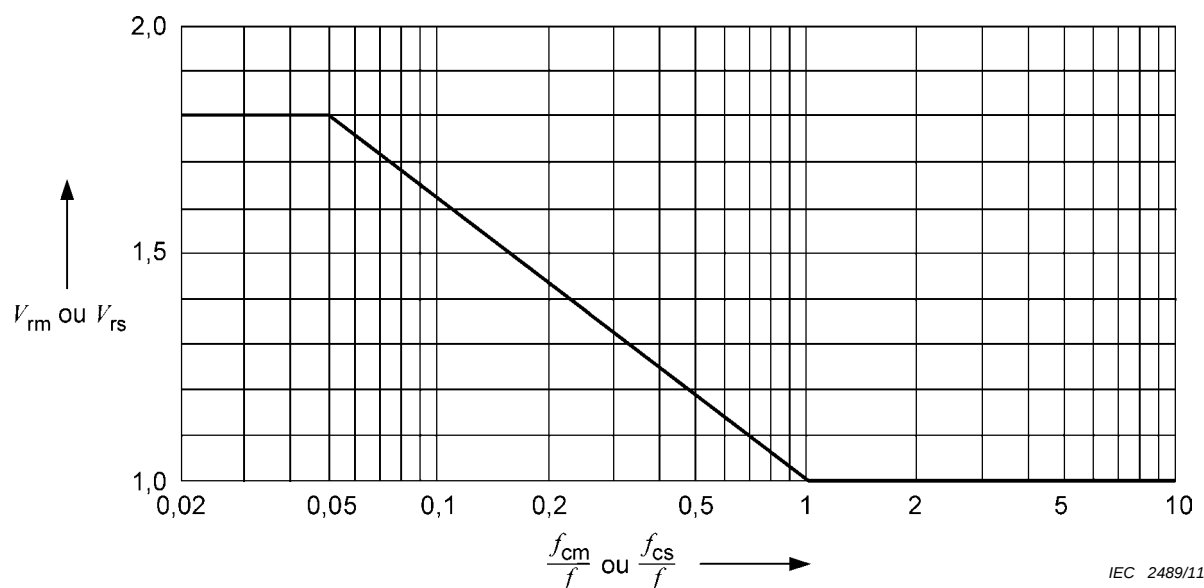


Figure 5 – Facteurs V_{rm} et V_{rs} à utiliser dans le cas de réenclenchement automatique triphasé

Pour la programmation, l'équation est donnée à l'Article A.5.

6 Installations comportant des conducteurs souples

6.1 Généralités

Dans une portée, il existe une différence entre la force de tension $F_{t,d}$ résultant de l'oscillation du conducteur pendant le court-circuit, la force de tension $F_{f,d}$ lorsque le conducteur retombe après le court-circuit et la force de tension $F_{pi,d}$ provoquée par l'effet de pincement dans le faisceau de conducteurs. Les effets sur les conducteurs principaux horizontaux sont calculés en 6.2. Après le calcul des paramètres caractéristiques pour la configuration et le type de court-circuit présenté en 6.2.2, la force de tension $F_{t,d}$ sans billette de support dans la portée est calculée en 6.2.3. La modification dynamique de la flèche résultant de l'allongement du conducteur et de la déformation de la courbe du conducteur est déterminée en 6.2.4, la force de tension $F_{t,d}$ avec billettes de support dans la portée étant déterminée en 6.2.5. La force de tension $F_{f,d}$ après le court-circuit est déterminée en 6.2.6. Le déplacement horizontal de la portée b_h et la distance d'isolement minimale entre les conducteurs a_{min} pendant l'oscillation des conducteurs sont calculés en 6.2.7. Les effets sur les conducteurs principaux verticaux sont déterminés en 6.3. La force de tension $F_{pi,d}$ est calculée en 6.4. Les charges nominales sont données en 6.5.

Dans les installations dotées de conducteurs souples, les contraintes se produisant dans les courts-circuits biphasés et les courts-circuits triphasés équilibrés sont approximativement les mêmes. Cependant, dans le cas des courts-circuits biphasés, l'oscillation des conducteurs a pour conséquence typique de diminuer les distances minimales (c'est-à-dire, lorsque les conducteurs adjacents parcourus par le courant de court-circuit se déplacent l'un vers l'autre après le court-circuit). En cas de court-circuit triphasé équilibré, le conducteur central ne se déplace que légèrement, par suite de son inertie et du fait que les forces agissent sur lui alternativement dans les deux directions. Par conséquent, $F_{t,d}$, $F_{f,d}$ et b_h sont calculés pour un court-circuit biphasé.

Les forces de tension $F_{t,d}$, $F_{f,d}$ et $F_{pi,d}$ incluent celles provoquées par le poids mort.

Les calculs suivants doivent être effectués sur la base de la force de tension statique F_{st} existante à la température hivernale minimale du lieu (-20 °C , par exemple) et de la force de tension statique F_{st} existante à la température de fonctionnement maximale (60 °C , par exemple). Pour chaque force de tension, le cas le plus défavorable doit être pris en compte pour les besoins du calcul.

6.2 Effets sur les conducteurs principaux horizontaux

6.2.1 Généralités

Les paragraphes suivants s'appliquent à des conducteurs uniques et aux configurations de faisceau.

Outre les contraintes calculées ici, les contraintes liées aux sous-conducteurs conformes à 6.4 doivent être calculées. Les installations avec ou sans billette de support dans la portée sont prises en compte.

Les sections suivantes concernent les câbles horizontaux disposés côte à côte. Dans les autres installations, de plus petites forces de tension peuvent se produire. Compte tenu de l'effort de ces calculs, il est recommandé d'utiliser l'équation donnée dans ces cas également. Si la différence de hauteur des points de fixation représente plus de 25 % de la portée, le calcul doit être réalisé conformément à 6.3.

Les équations suivantes s'appliquent aux longueurs de portée de 120 m environ et aux rapports flèche/longueur de portée d'environ 8 %. Pour les portées plus longues, le mouvement du conducteur peut donner lieu à des contraintes moins importantes que celles calculées dans les équations. Si cela peut être démontré par des calculs ou des mesures, des charges inférieures peuvent être prises en compte.

NOTE Les billettes de support proches du point de fixation du conducteur principal n'ont que peu d'effet sur les forces de tension et le mouvement du conducteur principal. Dans ce cas, il est recommandé de procéder au calcul conformément à 6.2 quelles que soient les billettes de support.

Il convient de tenir compte de la répartition des masses concentrées dans la portée (au moyen de pinces, de billettes de support ou de connecteurs, par exemple) lors du calcul de la force de tension statique F_{st} et de la flèche statique f_{st} . Pour la billette de support, il convient d'évaluer la moitié de sa masse dans ce cas.

La somme des masses concentrées existantes doit être convertie en masse supplémentaire par longueur d'unité dans la portée lors du calcul des forces de tension $F_{t,d}$ et $F_{f,d}$. Toutefois, la masse de la billette de support en milieu de portée et de sa pince ne doivent pas être considérées.

6.2.2 Dimensions et paramètres caractéristiques

La charge électromagnétique caractéristique par unité de longueur sur des conducteurs principaux souples dans des réseaux triphasés est donnée

- par l'équation ci-dessous si le courant circule sur toute la longueur de la portée du conducteur principal avec et sans billette de support:

$$F' = \frac{\mu_0}{2\pi} 0,75 \frac{(I_k'')^2}{a} \frac{l_c}{l} \quad (19a)$$

- par l'équation ci-dessous si le courant circule sur la moitié de la longueur de la portée du conducteur principal et le long de la billette de support:

$$F' = \frac{\mu_0}{2\pi} 0,75 \frac{(I_k'')^2}{a} \frac{l_c/2 + l_v/2}{l} \quad (19b)$$

où

- I_k'' est le courant de court-circuit symétrique initial triphasé (valeur efficace);
 a est l'entraxe des points centraux du conducteur principal;
 l_c est la longueur à la corde du conducteur principal dans la portée;
 l_v est la longueur à la corde de la billette de support.

Dans le cas de conducteurs détendus qui exercent des forces de flexion sur les isolateurs du support, $l_c = l$. Dans le cas de portées avec des conducteurs tendus, $l_c = l - 2l_i$, où l_i est la longueur d'une chaîne d'isolateurs.

Dans le cas de réseaux monophasés à deux conducteurs, remplacer $0,75 (I_k'')^2$ dans l'Equation (19) par $(I_{k2}'')^2$.

NOTE 1 La procédure de calcul ne tient pas compte de la contribution de la composante apériodique du courant de court-circuit. Toutefois, cela n'influence les résultats de façon significative que si la durée du passage du courant de court-circuit est inférieure à 0,1 s. Dans ce cas, il y a lieu de se reporter à [2].

Le rapport entre la force électromagnétique lors d'un court-circuit et la force de gravité sur un conducteur est un paramètre important donné par

$$r = \frac{F'}{n m'_s g} \quad (20)$$

et qui donne la direction de la force résultante exercée sur le conducteur:

$$\delta_1 = \arctan r \quad (21)$$

La flèche statique équivalente du conducteur en milieu de portée est donnée par

$$f_{es} = \frac{n m'_s g l^2}{8 F_{st}} \quad (22)$$

La période T des oscillations du conducteur est donnée par

$$T = 2\pi \sqrt{0,8 \frac{f_{es}}{g}} \quad (23)$$

et s'applique aux cas de faibles angles d'oscillation sans passage de courant dans le conducteur.

La période résultante T_{res} de l'oscillation du conducteur pendant le passage du courant de court-circuit est donnée par:

$$T_{res} = \frac{T}{\sqrt[4]{1+r^2} \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \left(\frac{\delta_1}{90^\circ} \right)^2 \right]} \quad (24)$$

où δ_1 doit être indiqué en degrés.

