

RAPPORT TECHNIQUE TECHNICAL REPORT

**CEI
IEC
865-2**

Première édition
First edition
1994-06

Courants de court-circuit – Calcul des effets –

Partie 2:
Exemples de calcul

Short-circuit currents – Calculation of effects –

Part 2:
Examples of calculation



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 865-2: 1994

Validité de la présente publication

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

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

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

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

Terminologie

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

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

Symboles graphiques et littéraux

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

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

et pour les appareils électromédicaux,

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

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

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

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

Validity of this publication

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

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

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

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

Terminology

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

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

Graphical and letter symbols

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

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

and for medical electrical equipment,

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

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

IEC publications prepared by the same technical committee

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

**RAPPORT
TECHNIQUE – TYPE 2
TECHNICAL
REPORT – TYPE 2**

**CEI
IEC
865-2**

Première édition
First edition
1994-06

Courants de court-circuit – Calcul des effets –

Partie 2:
Exemples de calcul

Short-circuit currents – Calculation of effects –

Part 2:
Examples of calculation

© CEI 1994 Droits de reproduction réservés — Copyright — all rights reserved

Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

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

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



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

X

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

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	4
Articles	
1 Domaine d'application et objet	8
2 Document de référence	8
3 Symboles et unités	8
4 Exemple 1 – Effets mécaniques sur une installation 10 kV avec des conducteurs rigides uniques	10
4.1 Données	10
4.2 Force maximale sur le conducteur principal central	12
4.3 Contrainte des conducteurs et forces sur les supports	12
5 Exemple 2 – Effets mécaniques sur une installation 10 kV avec des conducteurs rigides multiples	18
5.1 Données (complémentaires à celles de l'exemple 1)	18
5.2 Force maximale sur le conducteur principal central	18
5.3 Force maximale sur le sous-conducteur extérieur entre deux pièces de connexion	20
5.4 Contrainte des conducteurs et forces sur les supports	20
6 Exemple 3 – Effets mécaniques sur une installation haute tension avec des conducteurs rigides	28
6.1 Données	28
6.2 Force maximale sur le conducteur principal central	30
6.3 Contrainte des conducteurs et forces sur les supports	30
7 Exemple 4 – Effets mécaniques sur une installation 110 kV avec des conducteurs détendus	42
7.1 Données	44
7.2 Force électromagnétique et paramètres caractéristiques	44
7.3 Déplacement horizontal de la portée b_h et distance minimale dans l'air $a_{\min}$	54
7.4 Conclusions	56
8 Exemple 5 – Effets mécaniques sur des conducteurs tendus	56
8.1 Données communes	58
8.2 Entraxe des sous-conducteurs $a_s = 0,1$ m	60
8.3 Entraxe des sous-conducteurs, $a_s = 0,4$ m	72
9 Exemple 6 – Effet thermique sur les conducteurs nus	80
9.1 Données	80
9.2 Calculs	80
9.3 Conclusion	80

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
Clause	
1 Scope and object	9
2 Reference document	9
3 Symbols and units	9
4 Example 1 – Mechanical effects on a 10 kV arrangement with single rigid conductors	11
4.1 Data	11
4.2 Maximum force on the central main conductor	13
4.3 Conductor stress and forces on supports	13
5 Example 2 – Mechanical effects on a 10 kV arrangement with multiple rigid conductors	19
5.1 Data (additional to the data of example 1)	19
5.2 Maximum force on the central main conductor	19
5.3 Maximum force on the outer sub-conductor between two adjacent connecting pieces	21
5.4 Conductor stress and forces on support	21
6 Example 3 – Mechanical effects on a high-voltage arrangement with rigid conductors	29
6.1 Data	29
6.2 Maximum force on the central main conductor	31
6.3 Conductor stress and forces on supports	31
7 Example 4 – Mechanical effects on a 110 kV arrangement with slack conductors	43
7.1 Data	45
7.2 Electromagnetic forces and characteristic parameters	45
7.3 Horizontal span displacement b_h and air clearance $a_{\min}$	55
7.4 Conclusions	57
8 Example 5 – Mechanical effects on strained conductors	57
8.1 Common data	59
8.2 Centre-line distance between sub-conductors $a_s = 0,1$ m	61
8.3 Centre-line distance between sub-conductors, $a_s = 0,4$ m	73
9 Example 6 – Thermal effect on bare conductors	81
9.1 Data	81
9.2 Calculations	81
9.3 Conclusion	81

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

COURANTS DE COURT-CIRCUIT – CALCUL DES EFFETS –

Partie 2: Exemples de calcul

AVANT-PROPOS

- 1) La CEI (Commission Electrotechnique Internationale) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI, entre autres activités, publie des Normes internationales. Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI en ce qui concerne les questions techniques, préparés par les comités d'études où sont représentés tous les Comités nationaux s'intéressant à ces questions, expriment dans la plus grande mesure possible un accord international sur les sujets examinés.
- 3) Ces décisions constituent des recommandations internationales publiées sous forme de normes, de rapports techniques ou de guides et agréées comme telles par les Comités nationaux.
- 4) Dans le but d'encourager l'unification internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent à appliquer de façon transparente, dans toute la mesure possible, les Normes internationales de la CEI dans leurs normes nationales et régionales. Toute divergence entre la norme de la CEI et la norme nationale ou régionale correspondante doit être indiquée en termes clairs dans cette dernière.

La tâche principale des comités d'études de la CEI est d'élaborer des Normes internationales. Exceptionnellement, un comité d'études peut proposer la publication d'un rapport technique de l'un des types suivants:

- type 1, lorsque, en dépit de maints efforts, l'accord requis ne peut être réalisé en faveur de la publication d'une Norme internationale;
- type 2, lorsque le sujet en question est encore en cours de développement technique ou lorsque, pour une raison quelconque, la possibilité d'un accord pour la publication d'une Norme internationale peut être envisagée pour l'avenir mais pas dans l'immédiat;
- type 3, lorsqu'un comité d'études a réuni des données de nature différente de celles qui sont normalement publiées comme Normes internationales, cela pouvant comprendre, par exemple, des informations sur l'état de la technique.

Les rapports techniques de types 1 et 2 font l'objet d'un nouvel examen trois ans au plus tard après leur publication afin de décider éventuellement de leur transformation en Normes internationales. Les rapports techniques de type 3 ne doivent pas nécessairement être révisés avant que les données qu'ils contiennent ne soient plus jugées valables ou utiles.

La CEI 865-2, rapport technique de type 2, a été établie par le comité d'études 73 de la CEI: Courants de court-circuit.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

SHORT-CIRCUIT CURRENTS – CALCULATION OF EFFECTS –

Part 2: Examples of calculation

FOREWORD

- 1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the IEC is to promote international cooperation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, the IEC publishes International Standards. Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. The IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, prepared by technical committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.
- 3) They have the form of recommendations for international use published in the form of standards, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.

The main task of IEC technical committees is to prepare International Standards. In exceptional circumstances, a technical committee may propose the publication of a technical report of one of the following types:

- type 1, when the required support cannot be obtained for the publication of an International Standard, despite repeated efforts;
- type 2, when the subject is still under technical development or where for any other reason there is the future but not immediate possibility of an agreement on an International Standard;
- type 3, when a technical committee has collected data of a different kind from that which is normally published as an International Standard, for example "state of the art".

Technical reports of types 1 and 2 are subject to review within three years of publication to decide whether they can be transformed into International Standards. Technical reports of type 3 do not necessarily have to be reviewed until the data they provide are considered to be no longer valid or useful.

IEC 865-2, which is a technical report of type 2, has been prepared by IEC technical committee 73: Short-circuit currents.

Le texte de ce rapport technique est issu des documents suivants:

Projet de comité	Rapport de vote
73(SEC)49	73(SEC)59

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

Le présent document est publié dans la série des rapports techniques de type 2 (conformément au paragraphe G.4.2.2 de la partie 1 des Directives CEI/ISO) comme «norme prospective d'application provisoire» dans le domaine du calcul des effets des courants de court-circuit, car il est urgent d'avoir des indications sur la meilleure façon d'utiliser les normes dans ce domaine afin de répondre à un besoin déterminé.

Ce document ne doit pas être considéré comme une «norme internationale». Il est proposé pour une mise en oeuvre provisoire, dans le but de recueillir des informations et d'acquérir de l'expérience quant à son application dans la pratique. Il est de règle d'envoyer les observations éventuelles relatives au contenu de ce document au Bureau Central de la CEI.

Il sera procédé à un nouvel examen de ce rapport technique de type 2 trois ans au plus tard après sa publication, avec la faculté d'en prolonger la validité pendant trois autres années, de le transformer en Norme internationale ou de l'annuler.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 865-2:1994

The text of this technical report is based on the following documents:

Committee draft	Report on voting
73(SEC)49	73(SEC)59

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

This document is issued in the type 2 Technical Report series of publications (according to G.4.2.2 of Part 1 of the IEC/ISO Directives) as a "prospective standard for provisional application" in the field of calculation of effects in short-circuit currents, because there is an urgent requirement for guidance on how standards in this field should be used to meet an identified need.

This document is not to be regarded as an "International Standard". It is proposed for provisional application so that information and experience of its use in practice may be gathered. Comments on the content of this document should be sent to the IEC Central Office.

A review of this type 2 Technical Report will be carried out not later than three years after its publication, with the options of either extension for a further three years or conversion to an International Standard or withdrawal.

COURANTS DE COURT-CIRCUIT – CALCUL DES EFFETS –

Partie 2: Exemples de calcul

1 Domaine d'application et objet

Le présent Rapport technique de la CEI a pour but de montrer l'application des procédures de calcul des effets mécaniques et thermiques des courants de court-circuit présentées dans la CEI 865-1. Le présent rapport technique est donc un complément à la CEI 865-1. Toutefois, il ne change pas la base des procédures normalisées données dans cette publication.

NOTES

- 1 Les exemples du présent rapport technique montrent comment effectuer des calculs conformément à la CEI 865-1, d'une façon simple et facile à suivre. Ces calculs simplifiés ne sont pas destinés à servir de contrôle pour des programmes de calculateur.
- 2 Les numéros entre parenthèses à la fin des équations renvoient aux équations de la CEI 865-1.
- 3 Les tensions de réseau s'appliquent à des tensions nominales.

2 Document de référence

CEI 865-1: 1993, *Courants de court-circuit – Calcul des effets – Partie 1: Définitions et méthodes de calcul*

3 Symboles et unités

Pour les symboles et unités, il y a lieu de se référer à la CEI 865-1.

SHORT-CIRCUIT CURRENTS – CALCULATION OF EFFECTS

Part 2: Examples of calculation

1 Scope and object

The object of this IEC Technical Report is to show the application of procedures for the calculation of mechanical and thermal effects due to short circuits as presented in IEC 865-1. Thus, this technical report is an addition to IEC 865-1. It does not, however, change the basis for standardized procedures given in that publication.

NOTES

- 1 The examples in this Technical Report illustrate how to make the calculations according to IEC 865-1 in a simplified and easy-to-follow manner. They are not intended as a check for computer programs.
- 2 The numbers in parentheses at the end of the equations refer to the equations in IEC 865-1.
- 3 The system voltages are referred to as nominal voltages.

2 Reference document

IEC 865-1: 1993, *Short-circuit currents – Calculation of effects – Part 1: Definitions and calculation methods*

3 Symbols and units

For symbols and units, reference is made to IEC 865-1.

4 Exemple 1 – Effets mécaniques sur une installation 10 kV avec des conducteurs rigides uniques

La base de calcul pour le présent exemple est un jeu de barres triphasé 10 kV comportant un conducteur par phase. Les conducteurs sont des barres continues avec des supports simples équidistants. La disposition des conducteurs est indiquée à la figure 1.

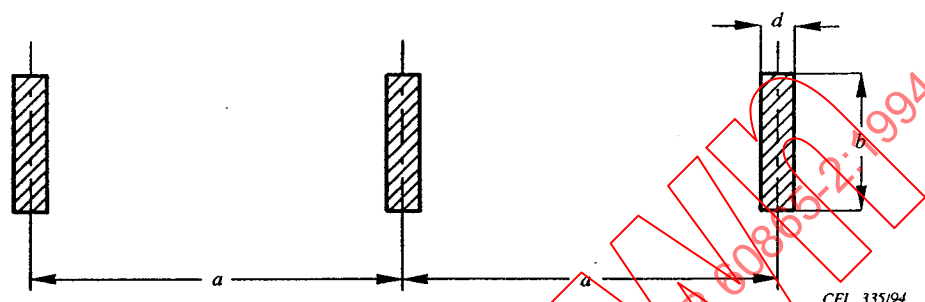


Figure 1 – Disposition des conducteurs

4.1 Données

Courant de court-circuit triphasé symétrique initial
(valeur efficace)

$$I''_{k3} = 16 \text{ kA}$$

Facteur pour le calcul de la valeur de crête du courant
de court-circuit

$$\kappa = 1,35$$

Fréquence du réseau

$$f = 50 \text{ Hz}$$

Pas de réenclenchement automatique

Nombre de portées

$$\geq 3$$

Distance entre les supports

$$l = 1 \text{ m}$$

Entraxe des conducteurs

$$a = 0,2 \text{ m}$$

Conducteur rectangulaire en AlMgSi0,5

– Dimensions

$$b = 60 \text{ mm}$$

$$d = 10 \text{ mm}$$

– Masse par unité de longueur

$$m' = 1,62 \text{ kg/m}$$

– Module de Young

$$E = 70\,000 \text{ N/mm}^2$$

– Contrainte correspondant à la limite élastique

$$R_{p0,2} = 120 \text{ N/mm}^2 \\ \text{à } 180 \text{ N/mm}^2$$

4 Example 1 – Mechanical effects on a 10 kV arrangement with single rigid conductors

The basis for the calculation in this example is a three-phase 10 kV busbar with one conductor per phase. The conductors are continuous beams with equidistant simple supports. The conductor arrangement is shown in figure 1.

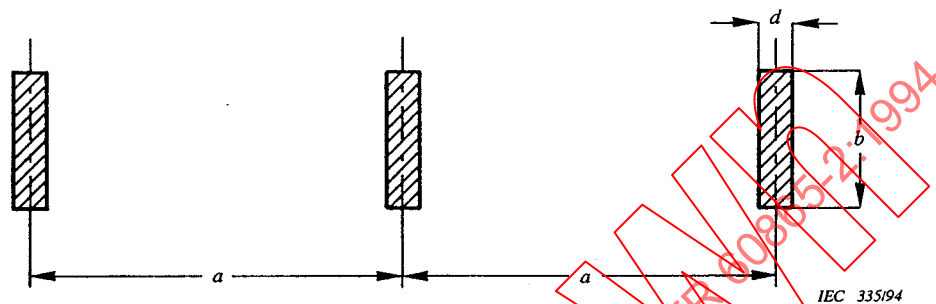


Figure 1 – Conductor arrangement

4.1 Data

Three-phase initial symmetrical short-circuit current (r.m.s.) $I''_{k3} = 16 \text{ kA}$

Factor for calculation of peak short-circuit current $\kappa = 1,35$

System frequency $f = 50 \text{ Hz}$
No automatic reclosing

Number of spans ≥ 3

Distance between supports $l = 1 \text{ m}$

Centre-line distance between conductors $a = 0,2 \text{ m}$

Rectangular conductor of AlMgSi0,5

– Dimensions $b = 60 \text{ mm}$
 $d = 10 \text{ mm}$

– Mass per unit length $m' = 1,62 \text{ kg/m}$
– Young's modulus $E = 70\,000 \text{ N/mm}^2$

– Stress corresponding to the yield point $R_{p0,2} = 120 \text{ N/mm}^2 \text{ up to } 180 \text{ N/mm}^2$

4.2 Force maximale sur le conducteur principal central

$$F_{m3} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{\sqrt{3}}{2} i_{p3}^2 \frac{l}{a_m} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \frac{V_s}{A_m} \times \frac{\sqrt{3}}{2} \times (30,6 \cdot 10^3 \text{ A})^2 \times \frac{1,00 \text{ m}}{0,202 \text{ m}} = 803 \text{ N} \quad (2)$$

où

$$i_{p3} = \sqrt{2} \kappa I''_{k3} = \sqrt{2} \times 1,35 \times 16 \text{ kA} = 30,6 \text{ kA} = 30,6 \cdot 10^3 \text{ A}$$

et la distance équivalente entre les conducteurs principaux

$$a_m = \frac{a}{k_{12}} = \frac{0,20 \text{ m}}{0,99} = 0,202 \text{ m} \quad (6)$$

avec k_{12} selon la figure 1 de la CEI 865-1 pour $b/d = 6$, $a_{1s} = a$ et $a/d = 20$.

4.3 Contrainte des conducteurs et forces sur les supports

Les calculs peuvent être effectués conformément à 4.3.1 ou à 4.3.2 ci-après.

4.3.1 Méthode simplifiée

4.3.1.1 Contrainte de flexion des conducteurs

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{tot}} = \sigma_m &= V_\sigma V_r \beta \frac{F_{m3} l}{8Z} \\ &= 1,0 \times 0,73 \times \frac{803 \text{ N} \times 1,00 \text{ m}}{8 \times 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = 73,3 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 73,3 \text{ N/mm}^2 \end{aligned} \quad (9,12)$$

où

$$V_\sigma V_r = 1,0 = (V_\sigma V_r)_{\text{max}} \quad \text{selon le tableau 2 de la CEI 865-1;}$$

$$\beta = 0,73 \quad \text{selon le tableau 3 de la CEI 865-1;}$$

$$J = \frac{bd^3}{12} = \frac{0,06 \times 0,010^3}{12} \text{ m}^4 = 0,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4$$

$$Z = \frac{J}{d/2} = \frac{0,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4}{0,005 \text{ m}} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

Le jeu de barres est supposé supporter la force due au court-circuit si

$$\sigma_{\text{tot}} \leq q R_{p0,2} \quad (13)$$

avec la valeur inférieure de $R_{p0,2}$. Pour une section rectangulaire $q = 1,5$, voir tableau 4 de la CEI 865-1. Ceci donne:

$$\sigma_{\text{tot}} = 73,3 \text{ N/mm}^2 \text{ qui est inférieur à } 1,5 \times 120 \text{ N/mm}^2 = 180 \text{ N/mm}^2$$

4.3.1.2 Force de flexion sur les supports

$$F_d = V_F V_r \alpha F_{m3} \quad (15)$$

4.2 Maximum force on the central main conductor

$$F_{m3} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{\sqrt{3}}{2} i_{p3}^2 \frac{l}{a_m} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \frac{V_s}{A_m} \times \frac{\sqrt{3}}{2} \times (30,6 \cdot 10^3 \text{ A})^2 \times \frac{1,00 \text{ m}}{0,202 \text{ m}} = 803 \text{ N} \quad (2)$$

where

$$i_{p3} = \sqrt{2} \kappa I''_{k3} = \sqrt{2} \times 1,35 \times 16 \text{ kA} = 30,6 \text{ kA} = 30,6 \cdot 10^3 \text{ A}$$

and the effective distance between the main conductors

$$a_m = \frac{a}{k_{12}} = \frac{0,20 \text{ m}}{0,99} = 0,202 \text{ m} \quad (6)$$

with k_{12} according to IEC 865-1 figure 1 for $b/d = 6$, $a_{1s} = a$ and $a/d = 20$.

4.3 Conductor stress and forces on supports

Calculation can be made according to the following 4.3.1 or 4.3.2.

4.3.1 Simplified method

4.3.1.1 Conductor bending stress

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{tot}} = \sigma_m &= V_\sigma V_r \beta \frac{F_{m3} l}{8Z} \\ &= 1,0 \times 0,73 \times \frac{803 \text{ N} \times 1,00 \text{ m}}{8 \times 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = 73,3 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 73,3 \text{ N/mm}^2 \end{aligned} \quad (9,12)$$

where

$$V_\sigma V_r = 1,0 = (V_\sigma V_r)_{\text{max}} \quad \text{according to IEC 865-1, table 2}$$

$$\beta = 0,73 \quad \text{according to IEC 865-1, table 3}$$

$$J = \frac{bd^3}{12} = \frac{0,06 \times 0,010^3}{12} \text{ m}^4 = 0,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4$$

$$Z = \frac{J}{d/2} = \frac{0,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4}{0,005 \text{ m}} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

The busbars are assumed to withstand the short-circuit force if

$$\sigma_{\text{tot}} \leq q R_{p0,2} \quad (13)$$

With the lower value of $R_{p0,2}$. For a rectangular cross-section $q = 1,5$, see IEC 865-1, table 4. This gives:

$$\sigma_{\text{tot}} = 73,3 \text{ N/mm}^2 \text{ less than } 1,5 \times 120 \text{ N/mm}^2 = 180 \text{ N/mm}^2$$

4.3.1.2 Bending force on the supports

$$F_d = V_F V_r \propto F_{m3} \quad (15)$$

Conformément au tableau 2 de la CEI 865-1, on obtient, avec la valeur supérieure de $R_{p0,2}$

$$\frac{\sigma_{\text{tot}}}{0,8 \cdot R_{p0,2}} = \frac{73,3 \text{ N/mm}^2}{0,8 \times 180 \text{ N/mm}^2} = 0,509$$

donc, dans le cas d'un court-circuit triphasé

$$0,370 < \frac{\sigma_{\text{tot}}}{0,8 \cdot R_{p0,2}} < 1$$

D'où

$$V_F V_r = \frac{0,8 \cdot R_{p0,2}}{\sigma_{\text{tot}}} = \frac{0,8 \times 180 \text{ N/mm}^2}{73,3 \text{ N/mm}^2} = 1,97$$

La force sur les supports extérieurs (A) est, avec $\alpha_A = 0,4$, voir tableau 3 de la CEI 865-1:

$$F_{dA} = V_F V_r \alpha_A F_{m3} = 1,97 \times 0,4 \times 803 \text{ N} = 633 \text{ N}$$

La force sur les supports intérieurs (B) est, $\alpha_B = 1,1$, voir tableau 3 de la CEI 865-1:

$$F_{dB} = V_F V_r \alpha_B F_{m3} = 1,97 \times 1,1 \times 803 \text{ N} = 1\,740 \text{ N}$$

4.3.2 Méthode détaillée

4.3.2.1 Fréquence propre f_c et facteurs V_F , V_r et V_σ

$$f_c = \frac{\gamma}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m'}} = \frac{3,56}{(1,00 \text{ m})^2} \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2 \times 0,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4}{1,62 \text{ kg/m}}} = 52,3 \text{ Hz} \quad (16)$$

où

$\gamma = 3,56$ selon le tableau 3 de la CEI 865-1;

$J = 0,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4$ (voir 4.3.1.1).

Le rapport f_c/f est égal à 1,05. Selon la figure 4 et le 2.2.2.6.2 de la CEI 865-1, les valeurs suivantes sont obtenues pour les facteurs V_F , V_σ et V_r :

$$V_F = 1,8$$

$$V_\sigma = 1,0$$

$$V_r = 1,0$$

4.3.2.2 Contrainte de flexion des conducteurs

La contrainte de flexion des conducteurs est:

$$\sigma_{\text{tot}} = \sigma_m = V_\sigma V_r \beta \frac{F_{m3} l}{8Z} \quad (9,12)$$

$$= 1,0 \times 1,0 \times 0,73 \frac{803 \text{ N} \times 1,00 \text{ m}}{8 \times 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = 73,3 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 73,3 \text{ N/mm}^2$$

According to IEC 865-1, table 2 with the upper value of $R_{p0,2}$ it is:

$$\frac{\sigma_{\text{tot}}}{0,8 \cdot R_{p0,2}} = \frac{73,3 \text{ N/mm}^2}{0,8 \times 180 \text{ N/mm}^2} = 0,509$$

therefore, with a three-phase short circuit

$$0,370 < \frac{\sigma_{\text{tot}}}{0,8 \cdot R_{p0,2}} < 1$$

Hence

$$V_F V_r = \frac{0,8 \cdot R_{p0,2}}{\sigma_{\text{tot}}} = \frac{0,8 \times 180 \text{ N/mm}^2}{73,3 \text{ N/mm}^2} = 1,97$$

For the outer supports (A) is with $\alpha_A = 0,4$, see IEC 865-1, table 3:

$$F_{dA} = V_F V_r \alpha_A F_{m3} = 1,97 \times 0,4 \times 803 \text{ N} = 633 \text{ N}$$

For the inner supports (B) is with $\alpha_B = 1,1$, see IEC 865-1, table 3:

$$F_{dB} = V_F V_r \alpha_B F_{m3} = 1,97 \times 1,1 \times 803 \text{ N} = 1740 \text{ N}$$

4.3.2 Detailed method

4.3.2.1 Natural frequency f_c and factors V_F , V_r and V_σ

$$f_c = \frac{\gamma}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m'}} = \frac{3,56}{(1,00 \text{ m})^2} \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2 \times 0,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4}{1,62 \text{ kg/m}}} = 52,3 \text{ Hz} \quad (16)$$

where

$\gamma = 3,56$ according to IEC 865-1, table 3

$J = 0,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4$ (see 4.3.1.1).

The ratio f_c/f is 1,05. From IEC 865-1, figure 4 and 2.2.2.6.2 the following values for the factors V_F , V_σ and V_r are obtained:

$$V_F = 1,8$$

$$V_\sigma = 1,0$$

$$V_r = 1,0$$

4.3.2.2 Conductor bending stress

The conductor bending stress is:

$$\sigma_{\text{tot}} = \sigma_m = V_\sigma V_r \beta \frac{F_{m3} l}{8Z} \quad (9,12)$$

$$= 1,0 \times 1,0 \times 0,73 \frac{803 \text{ N} \times 1,00 \text{ m}}{8 \times 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = 73,3 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 73,3 \text{ N/mm}^2$$

où

$$V_{\sigma} V_r = 1,0 \times 1,0$$

selon 4.3.2.1 plus haut;

$$\beta = 0,73$$

selon le tableau 3 de la CEI 865-1;

$$Z = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

(voir 4.3.1.1).

Le jeu de barres est supposé supporter la force due au court-circuit si

$$\sigma_{\text{tot}} \leq q R_{p0,2} \quad (13)$$

avec la valeur inférieure de $R_{p0,2}$. Pour une section rectangulaire $q = 1,5$ (voir tableau 4 de la CEI 865-1). Ceci donne:

$$\sigma_{\text{tot}} = 73,3 \text{ N/mm}^2 \text{ qui est inférieur à } 1,5 \times 120 \text{ N/mm}^2 = 180 \text{ N/mm}^2$$

4.3.2.3 Force de flexion sur les supports

$$F_d = V_F V_r \alpha F_{m3} \quad (15)$$

Selon 4.3.2.1 plus haut, $V_F V_r = 1,8 \times 1,0 = 1,8$ ce qui est inférieur à la valeur 1,97 obtenue en utilisant le tableau 2 de la CEI 865-1 (voir 4.3.1.2).

La force sur les supports extérieurs (A) est, avec $\alpha_A = 0,4$ (voir tableau 3 de la CEI 865-1):

$$F_{dA} = V_F V_r \alpha_A F_{m3} = 1,8 \times 1,0 \times 0,4 \times 803 \text{ N} = 578 \text{ N}$$

La force sur les supports intérieurs (B) est, avec $\alpha_B = 1,1$ (voir tableau 3 de la CEI 865-1):

$$F_{dB} = V_F V_r \alpha_B F_{m3} = 1,8 \times 1,0 \times 1,1 \times 803 \text{ N} = 1 590 \text{ N}$$

4.3.3 Conclusions

	Méthode simplifiée	Méthode détaillée
--	-----------------------	----------------------

Le jeu de barres supporte la force due au courant de court-circuit.

Les contraintes de flexion calculées σ_{tot} sont:	N/mm ²	73,3	73,3
Les supports extérieurs doivent supporter une force dynamique de flexion de	N	633	578
Les supports intérieurs doivent supporter une force dynamique de flexion de	N	1 740	1 590

where

$$V_{\sigma} V_r = 1,0 \times 1,0$$

$$\beta = 0,73$$

$$Z = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

according to 4.3.2.1 above

according to IEC 865-1, table 3

(see 4.3.1.1).

The busbars are assumed to withstand the short-circuit force if

$$\sigma_{\text{tot}} \leq q R_{p0,2} \quad (13)$$

with the lower value of $R_{p0,2}$. For a rectangular cross-section $q = 1,5$, see IEC 865-1, table 4. This gives:

$$\sigma_{\text{tot}} = 73,3 \text{ N/mm}^2 \text{ less than } 1,5 \times 120 \text{ N/mm}^2 = 180 \text{ N/mm}^2$$

4.3.2.3 Bending force on the supports

$$F_d = V_F V_r \alpha F_{m3} \quad (15)$$

According to 4.3.2.1 above, $V_F V_r = 1,8 \times 1,0 = 1,8$ which is lower than the value 1,97 from IEC 865-1 table 2, see 4.3.1.2.

For the outer supports (A) is with $\alpha_A = 0,4$, see IEC 865-1, table 3:

$$F_{dA} = V_F V_r \alpha_A F_{m3} = 1,8 \times 1,0 \times 0,4 \times 803 \text{ N} = 578 \text{ N}$$

For the inner supports (B) is with $\alpha_B = 1,1$, see IEC 865-1, table 3:

$$F_{dB} = V_F V_r \alpha_B F_{m3} = 1,8 \times 1,0 \times 1,1 \times 803 \text{ N} = 1\,590 \text{ N}$$

4.3.3 Conclusions

The busbars will withstand the short-circuit force.

The calculated bending stresses σ_{tot} are:

N/mm² 73,3 73,3

The outer supports have to withstand a dynamic bending force of

N 633 578

The inner supports have to withstand a dynamic bending force of

N 1 740 1 590

5 Exemple 2 – Effets mécaniques sur une installation 10 kV avec des conducteurs rigides multiples

La base de calcul pour le présent exemple est le même jeu de barres triphasé que dans l'exemple 1, mais avec trois sous-conducteurs par conducteur principal, comme indiqué à la figure 2. La section des sous-conducteurs est de 60 mm x 10 mm, comme pour les conducteurs de l'exemple 1.

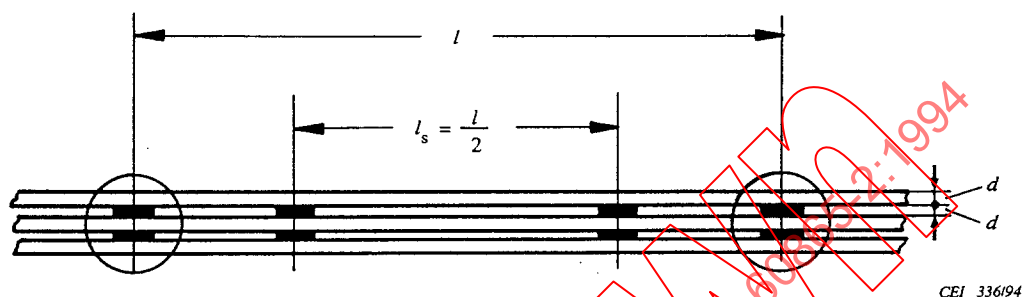


Figure 2 – Position des entretoises et des sous-conducteurs

5.1 Données (complémentaires à celles de l'exemple 1)

Nombre de sous-conducteurs	$n = 3$
Dimensions des sous-conducteurs parallèlement à la direction de la force	$d = 10 \text{ mm}$
Nombre d'entretoises	$k = 2$
Distance entre les entretoises	$l_s = 0,5 \text{ m}$
Dimensions des entretoises en AlMgSi0,5	$60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$

5.2 Force maximale sur le conducteur principal central

$$F_{m3} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{\sqrt{3}}{2} i_{p3}^2 \frac{l}{a_m} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \frac{V_s}{A_m} \times \frac{\sqrt{3}}{2} \times (30,6 \cdot 10^3 \text{ A})^2 \times \frac{1,00 \text{ m}}{0,20 \text{ m}} = 811 \text{ N} \quad (2)$$

où

$$i_{p3} = \sqrt{2} \kappa I''_{k3} = \sqrt{2} \times 1,35 \times 16 \text{ kA} = 30,6 \text{ kA} = 30,6 \cdot 10^3 \text{ A}$$

et la distance équivalente entre les conducteurs principaux

$$a_m = \frac{a}{k_{12}} = \frac{0,2}{1,00} = 0,20 \text{ m} \quad (6)$$

avec k_{12} selon la figure 1 de la CEI 865-1, pour $b_m/d_m = 60 \text{ mm}/50 \text{ mm} = 1,2$ et $a/d_m = 200 \text{ mm}/50 \text{ mm} = 4$. Les dimensions b_m et d_m sont indiquées à la figure 2 b) de la CEI 865-1.

5 Example 2 – Mechanical effects on a 10 kV arrangement with multiple rigid conductors

The basis for the calculation in this example is the same three-phase 10 kV busbar as in example 1, but now with three sub-conductors per main conductor as shown in figure 2. The cross-sections of the sub-conductors are 60 mm × 10 mm as the conductors of example 1.