La norme de rigidité est donnée par:

$$N = \frac{1}{S l} + \frac{1}{n E_{\text{eff}} A_s} \quad (25)$$

NOTE 2 Si la valeur exacte de S n'est pas connue dans l'Equation (25), la valeur $S = 100 \times 10^3$ N/m peut être utilisée dans le cas des conducteurs détendus qui exercent des forces de flexion sur les isolateurs supports.

NOTE 3 Si la valeur exacte de S pour les portées avec des conducteurs tendus n'est pas connue, la valeur d'une structure dans les plages suivantes peut être utilisée:

- 150×10^3 N/m à $1\,300 \times 10^3$ N/m à la tension assignée de 123 kV;
- 400×10^3 N/m à $2\,000 \times 10^3$ N/m à la tension assignée de 245 kV;
- 600×10^3 N/m à $3\,000 \times 10^3$ N/m à la tension assignée de 420 kV.

S de l'Equation (25) est la constante d'élasticité résultante des deux points de fixation.

E_{eff} est le module de Young réel

$$E_{\text{eff}} = \begin{cases} E \left[0,3 + 0,7 \sin \left(\frac{F_{\text{st}}}{n A_s \sigma_{\text{fin}}} 90^\circ \right) \right] & \text{si } \frac{F_{\text{st}}}{n A_s} \leq \sigma_{\text{fin}} \\ E & \text{si } \frac{F_{\text{st}}}{n A_s} > \sigma_{\text{fin}} \end{cases} \quad (26)$$

où

$$\sigma_{\text{fin}} = 50 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad (27)$$

σ_{fin} est la plus faible valeur de la contrainte du câble lorsque le module de Young devient constant. Le module de Young final E des conducteurs à âme câblée doit être utilisé.

Le facteur de contrainte ζ du conducteur principal est donné par:

$$\zeta = \frac{(n g m'_s l)^2}{24 F_{\text{st}}^3 N} \quad (28)$$

Pendant le passage du courant de court-circuit ou à la fin de celui-ci, la portée a oscillé, par rapport à la position en régime établi, d'un angle donné par:

$$\delta_{\text{end}} = \begin{cases} \delta_1 \left[1 - \cos \left(360^\circ \frac{T_{k1}}{T_{\text{res}}} \right) \right] & \text{si } 0 \leq \frac{T_{k1}}{T_{\text{res}}} \leq 0,5 \\ 2 \delta_1 & \text{si } \frac{T_{k1}}{T_{\text{res}}} > 0,5 \end{cases} \quad (29)$$

Dans la mesure où la durée du premier passage du courant de court-circuit T_{k1} définie en 3.1.12 est connue, l'angle d'oscillation maximal δ_{max} peut être déterminé à l'aide de la Figure 6 ou calculé comme ci-après. Autrement, ou si la valeur de T_{k1} est supérieure à $0,4 T$, la valeur $0,4 T$ doit être utilisée pour T_{k1} dans les Equations (29), (32) et (35).

Pendant ou après le passage du courant de court-circuit, la portée sans billette de support en milieu de portée a oscillé jusqu'à l'angle d'oscillation maximal δ_{max} obtenu avec:

$$\chi = \begin{cases} 1 - r \sin \delta_{\text{end}} & \text{si } 0 \leq \delta_{\text{end}} \leq 90^\circ \\ 1 - r & \text{si } \delta_{\text{end}} > 90^\circ \end{cases} \quad (30)$$

à partir de:

$$\delta_{\text{max}} = \begin{cases} 1,25 \arccos \chi & \text{si } 0,766 \leq \chi \leq 1 \\ 10^\circ + \arccos \chi & \text{si } -0,985 \leq \chi \leq 0,766 \\ 180^\circ & \text{si } \chi < -0,985 \end{cases} \quad (31)$$

NOTE 4 L'angle d'oscillation calculé δ_{max} est la valeur maximale qui peut se produire dans le cas le plus défavorable qui correspond à une durée de court-circuit inférieure ou égale à la durée indiquée de court-circuit T_{k1} .

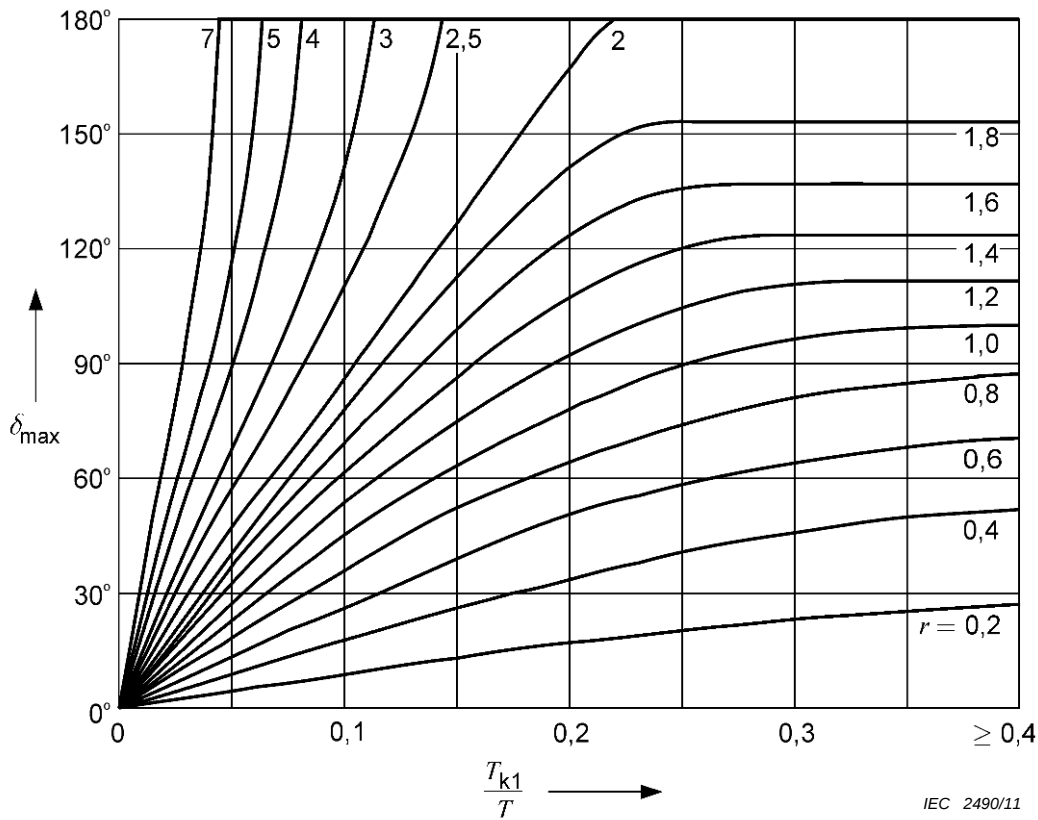


Figure 6 – Angle d'oscillation maximal δ_{max} relatif à une durée de court-circuit maximale donnée T_{k1}

Pour la programmation, voir les Equations (31) et (19) à (30).

6.2.3 Force de tension $F_{t,d}$ pendant un court-circuit provoqué par une oscillation (force de tension de court-circuit) sans billette de support en milieu de portée

Le paramètre de charge φ est obtenu comme suit:

$$\varphi = \begin{cases} 3 \left(\sqrt{1 + r^2} - 1 \right) & \text{si } T_{k1} \geq T_{\text{res}} / 4 \\ 3 \left(r \sin \delta_{\text{end}} + \cos \delta_{\text{end}} - 1 \right) & \text{si } T_{k1} < T_{\text{res}} / 4 \end{cases} \quad (32)$$

Le facteur ψ est une fonction de ζ et φ et est déterminé dans la Figure 7.

La force de tension $F_{t,d}$ est donnée par

$$F_{t,d} = F_{st}(1 + \varphi\psi) \quad (33)$$

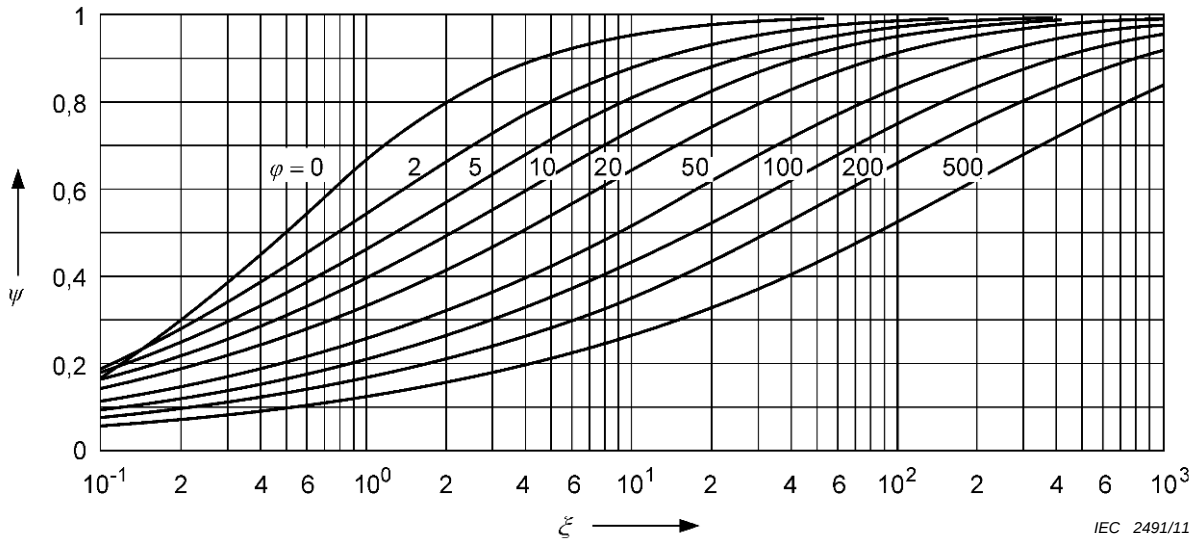


Figure 7 – Facteur ψ pour la force de tension des conducteurs souples

Pour la programmation, l'équation est donnée à l'Article A.6.