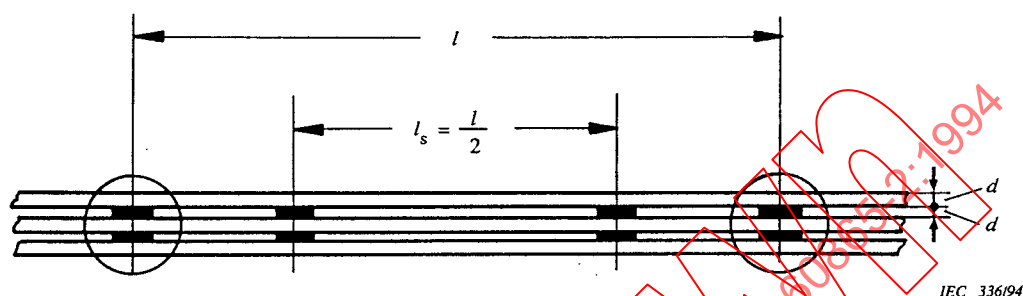


Figure 2 – Position of the spacers and sub-conductors

5.1 Data (additional to the data of example 1)

Number of sub-conductors	$n = 3$
Dimension of sub-conductor in the direction of the force	$d = 10 \text{ mm}$
Number of spacers	$k = 2$
Distance between spacers	$l_s = 0,5 \text{ m}$
Dimension of spacers of AlMgSi0,5	$60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$

5.2 Maximum force on the central main conductor

$$F_{m3} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{i_{p3}^2 l}{a_m} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \times \frac{\sqrt{3}}{2} \times (30,6 \cdot 10^3 \text{ A})^2 \times \frac{1,00 \text{ m}}{0,20 \text{ m}} = 811 \text{ N} \quad (2)$$

where

$$i_{p3} = \sqrt{2} \kappa I''_{k3} = \sqrt{2} \times 1,35 \times 16 \text{ kA} = 30,6 \text{ kA} = 30,6 \cdot 10^3 \text{ A}$$

and the effective distance between the main conductors

$$a_m = \frac{a}{k_{12}} = \frac{0,2}{1,00} = 0,20 \text{ m} \quad (6)$$

with k_{12} according to IEC 865-1 figure 1 for $b_m/d_m = 60 \text{ mm}/50 \text{ mm} = 1,2$ and $a/d_m = 200 \text{ mm}/50 \text{ mm} = 4$. The dimensions b_m and d_m are shown in IEC 865-1, figure 2b.

5.3 Force maximale sur le sous-conducteur extérieur entre deux pièces de connexion

$$F_s = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{i_{p3}}{n} \right)^2 \frac{l_s}{a_s} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \frac{V_s}{\text{Am}} \times \left(\frac{30,6 \cdot 10^3 \text{ A}}{3} \right)^2 \times \frac{0,5 \text{ m}}{20,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = 515 \text{ N} \quad (4)$$

où

$$\frac{1}{a_s} = \frac{k_{12}}{a_{12}} + \frac{k_{13}}{a_{13}} = \frac{0,60}{20 \text{ mm}} + \frac{0,78}{40 \text{ mm}} = \frac{1}{20,2 \text{ mm}} \quad (8)$$

avec k_{12} et k_{13} selon la figure 1 de la CEI 865-1:

– $k_{12} = 0,60$ pour $a_{12}/d = 20 \text{ mm}/10 \text{ mm} = 2$ et $b/d = 6$

– $k_{13} = 0,78$ pour $a_{13}/d = 40 \text{ mm}/10 \text{ mm} = 4$ et $b/d = 6$

ou a_s d'après le tableau 1 de la CEI 865-1.

5.4 Contrainte des conducteurs et forces sur les supports

Les calculs peuvent être effectués conformément à 5.4.1 ou à 5.4.2 ci-après.

5.4.1 Méthode simplifiée

5.4.1.1 Contrainte de flexion résultant des forces entre conducteurs principaux

$$\begin{aligned} \sigma_m &= V_\sigma V_r \beta \frac{F_{m3} l}{8Z} \\ &= 1,0 \times 0,73 \times \frac{811 \text{ N} \times 1,00 \text{ m}}{8 \times 3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = 24,7 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 24,7 \text{ N/mm}^2 \end{aligned} \quad (9)$$

où

$$V_\sigma V_r = 1,0 = (V_\sigma V_r)_{\max}$$

selon le tableau 2 de la CEI 865-1;

$$\beta = 0,73$$

selon le tableau 3 de la CEI 865-1;

$$Z = n \frac{bd^2}{6} = 3 \times \frac{0,06 \times 0,01^2}{6} \text{ m}^3 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ conformément à 2.2.2.3 de la CEI 865-1}$$

5.4.1.2 Contrainte de flexion résultant des forces entre sous-conducteurs

$$\begin{aligned} \sigma_s &= V_{\sigma s} V_r \frac{F_s l_s}{16Z_s} \\ &= 1,0 \times \frac{515 \text{ N} \times 0,5 \text{ m}}{16 \times 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = 16,1 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 16,1 \text{ N/mm}^2 \end{aligned} \quad (10)$$

où

$$V_{\sigma s} V_r = 1,0 = (V_{\sigma s} V_r)_{\max}$$

selon le tableau 2 de la CEI 865-1;

$$Z_s = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

comme Z en 4.3.1.1 (exemple 1).

5.3 Maximum force on the outer sub-conductor between two adjacent connecting pieces

$$F_s = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{i_{p3}}{n} \right)^2 \frac{l_s}{a_s} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \frac{V_s}{\text{Am}} \times \left(\frac{30,6 \cdot 10^3 \text{ A}}{3} \right)^2 \times \frac{0,5 \text{ m}}{20,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = 515 \text{ N} \quad (4)$$

where

$$\frac{1}{a_s} = \frac{k_{12}}{a_{12}} + \frac{k_{13}}{a_{13}} = \frac{0,60}{20 \text{ mm}} + \frac{0,78}{40 \text{ mm}} = \frac{1}{20,2 \text{ mm}} \quad (8)$$

with k_{12} and k_{13} from IEC 865, figure 1:

– $k_{12} = 0,60$ for $a_{12}/d = 20 \text{ mm}/10 \text{ mm} = 2$ and $b/d = 6$

– $k_{13} = 0,78$ for $a_{13}/d = 40 \text{ mm}/10 \text{ mm} = 4$ and $b/d = 6$

or a_s from IEC 865-1, table 1.

5.4 Conductor stress and forces on support

Calculations can be made according to the following 5.4.1 or according to the following 5.4.2.

5.4.1 Simplified method

5.4.1.1 Bending stress caused by the forces between main conductors

$$\begin{aligned} \sigma_m &= V_\sigma V_r \beta \frac{F_{m3} l}{8Z} \\ &= 1,0 \times 0,73 \times \frac{811 \text{ N} \times 1,00 \text{ m}}{8 \times 3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = 24,7 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 24,7 \text{ N/mm}^2 \end{aligned} \quad (9)$$

where

$$V_\sigma V_r = 1,0 = (V_\sigma V_r)_{\max} \quad \text{according to IEC 865-1, table 2}$$

$$\beta = 0,73 \quad \text{according to IEC 865-1, table 3}$$

$$Z = n \frac{bd^2}{6} = 3 \times \frac{0,06 \times 0,01^2}{6} \text{ m}^3 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad \text{according to IEC 865-1, 2.2.2.3}$$

5.4.1.2 Bending stress caused by the forces between the sub-conductors

$$\begin{aligned} \sigma_s &= V_{\sigma s} V_r \frac{F_s l_s}{16Z_s} \\ &= 1,0 \times \frac{515 \text{ N} \times 0,5 \text{ m}}{16 \times 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = 16,1 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 16,1 \text{ N/mm}^2 \end{aligned} \quad (10)$$

where

$$V_{\sigma s} V_r = 1,0 = (V_{\sigma s} V_r)_{\max} \quad \text{according to IEC 865-1, table 2}$$

$$Z_s = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad \text{as } Z \text{ in 4.3.1.1 (example 1).}$$

5.4.1.3 Contrainte de flexion totale dans le matériau du jeu de barres

$$\sigma_{\text{tot}} = \sigma_m + \sigma_s = 24,7 \text{ N/mm}^2 + 16,1 \text{ N/mm}^2 = 40,8 \text{ N/mm}^2 \quad (12)$$

Le jeu de barres est supposé supporter la force due au court-circuit si

$$\sigma_{\text{tot}} \leq q R_{p0,2} \quad (13)$$

$$\sigma_s \leq R_{p0,2} \quad (14)$$

avec la valeur inférieure de $R_{p0,2}$. Pour une section rectangulaire $q = 1,5$ (voir tableau 4 de la CEI 865-1). Ceci donne:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{tot}} &= 40,8 \text{ N/mm}^2 \text{ ce qui est inférieur à } 1,5 \times 120 \text{ N/mm}^2 = 180 \text{ N/mm}^2 \\ \sigma_s &= 16,1 \text{ N/mm}^2 \text{ ce qui est inférieur à } 120 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

5.4.1.4 Force de flexion sur les supports

$$F_d = V_F V_r \alpha F_{m3} \quad (15)$$

Conformément au tableau 2 de la CEI 865-1, on obtient, avec la valeur supérieure de $R_{p0,2}$:

$$\frac{\sigma_{\text{tot}}}{0,8 \cdot R_{p0,2}} = \frac{40,8 \text{ N/mm}^2}{0,8 \times 180 \text{ N/mm}^2} = 0,283$$

donc, dans le cas d'un court-circuit triphasé

$$\frac{\sigma_{\text{tot}}}{0,8 \cdot R_{p0,2}} \leq 0,370$$

D'où

$$V_F V_r = 2,7$$

La force sur les supports extérieurs est, avec $\alpha_A = 0,4$ (voir tableau 3 de la CEI 865-1):

$$F_{dA} = 2,7 \times 0,4 \times 811 \text{ N} = 876 \text{ N}$$

La force sur les supports intérieurs est, avec $\alpha_B = 1,1$ (voir tableau 3 de la CEI 865-1):

$$F_{dB} = 2,7 \times 1,1 \times 811 \text{ N} = 2\,409 \text{ N}$$

5.4.2 Méthode détaillée

5.4.2.1 Fréquence propre f_c du conducteur principal, f_{cs} des sous-conducteurs et facteurs V_F , V_σ , $V_{\sigma s}$, V_r et V_{rs}

$$f_c = c \frac{\gamma}{l^2} \sqrt{\frac{EJ_s}{m'_s}} = 0,97 \times \frac{3,56}{(1,00 \text{ m})^2} \times \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2 \times 0,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4}{1,62 \text{ kg/m}}} = 50,8 \text{ Hz} \quad (17)$$

5.4.1.3 Total bending stress in the busbar material

$$\sigma_{\text{tot}} = \sigma_m + \sigma_s = 24,7 \text{ N/mm}^2 + 16,1 \text{ N/mm}^2 = 40,8 \text{ N/mm}^2 \quad (12)$$

The busbars are assumed to withstand the short-circuit force if

$$\sigma_{\text{tot}} \leq q R_{p0,2} \quad (13)$$

$$\sigma_s \leq R_{p0,2} \quad (14)$$

with the lower value of $R_{p0,2}$. For a rectangular cross-section $q = 1,5$, see IEC 865-1, table 4 or 2.2.2.3. This gives:

$$\sigma_{\text{tot}} = 40,8 \text{ N/mm}^2 \text{ less than } 1,5 \times 120 \text{ N/mm}^2 = 180 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_s = 16,1 \text{ N/mm}^2 \text{ less than } 120 \text{ N/mm}^2$$

5.4.1.4 Bending force on supports

$$F_d = V_F V_r \alpha F_{m3} \quad (15)$$

According to IEC 865-1 table 2, with the upper value of $R_{p0,2}$ it is:

$$\frac{\sigma_{\text{tot}}}{0,8 \cdot R_{p0,2}} = \frac{40,8 \text{ N/mm}^2}{0,8 \times 180 \text{ N/mm}^2} = 0,283$$

therefore with a three-phase short circuit

$$\frac{\sigma_{\text{tot}}}{0,8 \cdot R_{p0,2}} \leq 0,370$$

Hence

$$V_F V_r = 2,7$$

For the outer supports (A) is with $\alpha_A = 0,4$, see IEC 865-1, table 3:

$$F_{dA} = 2,7 \times 0,4 \times 811 \text{ N} = 876 \text{ N}$$

For the inner supports (B) is with $\alpha_B = 1,1$, see IEC 865-1, table 3:

$$F_{dB} = 2,7 \times 1,1 \times 811 \text{ N} = 2\,409 \text{ N}$$

5.4.2 Detailed method

5.4.2.1 Natural frequency f_c of the main conductor, f_{cs} of the sub-conductors and factors V_F , V_σ , $V_{\sigma s}$, V_r and V_{rs}

$$f_c = c \frac{\gamma}{l^2} \sqrt{\frac{EJ_s}{m'_s}} = 0,97 \times \frac{3,56}{(1,00 \text{ m})^2} \times \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2 \times 0,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4}{1,62 \text{ kg/m}}} = 50,8 \text{ Hz} \quad (17)$$

où

$$c = 0,97$$

selon la figure 3 c) de la CEI 865-1 pour $k = 2$ et pour le rapport

$$\frac{m_z}{n m'_s l} = \frac{1,62 \text{ kg/m} \times 0,06 \text{ m} \times 2}{3 \times 1,62 \text{ kg/m} \times 1,00 \text{ m}} = 0,04$$

$$\gamma = 3,56$$

selon le tableau 3 de la CEI 865-1;

$$J = 0,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4 \text{ comme } J \text{ dans l'exemple 1.}$$

$$f_{cs} = \frac{3,56}{l_s^2} \sqrt{\frac{EJ_s}{m'_s}} = \frac{3,56}{(0,5 \text{ m})^2} \times \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2 \times 0,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4}{1,62 \text{ kg/m}}} = 209 \text{ Hz} \quad (18)$$

Le rapport f_c/f est égal à 1,02 et le rapport f_{cs}/f est égal à 4,18. Selon la figure 4 et le 2.2.2.6.2 de la CEI 865-1, les valeurs suivantes sont obtenues pour les facteurs V_F , V_σ , $V_{\sigma s}$, V_r et V_{rs} :

$$V_F = 1,8$$

$$V_\sigma = 1,0$$

$$V_{\sigma s} = 1,0$$

$$V_r = 1,0$$

$$V_{rs} = 1,0$$

5.4.2.2 Contrainte de flexion résultant des forces entre les conducteurs principaux

$$\begin{aligned} \sigma_m &= V_\sigma V_r \beta \frac{F_{m3} l}{8Z} \\ &= 1,0 \times 1,0 \times 0,73 \times \frac{811 \text{ N} \times 1,00 \text{ m}}{8 \times 3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = 24,7 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 24,7 \text{ N/mm}^2 \end{aligned} \quad (9)$$

où

$$V_\sigma V_r = 1,0 \times 1,0$$

selon 5.4.2.1 plus haut;

$$\beta = 0,73$$

selon le tableau 3 de la CEI 865-1;

$$Z = n \frac{bd^2}{6} = 3 \times \frac{0,06 \times 0,01^2}{6} \text{ m}^3 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ conformément à 2.2.2.3 de la CEI 865-1}$$

5.4.2.3 Contrainte de flexion résultant des forces entre les sous-conducteurs

$$\begin{aligned} \sigma_s &= V_{\sigma s} V_{rs} \frac{F_s l_s}{16Z_s} \\ &= 1,0 \times 1,0 \times \frac{515 \text{ N} \times 0,5 \text{ m}}{16 \times 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = 16,1 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 16,1 \text{ N/mm}^2 \end{aligned} \quad (10)$$

où

$$V_{\sigma s} V_{rs} = 1,0 \times 1,0$$

selon le tableau 2 de la CEI 865-1;

$$Z_s = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

comme Z en 4.3.1.1 (exemple 1).

where

$$c = 0,97$$

according to IEC 865-1, figure 3c for $k = 2$ and the ratio

$$\frac{m_z}{n m'_s l} = \frac{1,62 \text{ kg/m} \times 0,06 \text{ m} \times 2}{3 \times 1,62 \text{ kg/m} \times 1,00 \text{ m}} = 0,04$$

$$\gamma = 3,56 \quad \text{from IEC 865-1, table 3}$$

$$J = 0,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4 \quad \text{as } J \text{ in example 1.}$$

$$f_{cs} = \frac{3,56}{l_s^2} \sqrt{\frac{EJ_s}{m'_s}} = \frac{3,56}{(0,5 \text{ m})^2} \times \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2 \times 0,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4}{1,62 \text{ kg/m}}} = 209 \text{ Hz} \quad (18)$$

The ratio f_c/f is 1,02 and f_{cs}/f is 4,18. This gives from IEC 865-1, figure 4 and 2.2.2.6.2 the following values to the factors V_F , V_σ , $V_{\sigma s}$, V_r and V_{rs} :

$$\begin{aligned} V_F &= 1,8 \\ V_\sigma &= 1,0 \\ V_{\sigma s} &= 1,0 \\ V_r &= 1,0 \\ V_{rs} &= 1,0 \end{aligned}$$

5.4.2.2 Bending stress caused by the forces between main conductors

$$\begin{aligned} \sigma_m &= V_\sigma V_r \beta \frac{F_{ms} l}{8Z} \\ &= 1,0 \times 1,0 \times 0,73 \times \frac{811 \text{ N} \times 1,00 \text{ m}}{8 \times 3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = 24,7 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 24,7 \text{ N/mm}^2 \end{aligned} \quad (9)$$

where

$$V_\sigma V_r = 1,0 \times 1,0$$

according to 5.4.2.1 above

$$\beta = 0,73$$

according to IEC 865-1, table 3

$$Z = n \frac{bd^2}{6} = 3 \times \frac{0,06 \times 0,01^2}{6} \text{ m}^3 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad \text{according to IEC 865-1, 2.2.2.3}$$

5.4.2.3 Bending stress caused by the forces between the sub-conductors

$$\begin{aligned} \sigma_s &= V_{\sigma s} V_{rs} \frac{F_s l_s}{16Z_s} \\ &= 1,0 \times 1,0 \times \frac{515 \text{ N} \times 0,5 \text{ m}}{16 \times 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = 16,1 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 16,1 \text{ N/mm}^2 \end{aligned} \quad (10)$$

where

$$V_{\sigma s} V_{rs} = 1,0 \times 1,0$$

according to 865-1, table 2

$$Z_s = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

as Z in 4.3.1.1 (example 1)

5.4.2.4 Contrainte de flexion totale dans le matériau du jeu de barres

$$\sigma_{\text{tot}} = \sigma_m + \sigma_s = 24,7 \text{ N/mm}^2 + 16,1 \text{ N/mm}^2 = 40,8 \text{ N/mm}^2 \quad (12)$$

Le jeu de barres est supposé supporter la force due au court-circuit si

$$\sigma_{\text{tot}} \leq q R_{p0,2} \quad (13)$$

$$\sigma_s \leq R_{p0,2} \quad (14)$$

avec la valeur inférieure de $R_{p0,2}$. Pour une section rectangulaire $q = 1,5$ (voir tableau 4 de la CEI 865-1). Ceci donne:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{tot}} &= 40,8 \text{ N/mm}^2 \text{ qui est inférieur à } 1,5 \times 120 \text{ N/mm}^2 = 180 \text{ N/mm}^2 \\ \sigma_s &= 16,1 \text{ N/mm}^2 \text{ qui est inférieur à } 120 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

5.4.2.5 Force de flexion sur les supports

$$F_d = V_F V_r \alpha F_{m3} \quad (15)$$

Selon 5.4.2.1 plus haut, $V_F V_r = 1,8 \times 1,0 = 1,8$ qui est inférieur à la valeur 2,7 obtenue en utilisant le tableau 2 de la CEI 865-1 dans le cas de la méthode simplifiée (voir 5.4.1.4).

La force sur les supports extérieurs (A) est, avec $\alpha_A = 0,4$ (voir tableau 3 de la CEI 865-1):

$$F_{dA} = V_F V_r \alpha_A F_{m3} = 1,8 \times 1,0 \times 0,4 \times 811 \text{ N} = 584 \text{ N}$$

La force sur les supports intérieurs (B) est, avec $\alpha_B = 1,1$ (voir tableau 3 de la CEI 865-1):

$$F_{dB} = V_F V_r \alpha_B F_{m3} = 1,8 \times 1,0 \times 1,1 \times 811 \text{ N} = 1\,606 \text{ N}$$

5.4.3 Conclusions

Le jeu de barres supporte la force due au courant de court-circuit.

Les contraintes de flexion calculées sont:			Méthode simplifiée	Méthode détaillée
	σ_{tot}	N/mm ²	40,8	40,8
	σ_s	N/mm ²	16,1	16,1

Les supports extérieurs doivent supporter une force dynamique de flexion de

N 876 584

Les supports intérieurs doivent supporter une force dynamique de flexion de

N 2 409 1 606

5.4.2.4 Total bending stress in the busbar material

$$\sigma_{\text{tot}} = \sigma_m + \sigma_s = 24,7 \text{ N/mm}^2 + 16,1 \text{ N/mm}^2 = 40,8 \text{ N/mm}^2 \quad (12)$$

The busbar is assumed to withstand the short-circuit force if

$$\sigma_{\text{tot}} \leq q R_{p0,2} \quad (13)$$

$$\sigma_s \leq R_{p0,2} \quad (14)$$

with the lower value of $R_{p0,2}$. For a rectangular cross-section $q = 1,5$, see IEC 865-1, table 4. This gives:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{tot}} &= 40,8 \text{ N/mm}^2 \text{ less than } 1,5 \times 120 \text{ N/mm}^2 = 180 \text{ N/mm}^2 \\ \sigma_s &= 16,1 \text{ N/mm}^2 \text{ less than } 120 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

5.4.2.5 Bending force on the supports

$$F_d = V_F V_r \alpha F_{m3} \quad (15)$$

According to 5.4.2.1 above, $V_F V_r = 1,8 \times 1,0 = 1,8$ which is lower than the value 2,7 obtained from IEC 865-1, table 2 in the case of the simplified method, see 5.4.1.4.

For the outer supports (A) is with $\alpha_A = 0,4$, see IEC 865-1, table 3:

$$F_{dA} = V_F V_r \alpha_A F_{m3} = 1,8 \times 1,0 \times 0,4 \times 811 \text{ N} = 584 \text{ N}$$

For the inner supports (B) is with $\alpha_B = 1,1$, see IEC 865-1, table 3:

$$F_{dB} = V_F V_r \alpha_B F_{m3} = 1,8 \times 1,0 \times 1,1 \times 811 \text{ N} = 1\,606 \text{ N}$$

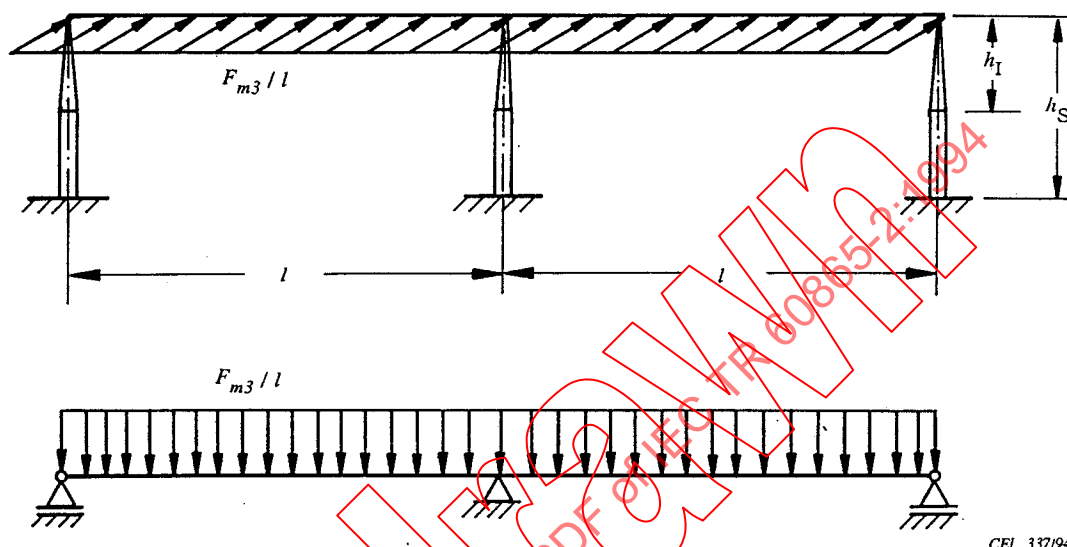
5.4.3 Conclusions

The busbars will withstand the short-circuit force.

			Simplified method	Detailed method
The calculated bending stresses are	σ_{tot}	N/mm ²	40,8	40,8
	σ_s	N/mm ²	16,1	16,1
The outer supports have to withstand a dynamic bending force of		N	876	584
The inner supports have to withstand a dynamic bending force of		N	2 409	1 606

6 Exemple 3 – Effets mécaniques sur une installation haute tension avec des conducteurs rigides

La base de calcul pour le présent exemple est un jeu de barres triphasé 380 kV, comportant un conducteur tubulaire par phase. La disposition est indiquée à la figure 3. Le présent exemple comprend des calculs sans et avec réenclenchement automatique triphasé.



a) Installation avec deux portées
b) Modèle négligeant l'influence des structures des supports

Figure 3 – Disposition des conducteurs et supports

6.1 Données

Courant de court-circuit triphasé symétrique initial
(valeur efficace)

$$I''_{k3} = 50 \text{ kA}$$

Facteur pour le calcul de la valeur de crête
du courant de court-circuit

$$\kappa = 1,81$$

Fréquence du réseau

$$f = 50 \text{ Hz}$$

Nombre de portées

$$= 2$$

Distance entre supports

$$l = 18 \text{ m}$$

Entraxe des conducteurs

$$a = 5 \text{ m}$$

Hauteur de l'isolateur avec une pince d'ancrage

$$h_1 = 3,7 \text{ m}$$

Hauteur du support

$$h_S = 7,0 \text{ m}$$

Conducteur tubulaire 160 mm × 6 mm AlMgSi0,5

– Masse par unité de longueur

$$m' = 7,84 \text{ kg/m}$$

– Diamètre extérieur

$$D = 160 \text{ mm}$$

– Épaisseur de la paroi

$$s = 6 \text{ mm}$$

– Module de Young

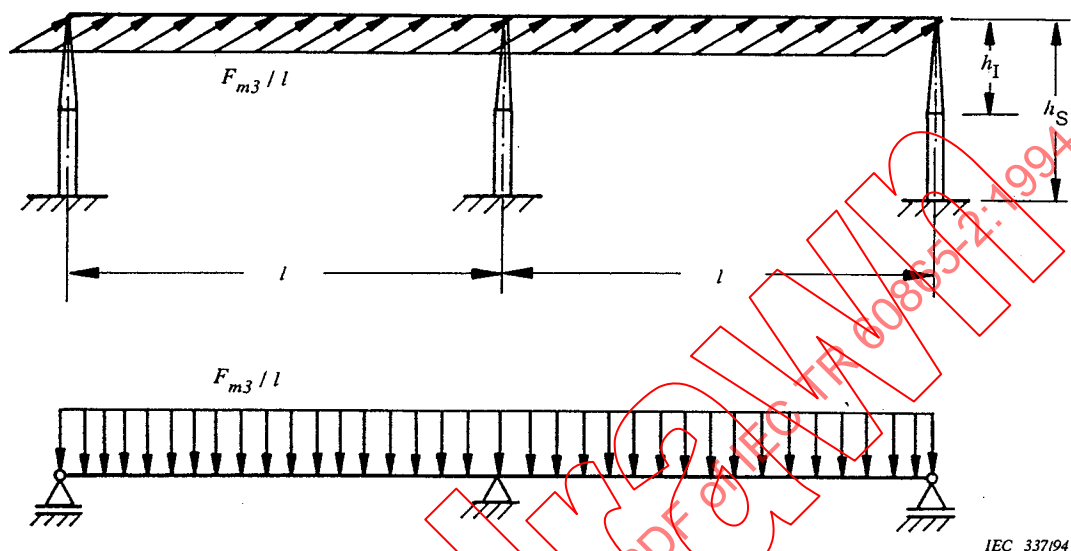
$$E = 70\,000 \text{ N/mm}^2$$

– Contrainte correspondant à la limite élastique

$$R_{p0,2} = 160 \text{ N/mm}^2 \text{ à } 240 \text{ N/mm}^2$$

6 Example 3 – Mechanical effects on a high-voltage arrangement with rigid conductors

The basis for the calculation in this example is a three-phase 380 kV busbar, with one tubular conductor per phase. The conductor arrangement is shown in figure 3. This example includes calculations with and without automatic reclosing.



- a) Two-span arrangement
b) Model neglecting the influence of support structures

Figure 3 – Conductor and support arrangement

6.1 Data

Three-phase initial symmetrical short-circuit current (r.m.s.)

$$I''_{k3} = 50 \text{ kA}$$

Factor to calculate the peak short-circuit current

$$\kappa = 1,81$$

System frequency

$$f = 50 \text{ Hz}$$

Number of spans

$$= 2$$

Distance between supports

$$l = 18 \text{ m}$$

Centre-line distance between conductors

$$a = 5 \text{ m}$$

Height of the insulator with clamp

$$h_I = 3,7 \text{ m}$$

Height of the support

$$h_S = 7,0 \text{ m}$$

Tubular conductor 160 mm × 6 mm of AlMgSi0,5

– Mass per unit length

$$m' = 7,84 \text{ kg/m}$$

– Outside diameter

$$D = 160 \text{ mm}$$

– Wall thickness

$$s = 6 \text{ mm}$$

– Young's modulus

$$E = 70\,000 \text{ N/mm}^2$$

– Stress corresponding to the yield point

$$R_{p0,2} = 160 \text{ N/mm}^2 \text{ to } 240 \text{ N/mm}^2$$

6.2 Force maximale sur le conducteur principal central

$$F_{m3} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{\sqrt{3}}{2} i_{p3}^2 \frac{l}{a_m} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \frac{Vs}{Am} \times \frac{\sqrt{3}}{2} \times (128 \cdot 10^3 \text{ A})^2 \times \frac{18 \text{ m}}{5 \text{ m}} = 10\,200 \text{ N} = 10,2 \text{ kN} \quad (2)$$

où

$$i_{p3} = \sqrt{2} \kappa I''_{k3} = \sqrt{2} \times 1,81 \times 50 \text{ kA} = 128 \text{ kA} = 128 \cdot 10^3 \text{ A}$$

et $a_m = a = 5 \text{ m}$.

6.3 Contrainte des conducteurs et forces sur les supports

Les calculs peuvent être effectués conformément à 6.3.1 ou à 6.3.2 ci-après.

6.3.1 Méthode simplifiée

6.3.1.1 Contrainte de flexion des conducteurs sans réencenchement automatique triphasé

La contrainte de flexion maximale est:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{tot}} = \sigma_m &= V_\sigma V_r \beta \frac{F_{m3} l}{8Z} \\ &= 1,0 \times 0,73 \times \frac{10,2 \cdot 10^3 \text{ N} \times 18 \text{ m}}{8 \times 108 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = 155 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 155 \text{ N/mm}^2 \end{aligned} \quad (9,12)$$

où

$$V_\sigma V_r = 1,0 = (V_\sigma V_r)_{\text{max}} \quad \text{selon le tableau 2 de la CEI 865-1;}$$

$$\beta = 0,73 \quad \text{selon le tableau 3 de la CEI 865-1;}$$

$$Z = \frac{J}{D/2} = \frac{8,62 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4}{0,080 \text{ m}} = 108 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

où

$$J = \frac{\pi}{64} [D^4 - (D - 2s)^4] = \frac{\pi}{64} [0,160^4 - (0,160 - 2 \times 0,006)^4] \text{ m}^4 = 8,62 \times 10^{-6} \text{ m}^4$$

Le jeu de barres est supposé supporter la force due au court-circuit si

$$\sigma_{\text{tot}} \leq q R_{p0,2} \quad (13)$$

avec la valeur inférieure de $R_{p0,2}$.

Pour une section tubulaire, conformément au tableau 4 de la CEI 865-1

$$q = 1,7 \cdot \frac{1 - (1 - 2s/D)^3}{1 - (1 - 2s/D)^4} = 1,7 \times \frac{1 - (1 - 2 \times 0,006/0,160)^3}{1 - (1 - 2 \times 0,006/0,160)^4} = 1,32$$

Ceci donne:

$$\sigma_{\text{tot}} = 155 \text{ N/mm}^2 \text{ qui est inférieur à } 1,32 \times 160 \text{ N/mm}^2 = 211 \text{ N/mm}^2$$

6.2 Maximum force on the central main conductor

$$F_{m3} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{\sqrt{3}}{2} i_{p3}^2 \frac{l}{a_m} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \frac{V_s}{A_m} \times \frac{\sqrt{3}}{2} \times (128 \cdot 10^3 \text{ A})^2 \times \frac{18 \text{ m}}{5 \text{ m}} = 10\,200 \text{ N} = 10,2 \text{ kN} \quad (2)$$

where

$$i_{p3} = \sqrt{2} \kappa I''_{k3} = \sqrt{2} \times 1,81 \times 50 \text{ kA} = 128 \text{ kA} = 128 \cdot 10^3 \text{ A}$$

and $a_m = a = 5 \text{ m}$.