6.2.4 Modification dynamique de la flèche résultant de l'allongement du conducteur et de la déformation de la courbe du conducteur

L'extension élastique est donnée par:

$$\varepsilon_{ela} = N(F_{t,d} - F_{st}) \quad (34)$$

La force de tension de court-circuit $F_{t,d}$ doit toujours être calculée avec l'Equation (33) pour les portées sans billette de support au milieu de la portée. Pour les installations dotées de billette de support en milieu de portée, l'angle d'oscillation réel δ doit être déterminé en 6.2.5. A ce titre, l'extension élastique d'une portée sans billette de support en milieu de portée doit être calculée avec $F_{t,d}$ conformément à l'Equation (33).

La dilatation thermique est donnée par:

$$\varepsilon_{th} = \begin{cases} c_{th} \left(\frac{I_k''}{n A_s} \right)^2 T_{res} / 4 & \text{si } T_{k1} \geq T_{res} / 4 \\ c_{th} \left(\frac{I_k''}{n A_s} \right)^2 T_{k1} & \text{si } T_{k1} < T_{res} / 4 \end{cases} \quad (35)$$

Prendre comme valeur de c_{th} :

- $0,27 \times 10^{-18} \text{ m}^4/(\text{A}^2\text{s})$ pour les conducteurs en aluminium, en alliage d'aluminium et en aluminium/acier dont le rapport de section est $\text{Al/St} > 6$;
- $0,17 \times 10^{-18} \text{ m}^4/(\text{A}^2\text{s})$ pour les conducteurs en aluminium/acier dont le rapport de section est $\text{Al/St} > 6$;

$0,088 \times 10^{-18} \text{ m}^4/(\text{A}^2\text{s})$ pour le cuivre.

Dans le cas de réseaux monophasés à deux lignes, remplacer I_k'' dans l'Equation (35) par I_{k2}'' .

Le facteur C_D tient compte des augmentations de flèche provoquées par l'allongement élastique et thermique du conducteur, et est donné par

$$C_D = \sqrt{1 + \frac{3}{8} \left[\frac{l}{f_{es}} \right]^2 (\varepsilon_{ela} + \varepsilon_{th})} \quad (36)$$

Le facteur C_F tient compte d'une possible augmentation de la flèche dynamique du conducteur provoquée par une déformation de la courbe du conducteur, et est donné par:

$$C_F = \begin{cases} 1,05 & \text{si } r \leq 0,8 \\ 0,97 + 0,1r & \text{si } 0,8 < r < 1,8 \\ 1,15 & \text{si } r \geq 1,8 \end{cases} \quad (37)$$

La flèche dynamique est obtenue par

$$f_{ed} = C_F C_D f_{es} \quad (38)$$

6.2.5 Force de tension $F_{t,d}$ pendant un court-circuit provoqué par une oscillation (force de tension de court-circuit) avec billette de support en milieu de portée

Les billettes de support présentes dans une portée ont un impact sur le mouvement du conducteur principal. Des billettes de support courtes appropriées empêchent l'oscillation du conducteur principal, l'angle d'oscillation maximal $\delta_{\max}$ d'un conducteur principal analogue sans billette de support ne pouvant être obtenu.

NOTE 1 Les équations peuvent également être utilisées si le point de fixation supérieur de la billette de support est séparé du milieu jusqu'à 10 % de la longueur du conducteur principal.

NOTE 2 Outre les équations suivantes, le calcul peut être conforme à 6.2.3.

Le plan de la billette de la Figure 8 peut être parallèle ou perpendiculaire aux conducteurs principaux. L'angle d'oscillation réel suite au mouvement d'oscillation limité par la billette de support est donné par:

$$\delta = \begin{cases} \arccos \frac{(h + f_{es})^2 + f_{ed}^2 - (l_v^2 - w^2)}{2 f_{ed} (h + f_{es})} & \text{plane parallèle} \\ \arccos \frac{(h + f_{es})^2 + f_{ed}^2 - (l_v^2 - w^2)}{2 f_{ed} \sqrt{(h + f_{es})^2 + w^2}} + \arccos \frac{h + f_{es}}{\sqrt{(h + f_{es})^2 + w^2}} & \text{plane perpendiculaire} \end{cases} \quad (39)$$

avec

h, w hauteur et largeur de la billette de support conformément à la Figure 8;

l_v longueur à la corde de la billette de support.

Si $l_v \geq \sqrt{(h + f_{es} + f_{ed})^2 + w^2}$ en cas de plan parallèle ou si $l_v \geq \sqrt{(h + f_{es})^2 + w^2} + f_{ed}$ en cas de plan perpendiculaire le calcul doit être réaliser avec 6.2.2.

Lors du calcul du paramètre de charge φ , il faut distinguer les cas suivants:

- $\delta \geq \delta_1$:

L'oscillation du conducteur principal n'est pas influencée dans $T_{\text{res}} / 4$ par la billette de support. Le paramètre de charge φ est calculé avec

$$\varphi = \begin{cases} 3 \left(\sqrt{1+r^2} - 1 \right) & \text{si } T_{k1} \geq T_{\text{res}} / 4 \\ 3 \left(r \sin \delta_{\text{end}} + \cos \delta_{\text{end}} - 1 \right) & \text{si } T_{k1} < T_{\text{res}} / 4 \end{cases} \quad (40)$$

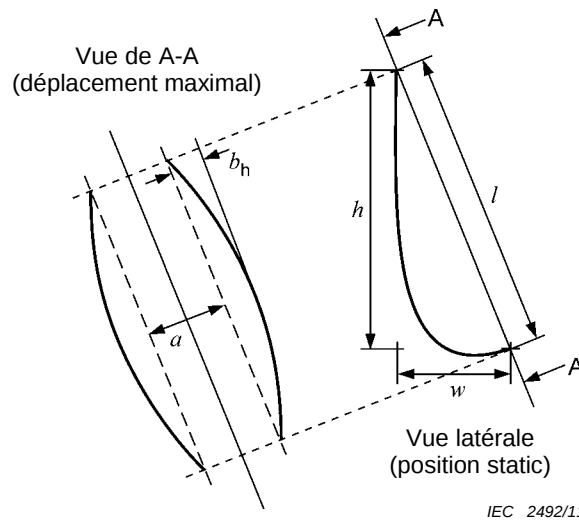
- $\delta < \delta_1$:

L'oscillation du conducteur principal est influencée dans $T_{\text{res}} / 4$ par la billette de support. Le paramètre de charge φ est calculé avec

$$\varphi = \begin{cases} 3 \left(r \sin \delta + \cos \delta - 1 \right) & \text{si } \delta_{\text{end}} \geq \delta \\ 3 \left(r \sin \delta_{\text{end}} + \cos \delta_{\text{end}} - 1 \right) & \text{si } \delta_{\text{end}} < \delta \end{cases} \quad (41)$$

Le facteur ψ est une fonction de ζ et φ et est donné dans la Figure 7. La force de tension de court-circuit $F_{t,d}$ est calculée avec:

$$F_{t,d} = F_{st} (1 + \varphi \psi) \quad (42)$$



IEC 2492/11

Figure 8 – Géométrie d'une billette de support

6.2.6 Force de tension $F_{f,d}$ après un court-circuit provoqué par une chute (force de chute)

A la fin du court-circuit, la portée oscille ou chute. La valeur maximale $F_{f,d}$ d'une portée à la fin de la chute est uniquement significative pour $r > 0,6$ si $\delta_{\text{max}} \geq 70^\circ$ et avec une billette de support en milieu de portée, en plus $\delta \geq 60^\circ$. Dans ce cas, la force de chute est donnée par:

$$F_{f,d} = 1,2 F_{st} \sqrt{1 + 8 \zeta \frac{\delta_{\text{max}}}{180^\circ}} \quad (43)$$

NOTE Dans les portées courtes, la rigidité en flexion de la portée réduit la chute de portée, ce qui signifie que la chute de portée est calculée pour être trop large si la longueur de portée est inférieure à environ 100 fois le diamètre du conducteur, c'est-à-dire $l < 100 d$.

6.2.7 Déplacement horizontal de la portée b_h et distance minimale dans l'air $a_{\min}$

Le déplacement horizontal maximal en milieu de portée, b_h , dû à un court-circuit, est donné par l'équation ci-dessous pour les portées dotées de conducteurs détendus $l_c = l$ connectés à des isolateurs et équipements du support:

$$b_h = \begin{cases} f_{ed} & \text{si } \delta_{\max} \geq 90^\circ \\ f_{ed} \sin \delta_{\max} & \text{si } \delta_{\max} < 90^\circ \end{cases} \quad \text{for } l_c = l \quad (44)$$

Le déplacement horizontal maximal en milieu de portée, b_h , dû à un court-circuit, est donné par l'équation ci-dessous pour les portées dotées de conducteurs tendus $l_c = l - 2l_i$ connectés à des portails à chaînes d'ancrage:

$$b_h = \begin{cases} f_{ed} \sin \delta_1 & \text{si } \delta_{\max} \geq \delta_1 \\ f_{ed} \sin \delta_{\max} & \text{si } \delta_{\max} < \delta_1 \end{cases} \quad \text{for } l_c = l - 2l_i \quad (45)$$

$\delta_{\max}$ et δ_1 sont définis en 6.2.2 et f_{ed} est défini en 6.2.4.

Le déplacement horizontal maximal en milieu de portée, b_h , dû à un court-circuit pour les portées dotées de conducteurs tendus $l_c = l - 2l_i$ connectés à des portails à chaînes d'ancrage et comportant une billette de support en milieu de portée, dépend de la longueur de la billette de support. Il est calculé pour les deux cas:

- $\delta \geq \delta_{\max}$:

La billette de support n'a aucune influence sur le mouvement du câble, et le déplacement horizontal maximal est calculé avec:

$$b_h = \begin{cases} f_{ed} \sin \delta_1 & \text{si } \delta_{\max} \geq \delta_1 \\ f_{ed} \sin \delta_{\max} & \text{si } \delta_{\max} < \delta_1 \end{cases} \quad \text{si } l_c = l - 2l_i \quad (46)$$

- $\delta < \delta_{\max}$:

La billette de support a une influence sur le mouvement du câble, et le déplacement horizontal maximal est calculé avec:

$$b_h = \begin{cases} f_{ed} \sin \delta_1 & \text{si } \delta \geq \delta_1 \\ f_{ed} \sin \delta & \text{si } \delta < \delta_1 \end{cases} \quad \text{si } l_c = l - 2l_i \quad (47)$$

δ_1 , f_{ed} et δ doivent être déterminés conformément à 6.2.2, 6.2.4 et 6.2.5, respectivement.

NOTE Outre les Equations (46) et (47), le calcul peut être effectué à partir de l'Equation (45).

Suite à un court-circuit, les conducteurs d'une configuration plane sont déplacés en milieu de portée dans le cas le plus défavorable, dans un cercle de rayon b_h par rapport à la connexion linéaire des deux points d'ancrage adjacents. La distance entre les milieux des deux conducteurs principaux lors d'un court-circuit biphasé est donnée dans le cas le plus défavorable par:

$$a_{\min} = a - 2b_h \quad (48)$$

6.3 Effets sur les conducteurs principaux verticaux (billettes de support)

Les billettes de support conformes au présent paragraphe sont des raccords de câble verticaux qui sont en principe utilisés entre des équipements ou des isolateurs placés à différentes hauteurs. Préalablement à l'application du présent paragraphe, le coefficient

d'élasticité résultante du point de fixation le plus bas et le plus élevé n'est fondamentalement pas inférieur à la valeur $S = 100 \times 10^3$ N/m recommandée en 6.2.2.

Lors de la configuration en faisceau, 6.4 doit également être pris en compte.

A l'inverse des calculs sur les conducteurs horizontaux conformes à 6.2, la hauteur de la force de court-circuit maximale au point de fixation le plus bas et la flexion du câble sont indépendantes de la masse du câble, de la tension statique du câble et de la durée de court-circuit. Concernant le comportement lors du court-circuit, seules sont pertinentes la géométrie (largeur et hauteur des raccords) et la longueur l_v du câble.

Outre la géométrie, la force de flexion au point de fixation le plus bas dépend également du courant de court-circuit et de l'entraxe des conducteurs. Elle est calculée pour une longueur de câble $1,4 w \leq l_v \leq 3,3 w$ par:

$$F_{t,d} = \frac{5}{3} l_v \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{(I_k'')^2}{a} \frac{l_v}{w} \quad (49)$$

avec des dimensions conformes à la Figure 8

ou

l_v est la longueur du câble;

a est l'entraxe des conducteurs;

w est la largeur de la billette de support

Le déplacement dépend uniquement de la géométrie. Il est calculé pour une longueur de câble $l_v \leq 2 l$ par:

$$b_h = \left[0,60 \sqrt{\frac{l_v}{l}} - 1 + 0,44 \left(\frac{l_v}{l} - 1 \right) - 0,32 \ln \frac{l_v}{l} \right] \frac{l^2}{l_v} \quad (50)$$

avec la distance diagonale l entre deux points de fixation conformément à la Figure 8.

6.4 Effets des conducteurs en faisceau

6.4.1 Dimensions et paramètres caractéristiques

Ce qui suit s'applique à des configurations symétriques de faisceau pour lesquelles les points centraux des sous-conducteurs sont situés sur un cercle, avec des distances égales a_s entre les sous-conducteur adjacents.

Dans le cas des configurations symétriques de faisceau comportant jusqu'à quatre sous-conducteurs, la force de tension peut être calculée par

$$F_{pi,d} = 1,1 F_{t,d} \quad (51)$$

si la distance d'isolement entre les sous-conducteurs et la configuration des entretoises sont telles que les sous-conducteurs du faisceau s'entrechoquent effectivement pendant un court-circuit. $F_{t,d}$ est calculé en 6.2.

Les sous-conducteurs sont considérés comme s'entrechoquant effectivement si la distance d'isolement a_s entre les points centraux des sous-conducteurs adjacents, ainsi que la distance l_s entre deux entretoises adjacentes, satisfont aux Equations (52) ou (53):

$$a_s / d \leq 2,0 \quad \text{et} \quad l_s \geq 50 a_s \quad (52)$$

$$a_s / d \leq 2,5 \quad \text{et} \quad l_s \geq 70 a_s \quad (53)$$

Si la configuration symétrique de faisceau ne remplit pas les conditions indiquées, les équations suivantes s'appliquent pour le calcul de $F_{pi,d}$.

La force de courant de court-circuit est donnée par:

$$F_v = (n-1) \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{I_k''}{n} \right)^2 \frac{l_s}{a_s} \frac{\nu_2}{\nu_3} \quad (54)$$

Dans le cas de réseaux à courant alternatif monophasé, I_k'' des Equations (54), (55), (60) et (63) doit être remplacé par I_{k2}'' . Si le courant de court-circuit monophasé initial I_{k1}'' est supérieur au courant de court-circuit symétrique initial triphasé I_k'' , ce dernier doit être remplacé par I_{k1}'' dans les Equations (54), (55), (60) et (63).

Le facteur ν_2 est donné par la Figure 9, sous la forme d'une fonction de

$$\nu_1 = f \frac{1}{\sin \frac{180^\circ}{n}} \sqrt{\frac{(a_s - d) m_s'}{\frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{I_k''}{n} \right)^2 \frac{n-1}{a_s}}} \quad (55)$$

où f est la fréquence du réseau. Le facteur ν_3 est donné par la Figure 10.

Les facteurs de déformation caractérisant la contraction du faisceau doivent être calculés à partir de

$$\varepsilon_{st} = 1,5 \frac{F_{st} l_s^2 N}{(a_s - d)^2} \left(\sin \frac{180^\circ}{n} \right)^2 \quad (56)$$

$$\varepsilon_{pi} = 0,375 n \frac{F_v l_s^3 N}{(a_s - d)^3} \left(\sin \frac{180^\circ}{n} \right)^3 \quad (57)$$

Le paramètre

$$j = \sqrt{\frac{\varepsilon_{pi}}{1 + \varepsilon_{st}}} \quad (58)$$

détermine la configuration d'un faisceau pendant le passage du courant de court-circuit, comme suit:

- $j \geq 1$ Les sous-conducteurs s'entrechoquent. La force de tension $F_{pi,d}$ est calculée en 6.4.2.
- $j < 1$ Les sous-conducteurs réduisent leur distance mais ne s'entrechoquent pas. La force de tension $F_{pi,d}$ est calculée en 6.4.3.

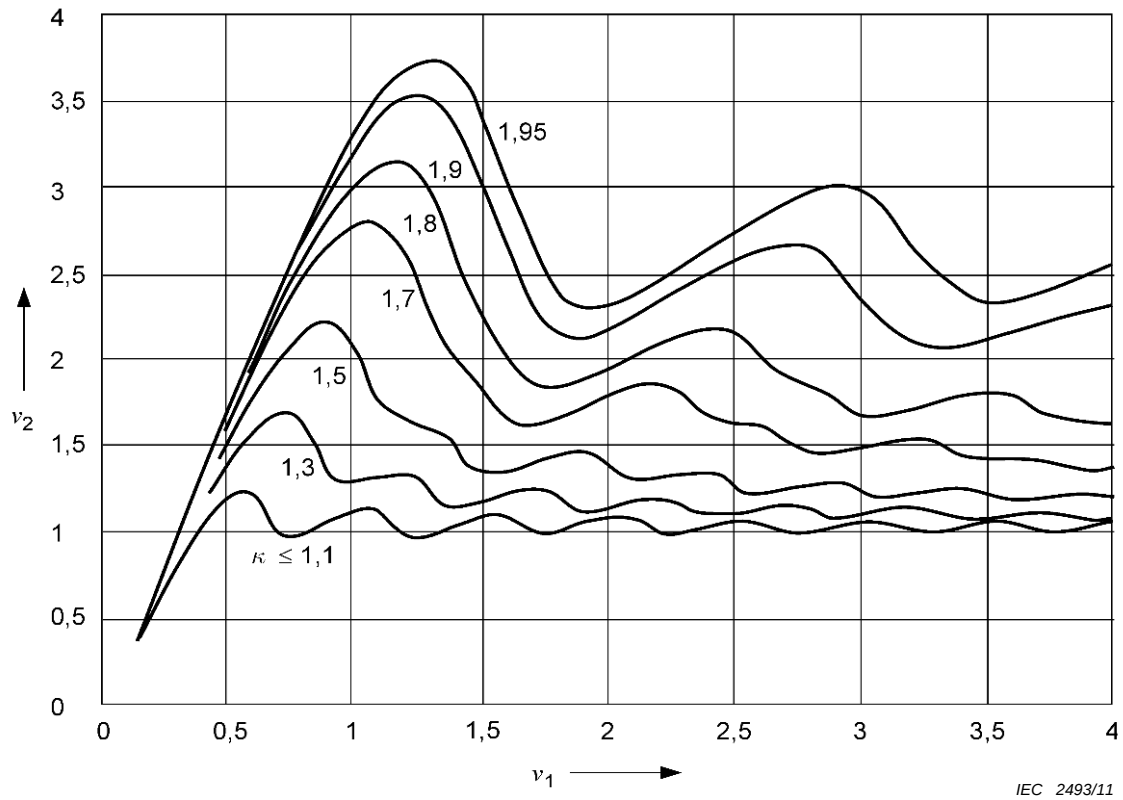


Figure 9 – Relation entre v_2 et v_1

Pour la programmation, l'équation est donnée à l'Article A.7.