6.3 Conductor stress and forces on supports

Calculation can be made according to the following 6.3.1 or according to the following 6.3.2.

6.3.1 Simplified method

6.3.1.1 Conductor bending stress without three-phase automatic reclosing

The maximum bending stress is:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{tot}} = \sigma_m &= V_\sigma V_r \beta \frac{F_{m3} l}{8Z} \\ &= 1,0 \times 0,73 \times \frac{10,2 \cdot 10^3 \text{ N} \times 18 \text{ m}}{8 \times 108 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = 155 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 155 \text{ N/mm}^2 \end{aligned} \quad (9,12)$$

where

$$V_\sigma V_r = 1,0 = (V_\sigma V_r)_{\text{max}} \quad \text{according to IEC 865-1, table 2}$$

$$\beta = 0,73 \quad \text{according to IEC 865-1, table 3}$$

$$Z = \frac{J}{D/2} = \frac{8,62 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4}{0,080 \text{ m}} = 108 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

where

$$J = \frac{\pi}{64} [D^4 - (D - 2s)^4] = \frac{\pi}{64} [0,160^4 - (0,160 - 2 \times 0,006)^4] \text{ m}^4 = 8,62 \times 10^{-6} \text{ m}^4$$

The busbars are assumed to withstand the short-circuit force if

$$\sigma_{\text{tot}} \leq q R_{p0,2} \quad (13)$$

with the lower value of $R_{p0,2}$.

For a tubular cross-section in accordance with IEC 865-1, table 4

$$q = 1,7 \cdot \frac{1 - (1 - 2s/D)^3}{1 - (1 - 2s/D)^4} = 1,7 \times \frac{1 - (1 - 2 \times 0,006/0,160)^3}{1 - (1 - 2 \times 0,006/0,160)^4} = 1,32$$

This gives:

$$\sigma_{\text{tot}} = 155 \text{ N/mm}^2 \text{ less than } 1,32 \times 160 \text{ N/mm}^2 = 211 \text{ N/mm}^2$$

6.3.1.2 Forces de flexion sur les supports sans réenclenchement automatique triphasé

$$F_d = V_F V_r \alpha F_{m3} \quad (15)$$

Conformément au tableau 2 de la CEI 865-1, on obtient, avec la valeur supérieure de $R_{p0,2}$:

$$\frac{\sigma_{\text{tot}}}{0,8 \cdot R_{p0,2}} = \frac{155 \text{ N/mm}^2}{0,8 \times 240 \text{ N/mm}^2} = 0,807$$

donc

$$0,370 < \frac{\sigma_{\text{tot}}}{0,8 \cdot R_{p0,2}} < 1$$

D'où

$$V_F V_r = \frac{0,8 \cdot R_{p0,2}}{\sigma_{\text{tot}}} = \frac{0,8 \times 240 \text{ N/mm}^2}{155 \text{ N/mm}^2} = 1,24$$

La force sur les supports extérieurs (A) est, avec $\alpha_A = 0,375$ (voir tableau 3 de la CEI 865-1):

$$F_{dA} = V_F V_r \alpha_A F_{m3} = 1,24 \times 0,375 \times 10,2 \text{ kN} = 4,74 \text{ kN}$$

La force sur les supports intérieurs (B) est, avec $\alpha_B = 1,25$ (voir tableau 3 de la CEI 865-1):

$$F_{dB} = V_F V_r \alpha_B F_{m3} = 1,24 \times 1,25 \times 10,2 \text{ kN} = 15,8 \text{ kN}$$

Les moments de flexion sur l'infrastructure sont:

- à la base des isolateurs extérieurs
 $M_{IA} = F_{dA} h_I = 4,74 \text{ kN} \times 3,7 \text{ m} = 17,5 \text{ kNm}$
- à la base des supports extérieurs
 $M_{SA} = F_{dA} h_S = 4,74 \text{ kN} \times 7,0 \text{ m} = 33,2 \text{ kNm}$
- à la base de l'isolateur intérieur
 $M_{IB} = F_{dB} h_I = 15,8 \text{ kN} \times 3,7 \text{ m} = 58,5 \text{ kNm}$
- à la base du support intérieur
 $M_{SB} = F_{dB} h_S = 15,8 \text{ kN} \times 7,0 \text{ m} = 110,6 \text{ kNm}$

6.3.1.3 Contrainte de flexion des conducteurs avec réenclenchement automatique triphasé

Dans le cas d'un réenclenchement automatique triphasé, la contrainte de flexion est:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{tot}} = \sigma_m &= V_\sigma V_r \beta \frac{F_{m3} l}{8Z} \\ &= 1,8 \times 0,73 \times \frac{10,2 \cdot 10^3 \text{ N} \times 18 \text{ m}}{8 \times 108 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = 279 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 279 \text{ N/mm}^2 \end{aligned} \quad (9,12)$$

6.3.1.2 *Bending force on the supports without three-phase automatic reclosing*

$$F_d = V_F V_r \alpha F_{m3} \quad (15)$$

According to IEC 865-1, table 2 with the upper value of $R_{p0,2}$ it is:

$$\frac{\sigma_{tot}}{0,8 \cdot R_{p0,2}} = \frac{155 \text{ N/mm}^2}{0,8 \times 240 \text{ N/mm}^2} = 0,807$$

therefore

$$0,370 < \frac{\sigma_{tot}}{0,8 \cdot R_{p0,2}} < 1$$

Hence

$$V_F V_r = \frac{0,8 \cdot R_{p0,2}}{\sigma_{tot}} = \frac{0,8 \times 240 \text{ N/mm}^2}{155 \text{ N/mm}^2} = 1,24$$

The force on the outer supports (A) is with $\alpha_A = 0,375$, see IEC 865-1, table 3:

$$F_{dA} = V_F V_r \alpha_A F_{m3} = 1,24 \times 0,375 \times 10,2 \text{ kN} = 4,74 \text{ kN}$$

The force on the inner supports (B) is with $\alpha_B = 1,25$, see IEC 865-1, table 3:

$$F_{dB} = V_F V_r \alpha_B F_{m3} = 1,24 \times 1,25 \times 10,2 \text{ kN} = 15,8 \text{ kN}$$

The bending moments on the substructures are:

- on the bottom of the outer insulators
 $M_{IA} = F_{dA} h_I = 4,74 \text{ kN} \times 3,7 \text{ m} = 17,5 \text{ kNm}$
- on the bottom of the outer supports
 $M_{SA} = F_{dA} h_S = 4,74 \text{ kN} \times 7,0 \text{ m} = 33,2 \text{ kNm}$
- on the bottom of the inner insulator
 $M_{IB} = F_{dB} h_I = 15,8 \text{ kN} \times 3,7 \text{ m} = 58,5 \text{ kNm}$
- on the bottom of the inner support
 $M_{SB} = F_{dB} h_S = 15,8 \text{ kN} \times 7,0 \text{ m} = 110,6 \text{ kNm}$

6.3.1.3 *Conductors bending stress with three-phase automatic reclosing*

With three-phase automatic reclosing, the bending stress is

$$\begin{aligned} \sigma_{tot} = \sigma_m &= V_\sigma V_r \beta \frac{F_{m3} l}{8Z} \\ &= 1,8 \times 0,73 \times \frac{10,2 \cdot 10^3 \text{ N} \times 18 \text{ m}}{8 \times 108 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = 279 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 279 \text{ N/mm}^2 \end{aligned} \quad (9,12)$$

où

$$V_{\sigma} V_r = 1,8 = (V_{\sigma} V_r)_{\max} \quad \text{selon le tableau 2 de la CEI 865-1;}$$

$$\beta = 0,73 \quad \text{selon le tableau 3 de la CEI 865-1;}$$

$$Z = 108 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad (\text{voir 6.3.1.1}).$$

Le jeu de barres est supposé supporter la force due au court-circuit si

$$\sigma_{\text{tot}} \leq q R_{p0,2} \quad (13)$$

avec la valeur inférieure de $R_{p0,2}$ et où $q = 1,32$ (voir 6.3.1.1).

Ceci donne:

$$\sigma_{\text{tot}} = 279 \text{ N/mm}^2 \text{ qui est supérieur à } 1,32 \times 160 \text{ N/mm}^2 = 211 \text{ N/mm}^2$$

En ne considérant que le résultat de la méthode simplifiée, le jeu de barres n'est pas supposé supporter la force due au court-circuit.

NOTE - Il est donc nécessaire d'appliquer la méthode détaillée.

6.3.1.4 Forces de flexion sur les supports avec réenclenchement automatique triphasé

NOTE - Le calcul ci-après est effectué seulement pour information, du fait que, selon la méthode simplifiée, le jeu de barres ne supporte pas la force due au court-circuit.

$$F_d = V_F V_r \alpha F_{m3} \quad (15)$$

Conformément au tableau 2 de la CEI 865-1, on obtient, avec la valeur supérieure de $R_{p0,2}$:

$$\frac{\sigma_{\text{tot}}}{0,8 \cdot R_{p0,2}} = \frac{279 \text{ N/mm}^2}{0,8 \times 240 \text{ N/mm}^2} = 1,45$$

donc

$$1 < \frac{\sigma_{\text{tot}}}{0,8 \cdot R_{p0,2}}$$

D'où

$$V_F V_r = 1,0$$

La force sur les supports extérieurs (A) est, avec $\alpha_A = 0,375$ (voir tableau 3 de la CEI 865-1):

$$F_{dA} = V_F V_r \alpha_A F_{m3} = 1,0 \times 0,375 \times 10,2 \text{ kN} = 3,83 \text{ kN}$$

La force sur les supports intérieurs (B) est, avec $\alpha_B = 1,25$ (voir tableau 3 de la CEI 865-1):

$$F_{dB} = V_F V_r \alpha_B F_{m3} = 1,0 \times 1,25 \times 10,2 \text{ kN} = 12,75 \text{ kN}$$

where

$$V_{\sigma} V_r = 1,8 = (V_{\sigma} V_r)_{\max} \quad \text{according to IEC 865-1, table 2}$$

$$\beta = 0,73 \quad \text{according to IEC 865-1, table 3}$$

$$Z = 108 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad \text{see 6.3.1.1}$$

The busbars are assumed to withstand the short-circuit force if:

$$\sigma_{\text{tot}} \leq q R_{p0,2} \quad (13)$$

with the lower value of $R_{p0,2}$ and where $q = 1,32$, see 6.3.1.1

This gives:

$$\sigma_{\text{tot}} = 279 \text{ N/mm}^2 \quad \text{greater than } 1,32 \times 160 \text{ N/mm}^2 = 211 \text{ N/mm}^2$$

Considering only the result of the simplified method, the busbars are not assumed to withstand the short-circuit force.

NOTE - Therefore it is necessary to apply the detailed method.

6.3.1.4 Bending forces on the supports with three-phase automatic reclosing

NOTE - The following calculation is made only for information, as a result of the busbars not withstanding the short-circuit force according to the simplified method.

$$F_d = V_F V_r \alpha F_{m3} \quad (15)$$

According to IEC 865-1, table 2 with the upper value of $R_{p0,2}$ it is:

$$\frac{\sigma_{\text{tot}}}{0,8 \cdot R_{p0,2}} = \frac{279 \text{ N/mm}^2}{0,8 \times 240 \text{ N/mm}^2} = 1,45$$

therefore

$$1 < \frac{\sigma_{\text{tot}}}{0,8 \cdot R_{p0,2}}$$

Hence

$$V_F V_r = 1,0$$

The force on the outer supports (A) is with $\alpha_A = 0,375$, see IEC 865-1, table 3:

$$F_{dA} = V_F V_r \alpha_A F_{m3} = 1,0 \times 0,375 \times 10,2 \text{ kN} = 3,83 \text{ kN}$$

The force on the inner supports (B) is with $\alpha_B = 1,25$, see IEC 865-1, table 3:

$$F_{dB} = V_F V_r \alpha_B F_{m3} = 1,0 \times 1,25 \times 10,2 \text{ kN} = 12,75 \text{ kN}$$

6.3.2 Méthode détaillée

6.3.2.1 Fréquence propre f_c et facteurs V_F , V_σ et V_r

$$f_c = \frac{\gamma}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m'}} = \frac{2,45}{(18 \text{ m})^2} \times \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2 \times 8,62 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4}{7,84 \text{ kg/m}}} = 2,10 \text{ Hz} \quad (16)$$

où

$\gamma = 2,45$ selon le tableau 3 de la CEI 865-1;

$J = 8,62 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$ (voir 6.3.1.1).

Le rapport f_c/f est

$$\frac{f_c}{f} = \frac{2,10}{50} = 0,042$$

Pour ce rapport, les facteurs V_F , V_σ et V_r sont, selon le 2.2.2.6.2 et les figures 4 et 5 de la CEI 865-1:

$$V_F = 0,36$$

$$V_\sigma = 0,31$$

$$V_r = 1,0 \quad \text{sans réenclenchement automatique triphasé;}$$

$$V_r = 1,8 \quad \text{avec réenclenchement automatique triphasé.}$$

6.3.2.2 Contrainte de flexion des conducteurs sans réenclenchement automatique triphasé

La contrainte de flexion maximale est:

$$\sigma_{\text{tot}} = \sigma_m = V_\sigma V_r \beta \frac{F_{\text{m}^3} l}{8Z} \quad (9,12)$$

$$= 0,31 \times 1,0 \times 0,73 \times \frac{10,2 \cdot 10^3 \text{ N} \times 18 \text{ m}}{8 \times 108 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = 48,1 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 48,1 \text{ N/mm}^2$$

où

$$V_\sigma V_r = 0,31 \times 1,0 = 0,31$$

selon 6.3.2.1 plus haut, valeur qui est inférieure à la valeur 1,0 = $(V_\sigma V_r)_{\text{max}}$ selon le tableau 2 de la CEI 865-1;

$$\beta = 0,73$$

selon le tableau 3 de la CEI 865-1;

$$Z = \frac{J}{D/2} = \frac{8,62 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4}{0,080 \text{ m}} = 108 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

Le jeu de barres est supposé supporter la force due au court-circuit si

$$\sigma_{\text{tot}} \leq q R_{p0,2} \quad (13)$$

avec la valeur inférieure de $R_{p0,2}$ et où $q = 1,32$ (voir 6.3.1.1).

Ceci donne:

$$\sigma_{\text{tot}} = 48,1 \text{ N/mm}^2 \text{ qui est inférieure à } 1,32 \times 160 \text{ N/mm}^2 = 211 \text{ N/mm}^2$$

6.3.2 Detailed method

6.3.2.1 Natural frequency f_c and factors V_F , V_σ and V_r

$$f_c = \frac{\gamma}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m'}} = \frac{2,45}{(18 \text{ m})^2} \times \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2 \times 8,62 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4}{7,84 \text{ kg/m}}} = 2,10 \text{ Hz} \quad (16)$$

where

$\gamma = 2,45$ according to IEC 865-1, table 3

$J = 8,62 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$ see 6.3.1.1

The ratio f_c/f is

$$\frac{f_c}{f} = \frac{2,10}{50} = 0,042$$

for this ratio, the factors V_F , V_σ and V_r are according to IEC 865-1, 2.2.2.6.2, figure 4 and figure 5:

$$V_F = 0,36$$

$$V_\sigma = 0,31$$

$$V_r = 1,0 \quad \text{without three-phase automatic reclosing}$$

$$V_r = 1,8 \quad \text{with three-phase automatic reclosing}$$

6.3.2.2 Conductor bending stress without three-phase automatic reclosing

The maximum bending stress is:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{tot}} = \sigma_m &= V_\sigma V_r \beta \frac{F_{\text{ms}} l}{8Z} \\ &= 0,31 \times 1,0 \times 0,73 \times \frac{10,2 \cdot 10^3 \text{ N} \times 18 \text{ m}}{8 \times 108 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = 48,1 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 48,1 \text{ N/mm}^2 \end{aligned} \quad (9,12)$$

where

$$V_\sigma V_r = 0,31 \times 1,0 = 0,31 \quad \text{according to 6.3.2.1 above, value which is lower than } 1,0 = (V_\sigma V_r)_{\text{max}} \text{ according to IEC 865-1, table 2}$$

$$\beta = 0,73 \quad \text{according to IEC 865-1, table 3}$$

$$Z = \frac{J}{D/2} = \frac{8,62 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4}{0,080 \text{ m}} = 108 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

The busbars are assumed to withstand the short-circuit force if:

$$\sigma_{\text{tot}} \leq q R_{p0,2} \quad (13)$$

with the lower value of $R_{p0,2}$ and where $q = 1,32$, see 6.3.1.1.