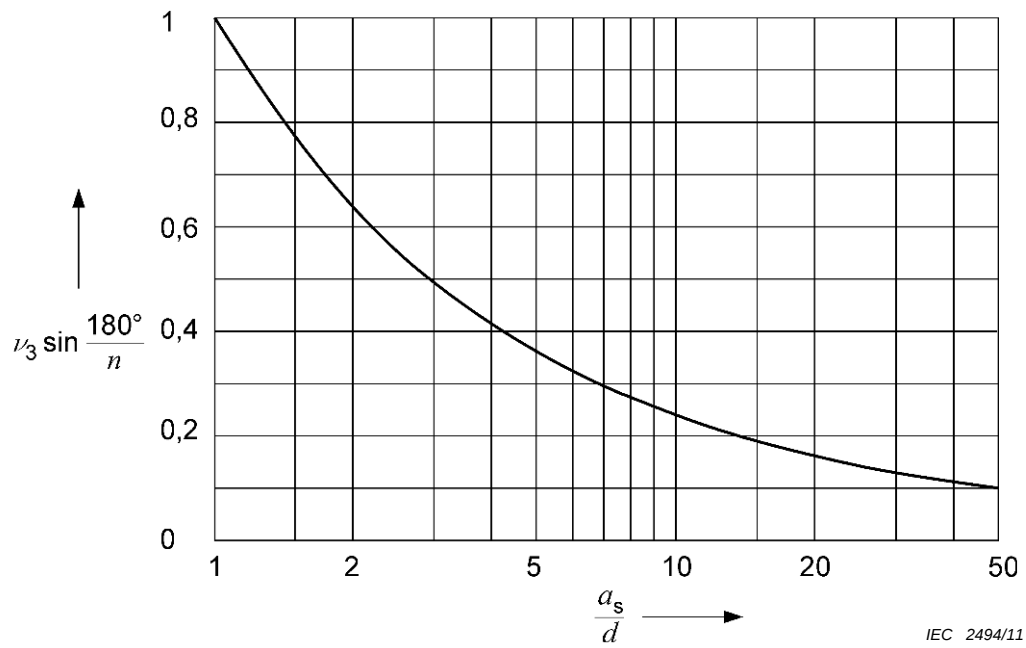


Figure 10 – Relation entre $v_3 \times \sin \frac{180^\circ}{n}$ et a_s/d

Pour la programmation, l'équation est donnée à l'Article A.8.

6.4.2 Force de tension de $F_{pi,d}$ dans le cas de sous-conducteurs s'entrechoquant

Si $j \geq 1$, la force de tension $F_{pi,d}$ est obtenue à partir de

$$F_{pi,d} = F_{st} \left(1 + \frac{\nu_e}{\varepsilon_{st}} \xi \right); \quad (59)$$

ξ est donné par la Figure 11.

ν_e est donné par

$$\nu_e = \frac{1}{2} + \left[\frac{9}{8} n(n-1) \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{I_k''}{n} \right)^2 N \nu_2 \left(\frac{l_s}{a_s - d} \right)^4 \frac{\left(\sin \frac{180^\circ}{n} \right)^4}{\xi^3} \left\{ 1 - \frac{\arctan \sqrt{\nu_4}}{\sqrt{\nu_4}} \right\} - \frac{1}{4} \right]^{1/2} \quad (60)$$

avec

$$\nu_4 = \frac{a_s - d}{d} \quad (61)$$

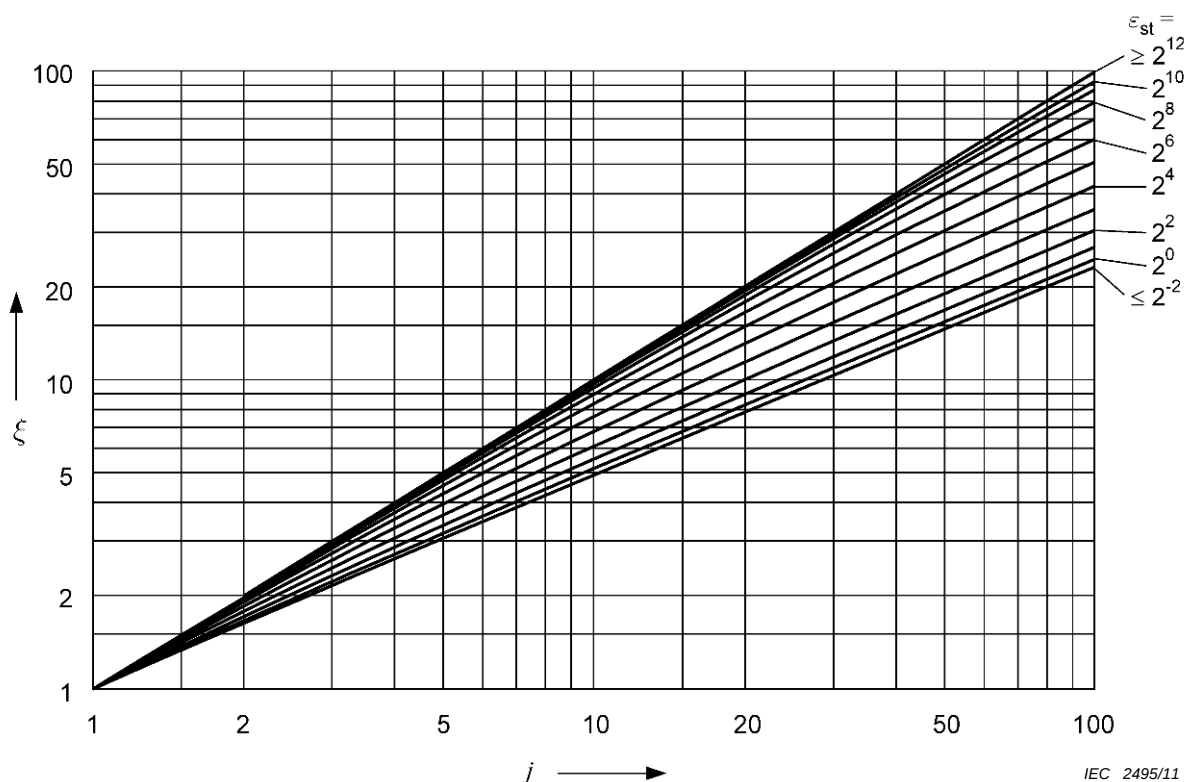


Figure 11 – Relation entre ξ et j et ε_{st}

Pour la programmation, l'équation est donnée à l'Article A.9.

6.4.3 Force de tension de $F_{pi,d}$ dans le cas de sous-conducteurs ne s'entrechoquant pas

Si $j < 1$, la force de tension $F_{pi,d}$ est obtenue à partir de

$$F_{pi,d} = F_{st} \left(1 + \frac{v_e}{\varepsilon_{st}} \eta^2 \right) \quad (62)$$

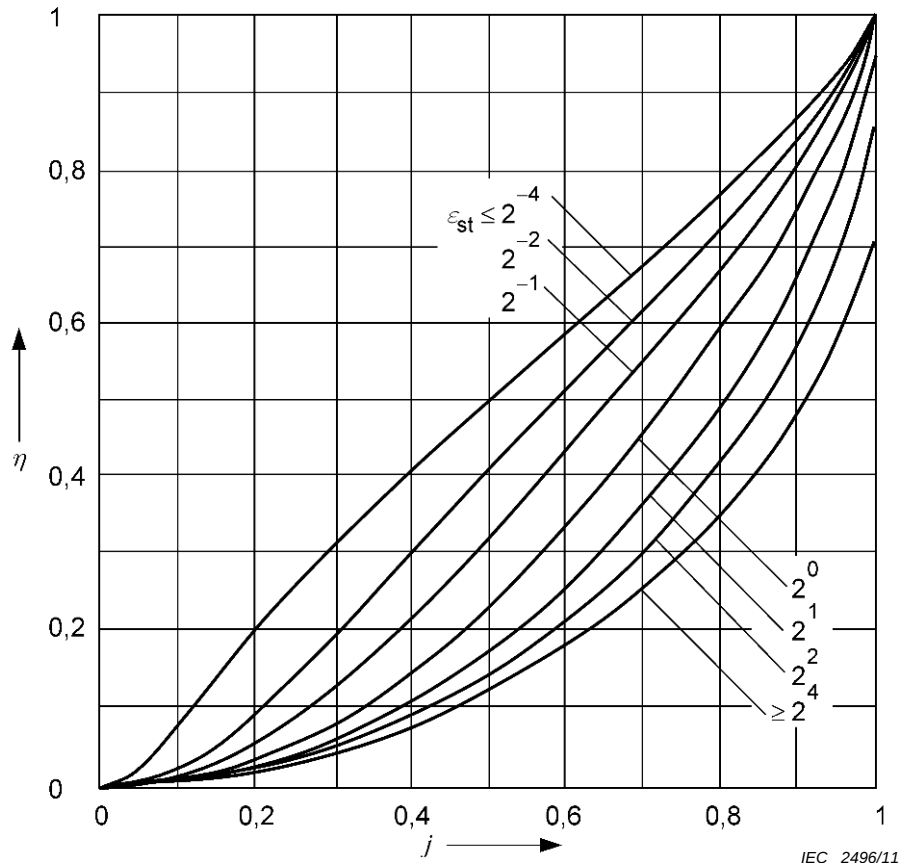
η est alors donné par l'un des schémas de la Figure 12, en fonction du paramètre a_s/d .