This gives:

$$\sigma_{\text{tot}} = 48,1 \text{ N/mm}^2 \quad \text{less than} \quad 1,32 \times 160 \text{ N/mm}^2 = 211 \text{ N/mm}^2$$

6.3.2.3 Forces de flexion sur les supports sans réenclenchement automatique triphasé

$$F_d = V_F V_r \alpha F_{m3} \quad (15)$$

Selon 6.3.2.1 plus haut, $V_F V_r = 0,36 \times 1,0 = 0,36$ qui est inférieur à la valeur 1,24 obtenue en utilisant le tableau 2 de la CEI 865-1 dans le cas de la méthode simplifiée (voir 6.3.1.2).

La force sur les supports extérieurs (A) est, avec $\alpha_A = 0,375$ (voir tableau 3 de la CEI 865-1):

$$F_{dA} = V_F V_r \alpha_A F_{m3} = 0,36 \times 1,0 \times 0,375 \times 10,2 \text{ kN} = 1,38 \text{ kN}$$

La force sur les supports intérieurs (B) est, avec $\alpha_B = 1,25$ (voir tableau 3 de la CEI 865-1):

$$F_{dB} = V_F V_r \alpha_B F_{m3} = 0,36 \times 1,0 \times 1,25 \times 10,2 \text{ kN} = 4,59 \text{ kN}$$

Les moments de flexion sur l'infrastructure sont:

- à la base des isolateurs extérieurs
 $M_{IA} = F_{dA} h_I = 1,38 \text{ kN} \times 3,7 \text{ m} = 5,11 \text{ kNm}$
- à la base des supports extérieurs
 $M_{SA} = F_{dA} h_S = 1,38 \text{ kN} \times 7,0 \text{ m} = 9,66 \text{ kNm}$
- à la base de l'isolateur intérieur
 $M_{IB} = F_{dB} h_I = 4,59 \text{ kN} \times 3,7 \text{ m} = 17,0 \text{ kNm}$
- à la base du support intérieur
 $M_{SB} = F_{dB} h_S = 4,59 \text{ kN} \times 7,0 \text{ m} = 32,1 \text{ kNm}$

6.3.2.4 Contrainte de flexion des conducteurs avec réenclenchement automatique triphasé

La contrainte de flexion maximale est:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{tot}} = \sigma_m &= V_\sigma V_r \beta \frac{F_{m3} l}{8Z} \\ &= 0,31 \times 1,8 \times 0,73 \times \frac{10,2 \cdot 10^3 \text{ N} \times 18 \text{ m}}{8 \times 108 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = 86,6 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 86,6 \text{ N/mm}^2 \end{aligned} \quad (9,12)$$

où

$$\begin{aligned} V_\sigma V_r &= 0,31 \times 1,8 = 0,558 && \text{selon 6.3.2.1 ci-dessus, valeur qui est inférieur à la valeur} \\ &&& 1,8 = (V_\sigma V_r)_{\text{max}} \text{ selon le tableau 2 de la CEI 865-1;} \\ \beta &= 0,73 && \text{selon le tableau 3 de la CEI 865-1;} \\ Z &= 108 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 && \text{(voir 6.3.2.2)} \end{aligned}$$

Le jeu de barres est supposé supporter la force due au court-circuit si

$$\sigma_{\text{tot}} \leq q R_{p0,2} \quad (13)$$

avec la valeur inférieure de $R_{p0,2}$ et où $q = 1,32$ (voir 6.3.1.1).

Ceci donne:

$$\sigma_{\text{tot}} = 86,6 \text{ N/mm}^2 \text{ qui est inférieur à } 1,32 \times 160 \text{ N/mm}^2 = 211 \text{ N/mm}^2$$

6.3.2.3 Bending force on the supports without three-phase automatic reclosing

$$F_d = V_F V_r \alpha F_{m3} \quad (15)$$

According to 6.3.2.1 above, $V_F V_r = 0,36 \times 1,0 = 0,36$ which is lower than the value 1,24 obtained from IEC 865-1, table 2 in the case of the simplified method, see 6.3.1.2.

For the outer supports (A) with $\alpha_A = 0,375$, see IEC 865-1, table 3:

$$F_{dA} = V_F V_r \alpha_A F_{m3} = 0,36 \times 1,0 \times 0,375 \times 10,2 \text{ kN} = 1,38 \text{ kN}$$

For the inner supports (B) with $\alpha_B = 1,25$, see IEC 865-1, table 3:

$$F_{dB} = V_F V_r \alpha_B F_{m3} = 0,36 \times 1,0 \times 1,25 \times 10,2 \text{ kN} = 4,59 \text{ kN}$$

The bending moments on the substructures are:

- on the bottom of the outer insulators
 $M_{IA} = F_{dA} h_I = 1,38 \text{ kN} \times 3,7 \text{ m} = 5,11 \text{ kNm}$
- on the bottom of the outer supports
 $M_{SA} = F_{dA} h_S = 1,38 \text{ kN} \times 7,0 \text{ m} = 9,66 \text{ kNm}$
- on the bottom of the inner insulator
 $M_{IB} = F_{dB} h_I = 4,59 \text{ kN} \times 3,7 \text{ m} = 17,0 \text{ kNm}$
- on the bottom of the inner support
 $M_{SB} = F_{dB} h_S = 4,59 \text{ kN} \times 7,0 \text{ m} = 32,1 \text{ kNm}$

6.3.2.4 Conductor bending stress with three-phase automatic reclosing

The maximum bending stress is:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{tot}} = \sigma_m &= V_\sigma V_r \beta \frac{F_{m3} l}{8Z} \quad (9,12) \\ &= 0,31 \times 1,8 \times 0,73 \times \frac{10,2 \cdot 10^3 \text{ N} \times 18 \text{ m}}{8 \times 108 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = 86,6 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 86,6 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

where

$$\begin{aligned} V_\sigma V_r &= 0,31 \times 1,8 = 0,558 && \text{according to 6.3.2.1 above, value which is lower than } 1,8 = (V_\sigma V_r)_{\text{max}} \text{ according to IEC 865-1, table 2} \\ \beta &= 0,73 && \text{according to IEC 865-1, table 3} \\ Z &= 108 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 && \text{see 6.3.2.2} \end{aligned}$$

The busbars are assumed to withstand the short-circuit force if:

$$\sigma_{\text{tot}} \leq q R_{p0,2} \quad (13)$$

with the lower value of $R_{p0,2}$ and where $q = 1,32$, see 6.3.1.1.

This gives:

$$\sigma_{\text{tot}} = 86,6 \text{ N/mm}^2 \text{ less than } 1,32 \times 160 \text{ N/mm}^2 = 211 \text{ N/mm}^2$$

6.3.2.5 Forces de flexion sur les supports avec réenclenchement automatique triphasé

$$F_d = V_F V_r \alpha F_{m3} \quad (15)$$

Selon 6.3.2.1 plus haut, $V_F V_r = 0,36 \times 1,8 = 0,65$ qui est inférieur à la valeur 1,0 obtenue en utilisant le tableau 2 de la CEI 865-1 dans le cas de la méthode simplifiée (voir 6.3.1.4).

La force sur les supports extérieurs (A) est, avec $\alpha_A = 0,375$ (voir tableau 3 de la CEI 865-1):

$$F_{dA} = V_F V_r \alpha_A F_{m3} = 0,36 \times 1,8 \times 0,375 \times 10,2 \text{ kN} = 2,48 \text{ kN}$$

La force sur les supports intérieurs (B) est, avec $\alpha_B = 1,25$ (voir tableau 3 de la CEI 865-1):

$$F_{dB} = V_F V_r \alpha_B F_{m3} = 0,36 \times 1,8 \times 1,25 \times 10,2 \text{ kN} = 8,26 \text{ kN}$$

Les moments de flexion sur l'infrastructure sont:

- à la base des isolateurs extérieurs

$$M_{IA} = F_{dA} h_I = 2,48 \text{ kN} \times 3,7 \text{ m} = 9,18 \text{ kNm}$$

- à la base des supports extérieurs

$$M_{SA} = F_{dA} h_S = 2,48 \text{ kN} \times 7,0 \text{ m} = 17,4 \text{ kNm}$$

- à la base de l'isolateur intérieur

$$M_{IB} = F_{dB} h_I = 8,26 \text{ kN} \times 3,7 \text{ m} = 30,6 \text{ kNm}$$

- à la base du support intérieur

$$M_{SB} = F_{dB} h_S = 8,26 \text{ kN} \times 7,0 \text{ m} = 57,8 \text{ kNm}$$

6.3.3 Conclusions

a) Sans réenclenchement automatique triphasé

Le jeu de barres supporte la force due au courant de court-circuit.

Les contraintes de flexion calculées σ_{tot} sont:

N/mm² 155 48,1

Les supports extérieurs doivent supporter une force dynamique de flexion de

kN 4,74 1,38

Les supports intérieurs doivent supporter une force dynamique de flexion de

kN 15,8 4,59

b) Avec réenclenchement automatique triphasé

Les contraintes de flexion calculées σ_{tot} sont:

N/mm² 279 86,6

Le jeu de barres est supposé supporter la force due au courant de court-circuit lorsque l'on utilise la méthode détaillée mais ne l'est pas lorsque l'on utilise la méthode simplifiée.

Les supports extérieurs doivent supporter une force dynamique de flexion de

kN 3,83 2,48

Les supports intérieurs doivent supporter une force dynamique de flexion de

kN 12,8 8,26

6.3.2.5 Bending force on the supports with three-phase automatic reclosing

$$F_d = V_F V_r \alpha F_{m3} \quad (15)$$

According to 6.3.2.1 above, $V_F V_r = 0,36 \times 1,8 = 0,65$ which is lower than the value 1,0 obtained from IEC 865-1, table 2 in the case of the simplified method, see 6.3.1.4.

For the outer supports (A) with $\alpha_A = 0,375$, see IEC 865-1, table 3:

$$F_{dA} = V_F V_r \alpha_A F_{m3} = 0,36 \times 1,8 \times 0,375 \times 10,2 \text{ kN} = 2,48 \text{ kN}$$

For the inner supports (B) with $\alpha_B = 1,25$, see IEC 865-1, table 3:

$$F_{dB} = V_F V_r \alpha_B F_{m3} = 0,36 \times 1,8 \times 1,25 \times 10,2 \text{ kN} = 8,26 \text{ kN}$$

The bending moments on the substructures are:

- on the bottom of the outer insulators

$$M_{IA} = F_{dA} h_I = 2,48 \text{ kN} \times 3,7 \text{ m} = 9,18 \text{ kNm}$$

- on the bottom of the outer supports

$$M_{SA} = F_{dA} h_S = 2,48 \text{ kN} \times 7,0 \text{ m} = 17,4 \text{ kNm}$$

- on the bottom of the inner insulator

$$M_{IB} = F_{dB} h_I = 8,26 \text{ kN} \times 3,7 \text{ m} = 30,6 \text{ kNm}$$

- on the bottom of the inner support

$$M_{SB} = F_{dB} h_S = 8,26 \text{ kN} \times 7,0 \text{ m} = 57,8 \text{ kNm}$$

6.3.3 Conclusions

		Simplified method	Detailed method
a) Without three-phase automatic reclosing			
The busbars will withstand the short-circuit force.			
The calculated bending stresses σ_{tot} are:	N/mm ²	155	48,1
The outer supports have to withstand a dynamic bending force of	kN	4,74	1,38
The inner supports have to withstand a dynamic bending force of	kN	15,8	4,59
b) With three-phase automatic reclosing			
The calculated bending stresses σ_{tot} are:	N/mm ²	279	86,6
The busbars are assumed to withstand the short-circuit force when using the detailed method but not when using the simplified method.			
The outer supports have to withstand a dynamic bending force of	kN	3,83	2,48
The inner supports have to withstand a dynamic bending force of	kN	12,8	8,26

7 Exemple 4 – Effets mécaniques sur une installation 110 kV avec des conducteurs détendus

La base de calcul pour le présent exemple est une connexion de jeu de barres souple triphasé avec un seul conducteur câblé, entièrement en aluminium, par phase, avec des distances variables entre les conducteurs. Les points d'ancrage à chaque extrémité de la portée sont des supports isolants sur des infrastructures en acier, comme indiqué à la figure 4.

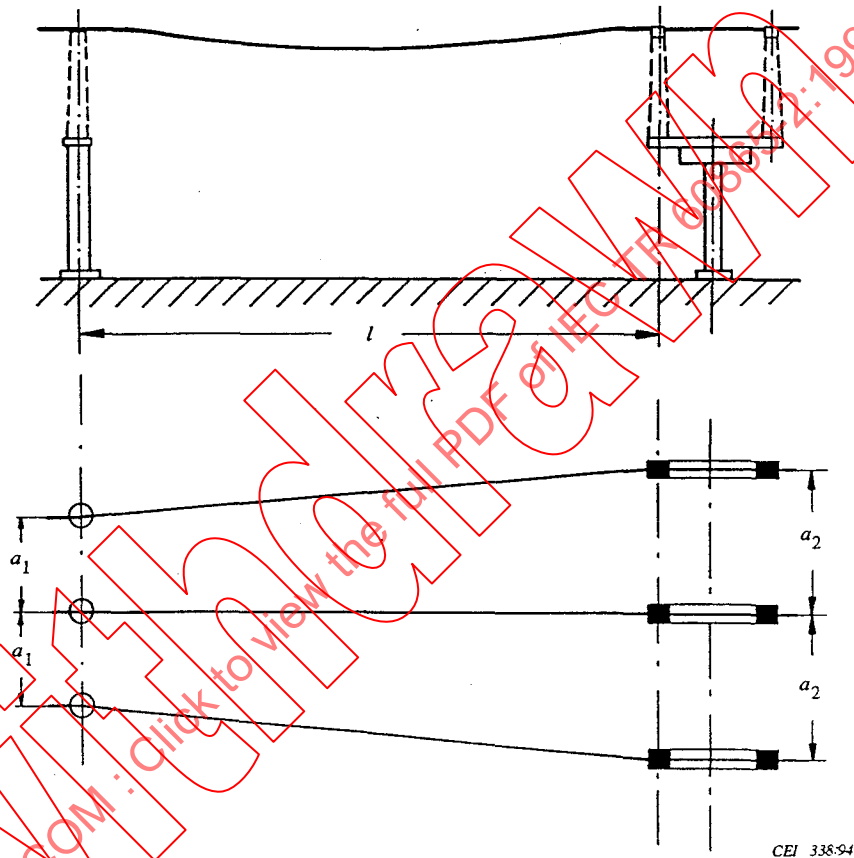


Figure 4 – Installation avec des conducteurs détendus

7 Example 4 – Mechanical effects on a 110 kV arrangement with slack conductors

The basis for the calculations in this example is a three-phase flexible busbar connection with one all-aluminium stranded conductor per phase with varying distances between the conductors. The anchor points at each end of the span are post insulators on steel sub-structures as shown in figure 4.