v_e est donné par

$$v_e = \frac{1}{2} + \left[\frac{9}{8} n(n-1) \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{I_k''}{n} \right)^2 N v_2 \left(\frac{l_s}{a_s - d} \right)^4 \frac{\left(\sin \frac{180^\circ}{n} \right)^4}{\eta^4} \left\{ 1 - \frac{\arctan \sqrt{v_4}}{\sqrt{v_4}} \right\} - \frac{1}{4} \right]^{1/2} \quad (63)$$

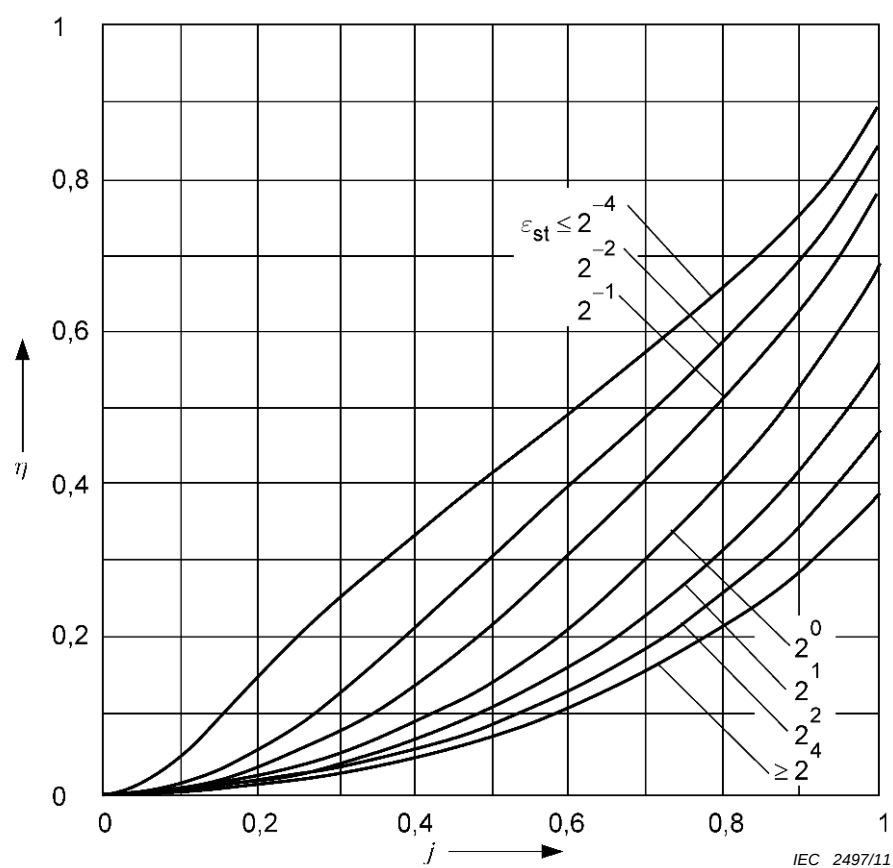
avec

$$v_4 = \eta \frac{a_s - d}{a_s - \eta(a_s - d)} \quad (64)$$



IEC 2496/11

Figure 12a – $2,5 < a_s/d \leq 5,0$

Figure 12b – $5,0 < as/d \leq 10,0$

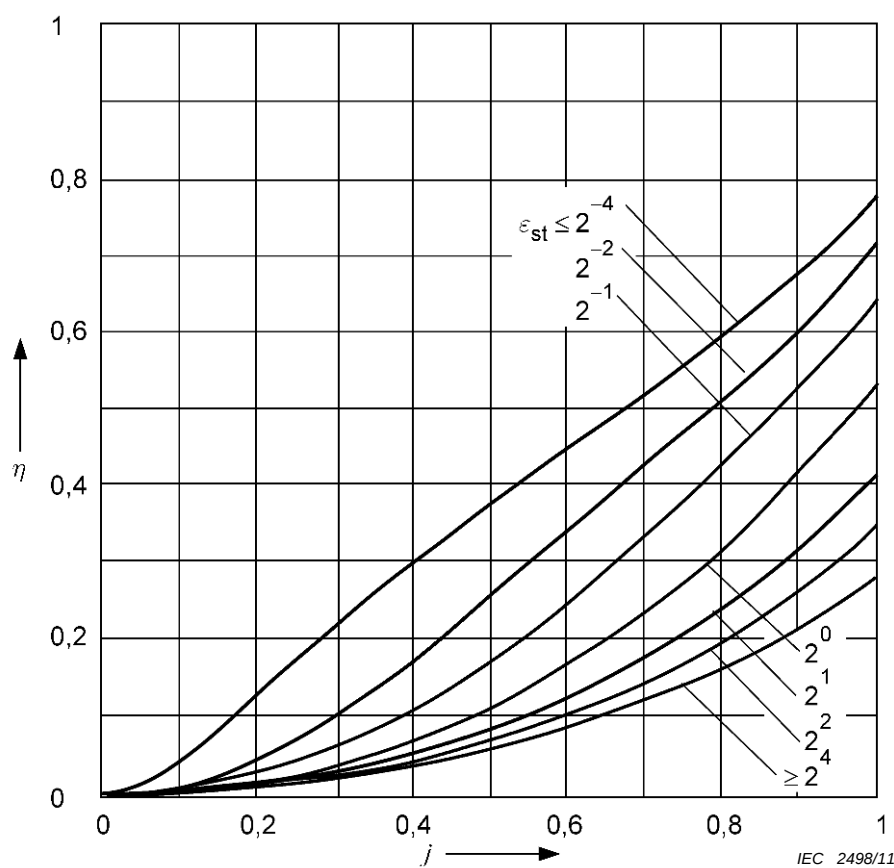


Figure 12c – $10,0 < as/d \leq 15,0$

Figure 12 – Relation entre η et j ainsi que ε_{st}

Pour la programmation, l'équation est donnée à l'Article A.10.

6.5 Charges de structure résultant des conducteurs souples

6.5.1 Charge de conception pour les supports isolants, leurs supports et leurs connecteurs

La valeur maximale de $F_{t,d}$, $F_{f,d}$ ou $F_{pi,d}$ dans le cas des installations comportant des conducteurs souples ne doit pas être supérieure à la valeur de tenue indiquée par le constructeur des supports et des isolateurs. Dans le cas d'un isolateur contraint par une force de flexion, la valeur de tenue assignée est donnée sous la forme d'une force s'exerçant au niveau de la tête d'isolateur.

NOTE 1 Dans le cas d'une force agissant sur un point plus élevé que la tête de l'isolateur, il convient d'utiliser une valeur de tenue inférieure à la valeur de tenue assignée, en fonction du moment de tenue de flexion au niveau de la section critique de l'isolateur.

Les connecteurs des conducteurs souples doivent être spécifiés sur la base de la valeur maximale de $1,5 F_{t,d}$, $1,0 F_{f,d}$ ou $1,0 F_{pi,d}$.

NOTE 2 Le facteur 1,5 tient compte du fait que l'énergie des oscillations est absorbée par la masse des isolateurs.

6.5.2 Charge de conception pour les structures, les isolateurs et les connecteurs avec des forces de tension transmises par les chaînes d'isolateurs

La valeur maximale de $F_{t,d}$, $F_{f,d}$ ou $F_{pi,d}$, dans le cas des portées de conducteurs souples doit être appliquée à la structure, aux isolateurs et aux connecteurs comme étant une charge statique.

NOTE 1 Dans la conception des structures triphasées pour le cas des courts-circuits triphasés, il convient de se rappeler que la valeur maximale de $F_{t,d}$ ou $F_{f,d}$ n'apparaît que dans deux phases et que la troisième phase n'est soumise qu'à la tension statique.

NOTE 2 Dans la conception des structures triphasées pour le cas des courts-circuits triphasés, différentes valeurs maximales de $F_{pi,d}$ peuvent se produire à des moments différents dans les trois phases. Cet effet est à peu près respecté en appliquant la valeur calculée de $F_{pi,d}$ à deux phases de la structure.

6.5.3 Charge de conception pour les fondations

Pour la conception des fondations, 6.5.1 et 6.5.2 s'appliquent en conséquence.

NOTE Compte tenu de l'inertie et du caractère dynamique du court-circuit, il n'est pas nécessaire de tenir compte des effets de l'instabilité lors de la conception des fondations monolithiques (fondations monobloc). Il peut être supposé que la stabilité est assurée si la conception est conforme aux autres cas de charge et aux charges (la force de tension statique ou la charge due au vent, par exemple).

7 Effet thermique sur les conducteurs nus

7.1 Généralités

L'échauffement des conducteurs résultant des courants de court-circuit met en jeu plusieurs phénomènes de caractère non linéaire et d'autres facteurs qui ont été soit négligés, soit établis approximativement, afin de permettre une approche mathématique.

Pour les besoins du présent article, les hypothèses suivantes ont été faites:

- l'effet de peau (influence magnétique d'un conducteur sur lui-même) et l'effet de proximité (influence magnétique entre conducteurs parallèles proches) sont ignorés;
- la relation entre la résistance et la température est supposée linéaire;
- la chaleur spécifique du conducteur est considérée comme constante;
- l'échauffement est considéré comme adiabatique.

Lors de courts-circuits répétés, séparés par de courts intervalles de temps (réenclenchement automatique rapide, par exemple), le refroidissement pendant le court temps mort est d'une importance relativement faible et l'échauffement peut encore être considéré comme adiabatique. Lorsque le temps mort est de plus longue durée (réenclenchement automatique lent, par exemple), la perte de chaleur peut être prise en compte.