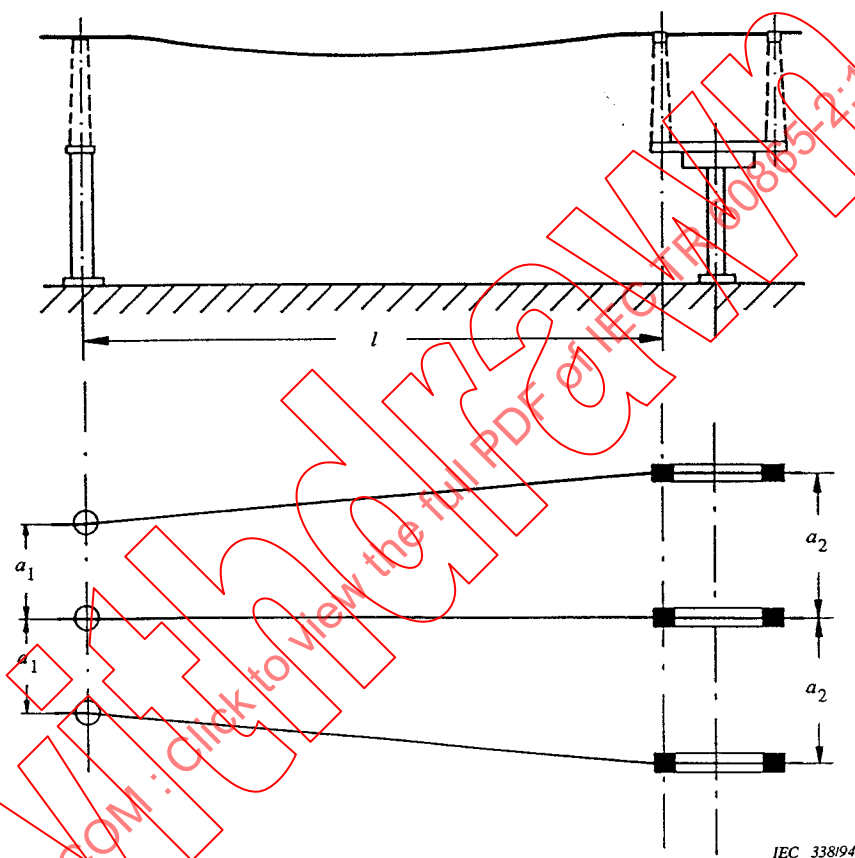


Figure 4 – Arrangement with slack conductors

7.1 Données

Courant de court-circuit triphasé symétrique initial (valeur efficace)	$I''_{k3} = 19 \text{ kA}$
Durée du premier passage du courant de court-circuit	$T_{k1} = 0,3 \text{ s}$
Distance entre supports	$l = 11,5 \text{ m}$
Entraxe des conducteurs	$a_1 = 1,6 \text{ m}$ $a_2 = 2,4 \text{ m}$
Constante d'élasticité résultante des deux supports d'une portée	$S = 100 \text{ N/mm}$

Conducteur câblé entièrement en aluminium AAC 240

– Section	$A_s = 242 \text{ mm}^2$
– Masse par unité de longueur	$m'_s = 0,670 \text{ kg/m}$
– Module de Young	$E = 55\,000 \text{ N/mm}^2$

Force de tension statique du conducteur pour une température de conducteur de -20°C
(température hivernale minimale du lieu)

$$F_{st,-20} = 400 \text{ N}$$

Force de tension statique du conducteur pour une température de conducteur de 60°C

$$F_{st,60} = 273 \text{ N}$$

Valeur conventionnelle de l'accélération de la pesanteur

$$g_n = 9,81 \text{ m/s}^2$$

7.2 Force électromagnétique et paramètres caractéristiques

La force électromagnétique par unité de longueur est:

$$F' = \frac{\mu_0}{2\pi} 0,75 \frac{(I''_{k3})^2}{a} \frac{l_c}{l} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \times 0,75 \times \frac{(19 \cdot 10^3 \text{ A})^2}{2\text{ m}} \times 1,0 = 27,1 \text{ N/m} \quad (19)$$

avec $l_c/l = 1,0$ et une distance équivalente $a = \frac{a_1 + a_2}{2} = \frac{1,6 \text{ m} + 2,4 \text{ m}}{2} = 2 \text{ m}$

Le paramètre r est:

$$r = \frac{F'}{nm'_s g_n} = \frac{27,1 \text{ N/m}}{1 \times 0,670 \text{ kg/m} \times 9,81 \text{ m/s}^2} = 4,12 \quad (20)$$

La direction de la force résultante est:

$$\delta_1 = \arctan r = \arctan 4,12 = 76,4^\circ \quad (21)$$

7.1 Data

Three-phase initial symmetrical short-circuit current
(r.m.s.)

$$I''_{k3} = 19 \text{ kA}$$

Duration of the first current flow

$$T_{k1} = 0,3 \text{ s}$$

Distance between supports

$$l = 11,5 \text{ m}$$

Centre-line distance between conductors

$$a_1 = 1,6 \text{ m}$$

$$a_2 = 2,4 \text{ m}$$

Resulting spring constant of both span supports

$$S = 100 \text{ N/mm}$$

All-aluminium stranded conductor AAC 240

– Cross-section

$$A_s = 242 \text{ mm}^2$$

– Mass per unit length

$$m'_s = 0,670 \text{ kg/m}$$

– Young's modulus

$$E = 55\,000 \text{ N/mm}^2$$

Static conductor tensile force at a conductor temperature
of -20°C (local minimum winter temperature)

$$F_{st,-20} = 400 \text{ N}$$

Static conductor tensile force at a conductor temperature
of 60°C

$$F_{st,60} = 273 \text{ N}$$

Conventional value of acceleration of gravity

$$g_n = 9,81 \text{ m/s}^2$$

7.2 Electromagnetic forces and characteristic parameters

The electromagnetic force per unit length is:

$$F' = \frac{\mu_0}{2\pi} 0,75 \frac{(I''_{k3})^2}{a} \frac{l_c}{l} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs}}{\text{Am}} \times 0,75 \times \frac{(19 \cdot 10^3 \text{ A})^2}{2\text{m}} \times 1,0 = 27,1 \text{ N/m} \quad (19)$$

with $l_c/l = 1,0$ and an equivalent distance $a = \frac{a_1 + a_2}{2} = \frac{1,6 \text{ m} + 2,4 \text{ m}}{2} = 2 \text{ m}$

The parameter r is:

$$r = \frac{F'}{nm'_s g_n} = \frac{27,1 \text{ N/m}}{1 \times 0,670 \text{ kg/m} \times 9,81 \text{ m/s}^2} = 4,12 \quad (20)$$

The direction of the resulting force is:

$$\delta_1 = \arctan r = \arctan 4,12 = 76,4^\circ \quad (21)$$

Les flèches statiques équivalentes du conducteur en milieu de portée sont:

$$b_{c,-20} = \frac{n m'_s g_n l^2}{8 F_{st,-20}} = \frac{1 \times 0,670 \text{ kg/m} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 11,5^2 \text{ m}^2}{8 \times 400 \text{ N}} = 0,272 \text{ m} \quad (22)$$

$$b_{c,60} = \frac{n m'_s g_n l^2}{8 F_{st,60}} = \frac{1 \times 0,670 \text{ kg/m} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 11,5^2 \text{ m}^2}{8 \times 273 \text{ N}} = 0,398 \text{ m} \quad (22)$$

Les périodes d'oscillation du conducteur sont:

$$T_{-20} = 2\pi \sqrt{0,8 \cdot \frac{b_{c,-20}}{g_n}} = 2\pi \sqrt{0,8 \times \frac{0,272}{9,81 \text{ m/s}^2}} = 0,936 \text{ s} \quad (23)$$

$$T_{60} = 2\pi \sqrt{0,8 \cdot \frac{b_{c,60}}{g_n}} = 2\pi \sqrt{0,8 \times \frac{0,398}{9,81 \text{ m/s}^2}} = 1,132 \text{ s} \quad (23)$$

Les périodes résultantes d'oscillation sont:

$$T_{res,-20} = \frac{T_{-20}}{\sqrt[4]{1+r^2} \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \left(\frac{\delta_1}{90^\circ} \right)^2 \right]} \quad (24)$$

$$= \frac{0,936 \text{ s}}{\sqrt[4]{1+4,12^2} \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \times \left(\frac{76,4}{90^\circ} \right)^2 \right]} = 0,511 \text{ s}$$

$$T_{res,60} = \frac{T_{60}}{\sqrt[4]{1+r^2} \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \left(\frac{\delta_1}{90^\circ} \right)^2 \right]} \quad (24)$$

$$= \frac{1,132 \text{ s}}{\sqrt[4]{1+4,12^2} \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \times \left(\frac{76,4}{90^\circ} \right)^2 \right]} = 0,618 \text{ s}$$

Les normes de rigidité sont:

$$N_{-20} = \frac{1}{Sl} + \frac{1}{n E_{s,-20} A_s} \quad (25)$$

$$= \frac{1}{10^5 \text{ N/m} \times 11,5 \text{ m}} + \frac{1}{1 \times 1,85 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2 \times 242 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 1,093 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{N}}$$

The equivalent static conductor sags at midspan are:

$$b_{c,-20} = \frac{n m'_s g_n l^2}{8 F_{st,-20}} = \frac{1 \times 0,670 \text{ kg/m} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 11,5^2 \text{ m}^2}{8 \times 400 \text{ N}} = 0,272 \text{ m} \quad (22)$$

$$b_{c,60} = \frac{n m'_s g_n l^2}{8 F_{st,60}} = \frac{1 \times 0,670 \text{ kg/m} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 11,5^2 \text{ m}^2}{8 \times 273 \text{ N}} = 0,398 \text{ m} \quad (22)$$

The periods of the conductor oscillation are:

$$T_{-20} = 2\pi \sqrt{0,8 \cdot \frac{b_{c,-20}}{g_n}} = 2\pi \sqrt{0,8 \times \frac{0,272}{9,81 \text{ m/s}^2}} = 0,936 \text{ s} \quad (23)$$

$$T_{60} = 2\pi \sqrt{0,8 \cdot \frac{b_{c,60}}{g_n}} = 2\pi \sqrt{0,8 \times \frac{0,398}{9,81 \text{ m/s}^2}} = 1,132 \text{ s} \quad (23)$$

The resulting periods of oscillation are:

$$T_{res,-20} = \frac{T_{-20}}{\sqrt[4]{1+r^2} \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \left(\frac{\delta_1}{90^\circ} \right)^2 \right]} \quad (24)$$

$$= \frac{0,936 \text{ s}}{\sqrt[4]{1+4,12^2} \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \times \left(\frac{76,4}{90^\circ} \right)^2 \right]} = 0,511 \text{ s}$$

$$T_{res,60} = \frac{T_{60}}{\sqrt[4]{1+r^2} \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \left(\frac{\delta_1}{90^\circ} \right)^2 \right]} \quad (24)$$

$$= \frac{1,132 \text{ s}}{\sqrt[4]{1+4,12^2} \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \times \left(\frac{76,4}{90^\circ} \right)^2 \right]} = 0,618 \text{ s}$$

The stiffness norms are:

$$N_{-20} = \frac{1}{Sl} + \frac{1}{n E_{s,-20} A_s} \quad (25)$$

$$= \frac{1}{10^5 \text{ N/m} \times 11,5 \text{ m}} + \frac{1}{1 \times 1,85 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2 \times 242 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 1,093 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{N}}$$

avec

$$E_{s,-20} = E \left[0,3 + 0,7 \cdot \sin \left(\frac{F_{st,-20}}{nA_s \sigma_{fin}} \cdot 90^\circ \right) \right] \quad (26)$$

$$= 55 \cdot 10^9 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \times \left[0,3 + 0,7 \times \sin \left(\frac{1,65 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2}{5 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2} \times 90^\circ \right) \right] = 1,85 \cdot 10^{10} \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

parce que

$$\frac{F_{st,-20}}{nA_s} = \frac{400 \text{ N}}{1 \times 242 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 1,65 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \text{ inférieur à } \sigma_{fin} = 5 \cdot 10^7 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad (27)$$

$$N_{60} = \frac{1}{Sl} + \frac{1}{n E_{s,60} A_s} \quad (25)$$

$$= \frac{1}{10^5 \text{ N/m} \times 11,5 \text{ m}} + \frac{1}{1 \times 1,79 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2 \times 242 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 1,100 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{N}}$$

avec

$$E_{s,60} = E \left[0,3 + 0,7 \cdot \sin \left(\frac{F_{st,60}}{nA_s \sigma_{fin}} \cdot 90^\circ \right) \right] \quad (26)$$

$$= 55 \cdot 10^9 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \times \left[0,3 + 0,7 \times \sin \left(\frac{1,13 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2}{5 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2} \times 90^\circ \right) \right] = 1,79 \cdot 10^{10} \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

parce que

$$\frac{F_{st,60}}{nA_s} = \frac{273 \text{ N}}{1 \times 242 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 1,13 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \text{ inférieur à } \sigma_{fin} = 5 \cdot 10^7 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad (27)$$

Les facteurs de contrainte sont:

$$\zeta_{-20} = \frac{(nm'_s g_n l)^2}{24 F_{st,-20}^3 N_{-20}} = \frac{(1 \times 0,670 \text{ kg/m} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 11,5 \text{ m})^2}{24 \times (400 \text{ N})^3 \times 1,093 \cdot 10^{-6} \text{ 1/N}} = 3,40 \quad (28)$$

$$\zeta_{60} = \frac{(nm'_s g_n l)^2}{24 F_{st,60}^3 N_{60}} = \frac{(1 \times 0,670 \text{ kg/m} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 11,5 \text{ m})^2}{24 \times (273 \text{ N})^3 \times 1,100 \cdot 10^{-6} \text{ 1/N}} = 10,6 \quad (28)$$

Les angles d'oscillation de la portée sont:

$$\delta_{k,-20} = 2\delta_1 = 2 \times 76,4^\circ = 153^\circ \quad (29)$$

with

$$E_{s,-20} = E \left[0,3 + 0,7 \cdot \sin \left(\frac{F_{st,-20}}{nA_s \sigma_{fin}} \cdot 90^\circ \right) \right] \quad (26)$$

$$= 55 \cdot 10^9 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \times \left[0,3 + 0,7 \times \sin \left(\frac{1,65 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2}{5 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2} \times 90^\circ \right) \right] = 1,85 \cdot 10^{10} \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

because

$$\frac{F_{st,-20}}{nA_s} = \frac{400 \text{ N}}{1 \times 242 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 1,65 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad \text{less than} \quad \sigma_{fin} = 5 \cdot 10^7 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad (27)$$

$$N_{60} = \frac{1}{Sl} + \frac{1}{n E_{s,60} A_s} \quad (25)$$

$$= \frac{1}{10^5 \text{ N/m} \times 11,5 \text{ m}} + \frac{1}{1 \times 1,79 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2 \times 242 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 1,100 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{N}}$$

with

$$E_{s,60} = E \left[0,3 + 0,7 \times \sin \left(\frac{F_{st,60}}{nA_s \sigma_{fin}} \cdot 90^\circ \right) \right] \quad (26)$$

$$= 55 \cdot 10^9 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \times \left[0,3 + 0,7 \times \sin \left(\frac{1,13 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2}{5 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2} \times 90^\circ \right) \right] = 1,79 \cdot 10^{10} \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

because

$$\frac{F_{st,60}}{nA_s} = \frac{273 \text{ N}}{1 \times 242 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 1,13 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad \text{less than} \quad \sigma_{fin} = 5 \cdot 10^7 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad (27)$$

The stress factors are:

$$\zeta_{-20} = \frac{(nm'_s g_n l)^2}{24 F_{st,-20}^3 N_{-20}} = \frac{(1 \times 0,670 \text{ kg/m} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 11,5 \text{ m})^2}{24 \times (400 \text{ N})^3 \times 1,093 \cdot 10^{-6} \text{ 1/N}} = 3,40 \quad (28)$$

$$\zeta_{60} = \frac{(nm'_s g_n l)^2}{24 F_{st,60}^3 N_{60}} = \frac{(1 \times 0,670 \text{ kg/m} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 11,5 \text{ m})^2}{24 \times (273 \text{ N})^3 \times 1,100 \cdot 10^{-6} \text{ 1/N}} = 10,6 \quad (28)$$

The span swing-out angles are:

$$\delta_{k,-20} = 2\delta_1 = 2 \times 76,4^\circ = 153^\circ \quad (29)$$

parce que

$$\frac{T_{k1}}{T_{res,-20}} = \frac{0,3 \text{ s}}{0,511 \text{ s}} = 0,587 \quad \text{qui est supérieur à } 0,5$$

$$\delta_{k,60} = \delta_1 \left[1 - \cos \left(360^\circ \cdot \frac{T_{k1}}{T_{res,60}} \right) \right] = 76,4^\circ \left[1 - \cos \left(360^\circ \times \frac{0,3}{0,618} \right) \right] = 152,5^\circ \quad (29)$$

parce que

$$\frac{T_{k1}}{T_{res,60}} = \frac{0,3 \text{ s}}{0,618 \text{ s}} = 0,485 \quad \text{qui est inférieur à } 0,5$$

Les angles maximaux d'oscillation $\delta_{m,-20}$ et $\delta_{m,60}$ dépendent respectivement de χ_{-20} et χ_{60} qui dépendent de $\delta_{k,-20}$ et $\delta_{k,60}$.

Avec $\delta_{k,-20} = 153^\circ$, qui est supérieur à 90° , on obtient:

$$\chi_{-20} = 1 - r = 1 - 4,12 = -3,12 \quad (30)$$

et avec $\chi_{-20} = -3,12$, qui est inférieur à $-0,985$, on obtient:

$$\delta_{m,-20} = 180^\circ \quad (31)$$

Avec $\delta_{k60} = 152,5^\circ$, qui est supérieur à 90° , on obtient:

$$\chi_{60} = 1 - r = 1 - 4,12 = -3,12 \quad (30)$$

et avec $\chi_{60} = -3,12$, qui est inférieur à $-0,985$, on obtient:

$$\delta_{m,60} = 180^\circ \quad (31)$$

7.2.1 Force de tension F_t pendant le court-circuit

Le paramètre de charge est:

$$\Phi_{60} = \Phi_{-20} = 3 (\sqrt{1 + r^2} - 1) = 3 (\sqrt{1 + 4,12^2} - 1) = 9,72 \quad (32)$$

parce que $T_{k1} = 0,3 \text{ s}$ est supérieur à $\frac{T_{res,-20}}{4} = \frac{0,511 \text{ s}}{4} = 0,128 \text{ s}$

et que $T_{k1} = 0,3 \text{ s}$ est supérieur à $\frac{T_{res,60}}{4} = \frac{0,618 \text{ s}}{4} = 0,155 \text{ s}$

because

$$\frac{T_{k1}}{T_{res,-20}} = \frac{0,3 \text{ s}}{0,511 \text{ s}} = 0,587 \text{ greater than } 0,5$$

$$\delta_{k,60} = \delta_1 \left[1 - \cos \left(360^\circ \cdot \frac{T_{k1}}{T_{res,60}} \right) \right] = 76,4^\circ \left[1 - \cos \left(360^\circ \times \frac{0,3}{0,618} \right) \right] = 152,5^\circ \quad (29)$$

because

$$\frac{T_{k1}}{T_{res,60}} = \frac{0,3 \text{ s}}{0,618 \text{ s}} = 0,485 \text{ less than } 0,5$$

The maximum swing-out angles $\delta_{m,-20}$ and $\delta_{m,60}$ depend respectively on χ_{-20} and χ_{60} which depend on $\delta_{k,-20}$ and $\delta_{k,60}$.