Les calculs ne prennent pas en compte l'effet de peau ou l'effet de proximité, c'est-à-dire que le courant est considéré comme uniformément réparti dans toute la section du conducteur. Pour les fortes sections, au-dessus de 600 mm², l'effet de peau doit être pris en compte. Pour de tels calculs, il convient de se reporter à la documentation technique.

NOTE Si le conducteur principal est composé de sous-conducteurs, la répartition non uniforme du courant entre les sous-conducteurs a une influence sur leur échauffement.

7.2 Calcul du courant de court-circuit équivalent thermique

Le courant de court-circuit équivalent thermique doit être calculé conformément à la CEI 60909-0 à partir de la valeur efficace du courant de court-circuit et des facteurs relatifs aux effets thermiques des composantes continues et alternatives du courant de court-circuit en fonction du temps. Si, par réenclenchement automatique, un certain nombre de courts-circuits se produit, un courant de court-circuit équivalent thermique résultant doit être calculé.

Pour calculer le courant de court-circuit équivalent thermique I_{th} dans un réseau triphasé, le court-circuit triphasé équilibré est en principe un élément décisif. Dans le cas des réseaux monophasés, il convient de calculer le courant de court-circuit équivalent thermique conformément à la CEI 60909-0 de la même manière.

Dans le cas des dispositifs de limitation du courant, le courant de court-circuit équivalent thermique I_{th} et la durée associée du courant de court-circuit T_k sont donnés par le constructeur.

7.3 Calcul de l'échauffement et de la densité de courant de tenue de courte durée assigné des conducteurs

L'échauffement d'un conducteur résultant d'un court-circuit est fonction de la durée du courant de court-circuit, du courant de court-circuit équivalent thermique et du matériau constitutif du conducteur.

En utilisant les schémas de la Figure 13, l'échauffement d'un conducteur peut être calculé lorsque la densité de courant de tenue de courte durée assigné est connue, ou vice versa.

Les températures les plus élevées recommandées pendant un court-circuit pour différents conducteurs sont indiquées dans le Tableau 6. Si ces températures sont atteintes, une diminution négligeable de la résistance mécanique peut se produire, qui empiriquement ne met pas en cause la sécurité. La température maximale admissible du support doit être prise en compte.

Tableau 6 – Températures maximales recommandées pour des conducteurs contraints mécaniquement pendant un court-circuit

Type de conducteur	Température maximale recommandée du conducteur pendant un court-circuit °C
Conducteur nu, massif ou câblé: cuivre, aluminium ou alliage d'aluminium	200
Conducteur nu, massif ou câblé: acier	300

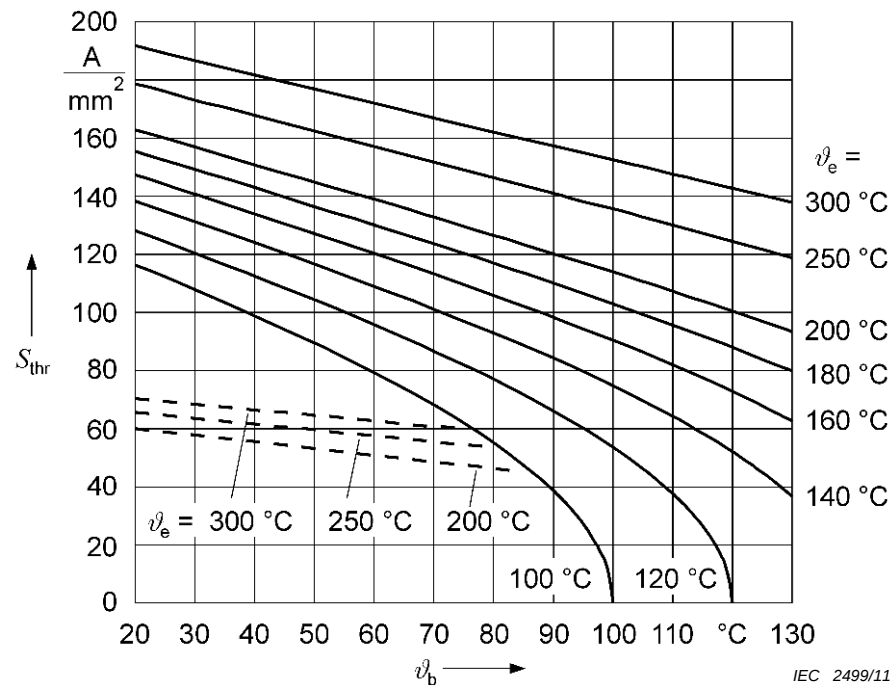


Figure 13a – Lignes continues, cuivre; lignes en pointillés, acier faiblement allié

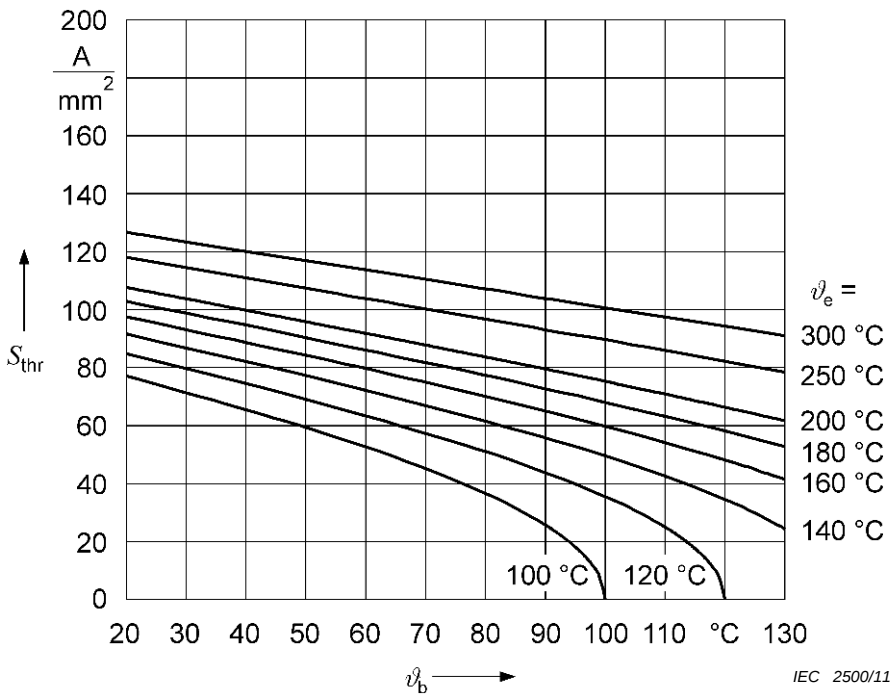


Figure 13b – Aluminium, alliage d'aluminium, conducteur d'aluminium renforcé d'acier (ACSR)

Figure 13 – Relation entre la densité de courant de tenue de court-circuit assigné ($T_{kr} = 1$ s) et la température du conducteur

Pour la programmation, les équations sont données à l'Article A.11.

7.4 Calcul de la résistance thermique de courte durée pour différentes durées de court-circuit

Les conducteurs nus ont une résistance thermique de courte durée suffisante pourvu que la densité de courant de court-circuit équivalent thermique S_{th} satisfasse à la relation suivante, pour toute valeur de T_k :

$$S_{th} \leq S_{thr} \sqrt{\frac{T_{kr}}{T_k}} \quad (65)$$

La densité de courant de tenue de courte durée assigné S_{thr} est indiquée dans la Figure 13, pour $T_{kr} = 1$ s.

L'âme en acier du conducteur d'aluminium renforcé d'acier (ACSR) ne doit pas être prise en compte lors du calcul de la surface de la section pour la détermination de la densité du courant.

Lorsqu'un certain nombre de courts-circuits se produit sur un intervalle de temps court, la durée du court-circuit résultant est

$$T_k = \sum_{i=1}^n T_{ki} \quad (66)$$

Annexe A (normative)

Équations pour la détermination des schémas

A.1 Symboles

En complément de ceux donnés en 3.2, les symboles suivants sont utilisés:

a_{sw}	Distance équivalente entre les sous-conducteurs d'un faisceau	m
c	Capacité thermique spécifique	J/(kg K)
c_c	Facteur relatif au raidissement des pièces de liaison	1
f_η	Facteur relatif à l'approche du sous-conducteur dans le faisceau	1
T_{pi}	Durée entre le début du court-circuit et l'arrivée de $F_{pi,d}$	s
y_a	Distance d'isolement des faisceaux ne s'entrechoquant pas pendant le court-circuit	m
α_{20}	Facteur de température	1/K
ξ_m	Facteur relatif à l'influence de la masse des pièces de liaison sur la fréquence propre appropriée	1
κ_{20}	Conductivité spécifique à 20 °C	1/(Ωm)
ρ	Masse spécifique	kg/m ³

A.2 Figure 1

Le facteur k_{1s} est donné par l'équation suivante:

$$\begin{aligned}
 k_{1s} = & \left\{ - \left(\frac{(a_{1s}/c_s) + 1}{b_s/c_s} \right)^3 \ln \frac{[(a_{1s}/c_s) + 1]^2 + (b_s/c_s)^2}{[(a_{1s}/c_s) + 1]^2} + 2 \left(\frac{a_{1s}/c_s}{b_s/c_s} \right)^3 \ln \frac{(a_{1s}/c_s)^2 + (b_s/c_s)^2}{(a_{1s}/c_s)^2} \right. \\
 & - \left(\frac{(a_{1s}/c_s) - 1}{b_s/c_s} \right)^3 \ln \frac{[(a_{1s}/c_s) - 1]^2 + (b_s/c_s)^2}{[(a_{1s}/c_s) - 1]^2} \\
 & + 3 \left[\frac{a_{1s}/c_s}{b_s/c_s} \ln \frac{[(a_{1s}/c_s) + 1]^2 + (b_s/c_s)^2}{(a_{1s}/c_s)^2 + (b_s/c_s)^2} + \frac{1}{b_s/c_s} \ln \frac{[(a_{1s}/c_s) + 1]^2 + (b_s/c_s)^2}{[(a_{1s}/c_s) - 1]^2 + (b_s/c_s)^2} \right. \\
 & \left. \left. - \frac{a_{1s}/c_s}{b_s/c_s} \ln \frac{(a_{1s}/c_s)^2 + (b_s/c_s)^2}{[(a_{1s}/c_s) - 1]^2 + (b_s/c_s)^2} \right] \right. \\
 & + 6 \left[\left(\frac{(a_{1s}/c_s) + 1}{b_s/c_s} \right)^2 \arctan \frac{b_s/c_s}{(a_{1s}/c_s) + 1} - 2 \left(\frac{a_{1s}/c_s}{b_s/c_s} \right)^2 \arctan \frac{b_s/c_s}{a_{1s}/c_s} \right. \\
 & \left. + \left(\frac{(a_{1s}/c_s) - 1}{b_s/c_s} \right)^2 \arctan \frac{b_s/c_s}{(a_{1s}/c_s) - 1} \right] \\
 & \left. + 2 \left[\arctan \frac{(a_{1s}/c_s) + 1}{b_s/c_s} - 2 \arctan \frac{a_{1s}/c_s}{b_s/c_s} + \arctan \frac{(a_{1s}/c_s) - 1}{b_s/c_s} \right] \right\} \frac{a_{1s}/c_s \cdot b_s/c_s}{6}
 \end{aligned}$$

A.3 Figure 3

Le facteur e est donné par l'équation:

$$e = \frac{c_c}{\sqrt{1 + \xi_m \frac{m_z}{n m'_s l}}}$$

avec

k	l_s / l	ξ_m	c_c	
			Figure 3b	Figure 3c
0	–	0,0	1,0	1,0
1	0,5	2,5	1,0	1,0
2	0,33	3,0	1,48	1,0
2	0,5	1,5	1,75	1,0
3	0,25	4,0	1,75	1,0
4	0,2	5,0	2,14	1,0
5	0,17	6,0	2,46	1,0
6	0,14	7,0	2,77	1,0

A.4 Figure 4

Le facteur V_F est donné par:

f_{cm}/f	Facteur V_F	
	Court-circuit triphasé	Court-circuit biphasé
<0,04	$0,232 + 3,52 e^{-1,45\kappa} + 0,166 \lg(f_{cm}/f)^a$	
0,04 ... 0,8	valeur maximale de V_{F1} ou V_{F2} $V_{F1} = 0,839 + 3,52 e^{-1,45\kappa} + 0,6 \lg(f_{cm}/f)^a$ $V_{F2} = 2,38 + 6,00 \lg(f_{cm}/f)$	
0,8 ... 1,2		1,8
1,2 ... 1,6	$1,23 + 7,2 \lg(f_{cm}/f)$	1,8
1,6 ... 2,4	2,7	1,8
2,4 ... 2,74	$8,59 - 15,5 \lg(f_{cm}/f)$	1,8
2,74 ... 3,0	$8,59 - 15,5 \lg(f_{cm}/f)$	
3,0 ... 6,0	$1,50 - 0,646 \lg(f_{cm}/f)$	
>6,0	1,0	

^a Si $\kappa > 1,6$, $\kappa = 1,6$ doit être utilisé.

Le facteur $V_{\sigma m}$ est donné par:

f_{cm}/f	Facteur $V_{\sigma m}$
$<0,04$	$0,0929 + 4,49 e^{-1,68\kappa} + 0,0664 \lg(f_{cm}/f)^a$
$0,04 \dots 0,8$	valeur minimale de $V_{\sigma 1}$ ou $V_{\sigma 2}$ $V_{\sigma 1} = 0,756 + 4,49 e^{-1,68\kappa} + 0,54 \lg(f_{cm}/f)^a$ $V_{\sigma 2} = 1,0$
$>0,8$	1
^a Si $\kappa > 1,6$, $\kappa = 1,6$ doit être utilisé.	

Dans le cas de $V_{\sigma s}$, les mêmes équations que pour $V_{\sigma m}$ doivent être utilisées, mais f_{cm}/f doit être remplacé par f_{cs}/f .

A.5 Figure 5

Les facteurs V_{rm} et V_{rs} son donnés par:

$$V_{rm} = \begin{cases} 1,8 & \text{si } f_{cm}/f \leq 0,05 \\ 1,0 - 0,615 \lg(f_{cm}/f) & \text{si } 0,05 < f_{cm}/f < 1,0 \\ 1,0 & \text{si } f_{cm}/f \geq 1,0 \end{cases}$$

$$V_{rs} = \begin{cases} 1,8 & \text{si } f_{cs}/f \leq 0,05 \\ 1,0 - 0,615 \lg(f_{cs}/f) & \text{si } 0,05 < f_{cs}/f < 1,0 \\ 1,0 & \text{si } f_{cs}/f \geq 1,0 \end{cases}$$

A.6 Figure 7

Le facteur ψ est fonction de ζ et φ . Il peut être calculé comme la solution réelle de l'équation:

$$\varphi^2 \psi^3 + \varphi(2 + \zeta) \psi^2 + (1 + 2\zeta) \psi - \zeta(2 + \varphi) = 0$$

avec $0 < \psi \leq 1$.

A.7 Figure 9

Le facteur v_2 est donné par:

$$v_2 = 1 - \frac{\sin(4\pi f T_{pi} - 2\gamma) + \sin 2\gamma}{4\pi f T_{pi}} + \frac{f\tau}{f T_{pi}} \left(1 - e^{-\frac{2f T_{pi}}{f\tau}} \right) \sin^2 \gamma$$

$$- \frac{8\pi f \tau \sin \gamma}{1 + (2\pi f \tau)^2} \left\{ \left(2\pi f \tau \frac{\cos(2\pi f T_{pi} - \gamma)}{2\pi f T_{pi}} + \frac{\sin(2\pi f T_{pi} - \gamma)}{2\pi f T_{pi}} \right) e^{-\frac{f T_{pi}}{f\tau}} + \frac{\sin \gamma - 2\pi f \tau \cos \gamma}{2\pi f T_{pi}} \right\}$$

où τ est la constante de temps du réseau, constante qui peut être calculée conformément à la CEI 60909-0:

$$\frac{1}{\tau} = -\frac{2\pi f}{3} \ln \frac{\kappa - 1,02}{0,98} \quad \text{avec} \quad \kappa \geq 1,1 \quad \text{et} \quad \gamma = \arctan(2\pi f \tau)$$

Si $\kappa < 1,1$ $\kappa = 1,1$ doit être utilisé.

$f T_{pi}$ est la solution de l'équation:

$$v_1 = f T_{pi} \sqrt{v_2}$$

A.8 Figure 10

Le facteur v_3 est donné par:

$$v_3 = \frac{d/a_s}{\sin \frac{180^\circ}{n}} \frac{\sqrt{(a_s/d) - 1}}{\arctan \sqrt{(a_s/d) - 1}}$$

A.9 Figure 11

ξ est la solution réelle de l'équation:

$$\xi^3 + \varepsilon_{st} \xi^2 - j^2 (1 + \varepsilon_{st}) = 0$$

avec $j^{2/3} \leq \xi \leq j$

A.10 Figure 12

La fonction η de la Figure 12 peut être calculée de manière numérique en résolvant l'équation cubique avec des coefficients non linéaires:

$$\eta^3 + \varepsilon_{st} \eta - j^2 (1 + \varepsilon_{st}) f_\eta = 0$$

avec $0 < \eta \leq 1$, et

$$f_\eta = \frac{v_3}{a_{sw}/a_s}$$

$$a_{sw}/a_s = \frac{2 y_a/a_s}{\sin \frac{180^\circ}{n}} \frac{\sqrt{\frac{1 - 2 y_a/a_s}{2 y_a/a_s}}}{\arctan \sqrt{\frac{1 - 2 y_a/a_s}{2 y_a/a_s}}}$$

$$2 y_a/a_s = 1 - \eta (1 - d/a_s)$$

A.11 Figure 13

La densité de courant de tenue de court-circuit assigné S_{thr} est donnée par:

$$S_{\text{thr}} = \frac{1}{\sqrt{T_{\text{kr}}}} \sqrt{\frac{\kappa_{20} c \rho}{\alpha_{20}}} \ln \frac{1 + \alpha_{20} (\vartheta_e - 20 \text{ °C})}{1 + \alpha_{20} (\vartheta_b - 20 \text{ °C})}$$

avec les données suivantes en ce qui concerne les matériaux:

Symbole	Unité SI	Cuivre	Alliage d'aluminium, conducteur d'aluminium renforcé d'acier (ACSR)	Acier
c	J/(kg K)	390	910	480
ρ	kg/m ³	8 900	2 700	7 850
κ_{20}	1/(Ωm)	56×10^6	$34,8 \times 10^6$	$7,25 \times 10^6$
α_{20}	1/K	0,003 9	0,004	0,004 5

Si des températures de base autres que 20 °C sont utilisées, l'équation donnant S_{thr} doit être modifiée.

Bibliographie

- [1] CEI 61936-1, *Installations électriques en courant alternatif de puissance supérieure à 1 kV – Partie 1: Règles communes*
 - [2] CIGRÉ, *The mechanical effects of short-circuit currents in open air substations (Rigid and flexible conductors)*. Vol. 105. Paris: CIGRÉ SC 23, WG 11, 1996.
 - [3] CIGRÉ, *The mechanical effects of short-circuit currents in open air substations (Part II)*. Vol. 214. Paris: CIGRÉ SC 23, WG 03, 2002.
-

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