For $\delta_{k,-20} = 153^\circ$ greater than 90° is:

$$\chi_{-20} = 1 - r = 1 - 4,12 = -3,12 \quad (30)$$

and for $\chi_{-20} = -3,12$ less than $-0,985$ is:

$$\delta_{m,-20} = 180^\circ \quad (31)$$

For $\delta_{k,60} = 152,5^\circ$ greater than 90° is:

$$\chi_{60} = 1 - r = 1 - 4,12 = -3,12 \quad (30)$$

and for $\chi_{60} = -3,12$ less than $-0,985$ is:

$$\delta_{m,60} = 180^\circ \quad (31)$$

7.2.1 Tensile force F_t during the short circuit

The load parameter is:

$$\varphi_{60} = \varphi_{-20} = 3 (\sqrt{1 + r^2} - 1) = 3 (\sqrt{1 + 4,12^2} - 1) = 9,72 \quad (32)$$

because $T_{k1} = 0,3 \text{ s}$ greater than $\frac{T_{res,-20}}{4} = \frac{0,511 \text{ s}}{4} = 0,128 \text{ s}$

and $T_{k1} = 0,3 \text{ s}$ greater than $\frac{T_{res,60}}{4} = \frac{0,618 \text{ s}}{4} = 0,155 \text{ s}$

Selon la figure 7 de la CEI 865-1, les facteurs ψ_{-20} et ψ_{60} sont:

- avec $\phi_{-20} = 9,72$ et $\zeta_{-20} = 3,40$:

$$\psi_{-20} = 0,58$$

- avec $\phi_{60} = 9,72$ et $\zeta_{60} = 10,6$:

$$\psi_{60} = 0,75$$

Les forces de tension pendant le court-circuit sont, pour $n = 1$:

$$F_{t,-20} = F_{st,-20} (1 + \phi_{-20} \psi_{-20}) = 400 \text{ N} (1 + 9,72 \times 0,58) = 2\,655 \text{ N} = 2,66 \text{ kN} \quad (34)$$

$$F_{t,60} = F_{st,60} (1 + \phi_{60} \psi_{60}) = 273 \text{ N} (1 + 9,72 \times 0,75) = 2\,263 \text{ N} = 2,26 \text{ kN} \quad (34)$$

La force de tension F_t est la valeur maximale de $F_{t,-20}$ et de $F_{t,60}$:

$$F_t = \max \{F_{t,-20}, F_{t,60}\} = \max \{2,66 \text{ kN}, 2,26 \text{ kN}\} = 2,66 \text{ kN}$$

7.2.2 Force de tension F_f après le court-circuit

Parce que $r = 4,12$ est supérieur à 0,6 ou que $\delta_{m,-20} = \delta_{m,60} = 180^\circ$, qui est supérieur à 70° , la force de tension F_f après le court-circuit est importante.

$$\begin{aligned} F_{f,-20} &= 1,2 F_{st,-20} \sqrt{1 + 8 \zeta_{-20} \cdot \frac{\delta_{m,-20}}{180^\circ}} \\ &= 1,2 \times 400 \text{ N} \sqrt{1 + 8 \times 3,40 \times \frac{180^\circ}{180^\circ}} = 2\,549 \text{ N} = 2,55 \text{ kN} \end{aligned} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} F_{f,60} &= 1,2 F_{st,60} \sqrt{1 + 8 \zeta_{60} \cdot \frac{\delta_{m,60}}{180^\circ}} \\ &= 1,2 \times 273 \text{ N} \sqrt{1 + 8 \times 10,6 \times \frac{180^\circ}{180^\circ}} = 3\,035 \text{ N} = 3,04 \text{ kN} \end{aligned} \quad (35)$$

La force de tension F_f est la valeur maximale de $F_{f,-20}$ et de $F_{f,60}$:

$$F_f = \max \{F_{f,-20}, F_{f,60}\} = \max \{2,55 \text{ kN}, 3,04 \text{ kN}\} = 3,04 \text{ kN}$$

According to IEC 865-1, figure 7, the factors ψ_{-20} and ψ_{60} are:

- for $\phi_{-20} = 9,72$ and $\zeta_{-20} = 3,40$:

$$\psi_{-20} = 0,58$$

- for $\phi_{60} = 9,72$ and $\zeta_{60} = 10,6$:

$$\psi_{60} = 0,75$$

The tensile forces during the short circuit are for $n = 1$:

$$F_{t,-20} = F_{st,-20} (1 + \phi_{-20} \psi_{-20}) = 400 \text{ N} (1 + 9,72 \times 0,58) = 2\,655 \text{ N} = 2,66 \text{ kN} \quad (34)$$

$$F_{t,60} = F_{st,60} (1 + \phi_{60} \psi_{60}) = 273 \text{ N} (1 + 9,72 \times 0,75) = 2\,263 \text{ N} = 2,26 \text{ kN} \quad (34)$$

The tensile force F_t is the maximum value of $F_{t,-20}$ and $F_{t,60}$:

$$F_t = \max \{F_{t,-20}, F_{t,60}\} = \max \{2,66 \text{ kN}, 2,26 \text{ kN}\} = 2,66 \text{ kN}$$

7.2.2 Tensile force F_f after the short circuit

Because $r = 4,12$ is greater than 0,6 or $\delta_{m,-20} = \delta_{m,60} = 180^\circ$ is greater than 70° the tensile force after the short circuit F_f is significant:

$$\begin{aligned} F_{f,-20} &= 1,2 F_{st,-20} \sqrt{1 + 8 \zeta_{-20} \cdot \frac{\delta_{m,-20}}{180^\circ}} \\ &= 1,2 \times 400 \text{ N} \sqrt{1 + 8 \times 3,40 \times \frac{180^\circ}{180^\circ}} = 2\,549 \text{ N} = 2,55 \text{ kN} \end{aligned} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} F_{f,60} &= 1,2 F_{st,60} \sqrt{1 + 8 \zeta_{60} \cdot \frac{\delta_{m,60}}{180^\circ}} \\ &= 1,2 \times 273 \text{ N} \sqrt{1 + 8 \times 10,6 \times \frac{180^\circ}{180^\circ}} = 3\,035 \text{ N} = 3,04 \text{ kN} \end{aligned} \quad (35)$$

The tensile force F_f is the maximum value of $F_{f,-20}$ and $F_{f,60}$:

$$F_f = \max \{F_{f,-20}, F_{f,60}\} = \max \{2,55 \text{ kN}, 3,04 \text{ kN}\} = 3,04 \text{ kN}$$

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

Toutes les grandeurs suivantes sont calculées pour une température de conducteur de 60 °C qui conduit à un déplacement de portée plus grand qu'une température de conducteur de -20 °C.

L'extension élastique est:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\text{ela}} &= N_{60} (F_{t,60} - F_{st,60}) \\ &= 1,10 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{N}} \times (2\,263 \text{ N} - 273 \text{ N}) = 2,19 \cdot 10^{-3}\end{aligned}\quad (36)$$

La dilatation thermique est:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\text{th}} &= c_{\text{th}} \left(\frac{I_{k3}''}{n A_s} \right)^2 \frac{T_{\text{res},60}}{4} \\ &= 0,27 \cdot 10^{-18} \frac{\text{m}^4}{\text{A}^2 \text{s}} \times \left(\frac{19 \cdot 10^3 \text{ A}}{1 \times 242 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} \right)^2 \times \frac{0,618 \text{ s}}{4} = 2,57 \cdot 10^{-4}\end{aligned}\quad (37)$$

parce que

$$T_{k1} = 0,3 \text{ s} \text{ est supérieur à } \frac{T_{\text{res},60}}{4} = \frac{0,618}{4} = 0,155 \text{ s}$$

et que la valeur de c_{th} pour des conducteurs entièrement en aluminium est : $c_{\text{th}} = 0,27 \cdot 10^{-18} \frac{\text{m}^4}{\text{A}^2 \text{s}}$

Le facteur C_D est:

$$\begin{aligned}C_D &= \sqrt{1 + \frac{3}{8} \left(\frac{l}{b_{c,60}} \right)^2 (\varepsilon_{\text{ela}} + \varepsilon_{\text{th}})} \\ &= \sqrt{1 + \frac{3}{8} \times \left(\frac{11,5 \text{ m}}{0,398 \text{ m}} \right)^2 \times (2,19 \cdot 10^{-3} + 2,57 \cdot 10^{-4})} = 1,33\end{aligned}\quad (38)$$

Pour $r = 4,12$, ce qui est supérieur à 1,8, le facteur $C_F = 1,15$ doit être utilisé (voir équation (39) de la CEI 865-1).

Le déplacement horizontal maximal de la portée, b_h , pour $\delta_{m,60} = 180^\circ$, ce qui est supérieur à 90° , est:

$$b_h = C_F C_D b_{c,60} = 1,15 \times 1,33 \times 0,398 \text{ m} = 0,61 \text{ m} \quad (40)$$

La distance minimale dans l'air est:

$$a_{\min} = a - 2b_h = 2 \text{ m} - 2 \times 0,61 \text{ m} = 0,78 \text{ m} \quad (42)$$

7.3 Horizontal span displacement b_h and air clearance $a_{\min}$

All the following quantities are calculated at a conductor temperature of 60 °C which leads to a greater span displacement than a conductor temperature of -20 °C.

The elastic expansion is:

$$\begin{aligned}\epsilon_{\text{ela}} &= N_{60} (F_{t,60} - F_{st,60}) \\ &= 1,10 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{N}} \times (2\,263 \text{ N} - 273 \text{ N}) = 2,19 \cdot 10^{-3}\end{aligned}\quad (36)$$

The thermal expansion is:

$$\begin{aligned}\epsilon_{\text{th}} &= c_{\text{th}} \left(\frac{I_{k3}''}{n A_s} \right)^2 \frac{T_{\text{res},60}}{4} \\ &= 0,27 \cdot 10^{-18} \frac{\text{m}^4}{\text{A}^2 \text{s}} \times \left(\frac{19 \cdot 10^3 \text{ A}}{1 \times 242 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} \right)^2 \times \frac{0,618 \text{ s}}{4} = 2,57 \cdot 10^{-4}\end{aligned}\quad (37)$$

because

$$T_{k1} = 0,3 \text{ s is greater than } \frac{T_{\text{res},60}}{4} = \frac{0,618}{4} = 0,155 \text{ s}$$

and $c_{\text{th}} = 0,27 \cdot 10^{-18} \frac{\text{m}^4}{\text{A}^2 \text{s}}$ for all-aluminium conductors

The factor C_D is:

$$\begin{aligned}C_D &= \sqrt{1 + \frac{3}{8} \left(\frac{l}{b_{c,60}} \right)^2 (\epsilon_{\text{ela}} + \epsilon_{\text{th}})} \\ &= \sqrt{1 + \frac{3}{8} \times \left(\frac{11,5 \text{ m}}{0,398 \text{ m}} \right)^2 \times (2,19 \cdot 10^{-3} + 2,57 \cdot 10^{-4})} = 1,33\end{aligned}\quad (38)$$

For $r = 4,12$, greater than 1,8, the factor $C_F = 1,15$ shall be used (see IEC 865-1, equation (39)).

The maximum horizontal span displacement b_h for $\delta_{m,60} = 180^\circ$ greater than 90° :

$$b_h = C_F C_D b_{c,60} = 1,15 \times 1,33 \times 0,398 \text{ m} = 0,61 \text{ m} \quad (40)$$

The minimum air clearance is:

$$a_{\min} = a - 2b_h = 2 \text{ m} - 2 \times 0,61 \text{ m} = 0,78 \text{ m} \quad (42)$$

7.4 Conclusions

Les supports (supports isolants et infrastructures en acier) doivent supporter une force dynamique de flexion de 3,04 kN correspondant à la force de tension F_f après le court-circuit.

D'après 2.4.1 de la CEI 865-1, les pinces d'ancrage des conducteurs doivent être spécifiées avec des caractéristiques assignées basées sur les valeurs de crête des forces :

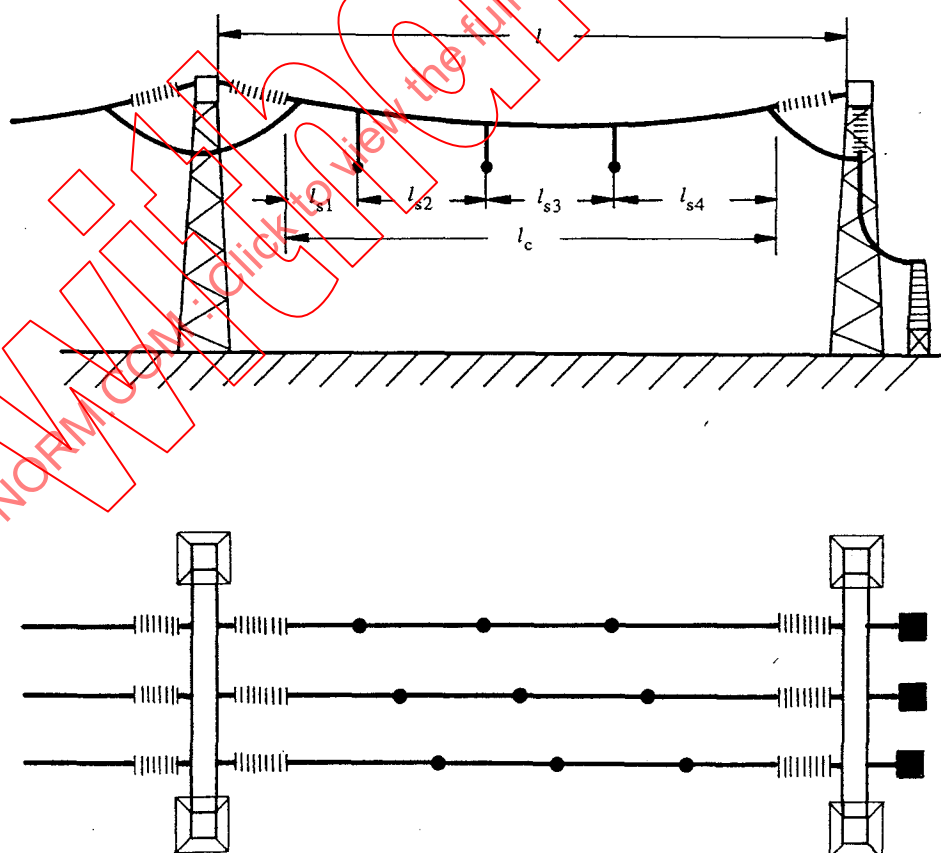
$$\max (1,5 \cdot F_f, 1,0 \cdot F_f) = \max (1,5 \times 2,66 \text{ kN}, 1,0 \times 3,04 \text{ kN}) = \max (3,99 \text{ kN}, 3,04 \text{ kN}) = 3,99 \text{ kN}$$

Le déplacement horizontal de la portée est de 0,61 m et la distance minimale dans l'air est de 0,78 m.

8 Exemple 5 – Effets mécaniques sur des conducteurs tendus

La base de calcul pour le présent exemple est une installation triphasée 380 kV avec des conducteurs tendus en faisceau double, comme indiqué à la figure 5. Dans la portée, il y a trois connexions de sectionneurs pantographes, qui jouent aussi le rôle d'entretoise.

Le calcul est effectué pour deux valeurs différentes de l'entraxe des sous-conducteurs afin de montrer l'influence de la force de pincement.



CEI 339/94

Figure 5 – Installation avec des conducteurs tendus

7.4 Conclusions

The supports (post insulators and steel sub-structures) have to withstand a dynamic bending force of 3,04 kN, given by the tensile force F_t after the short circuit.

From IEC 865-1, 2.4.1, the clamping device for the conductor anchoring shall be specified with a rating based of force peaks

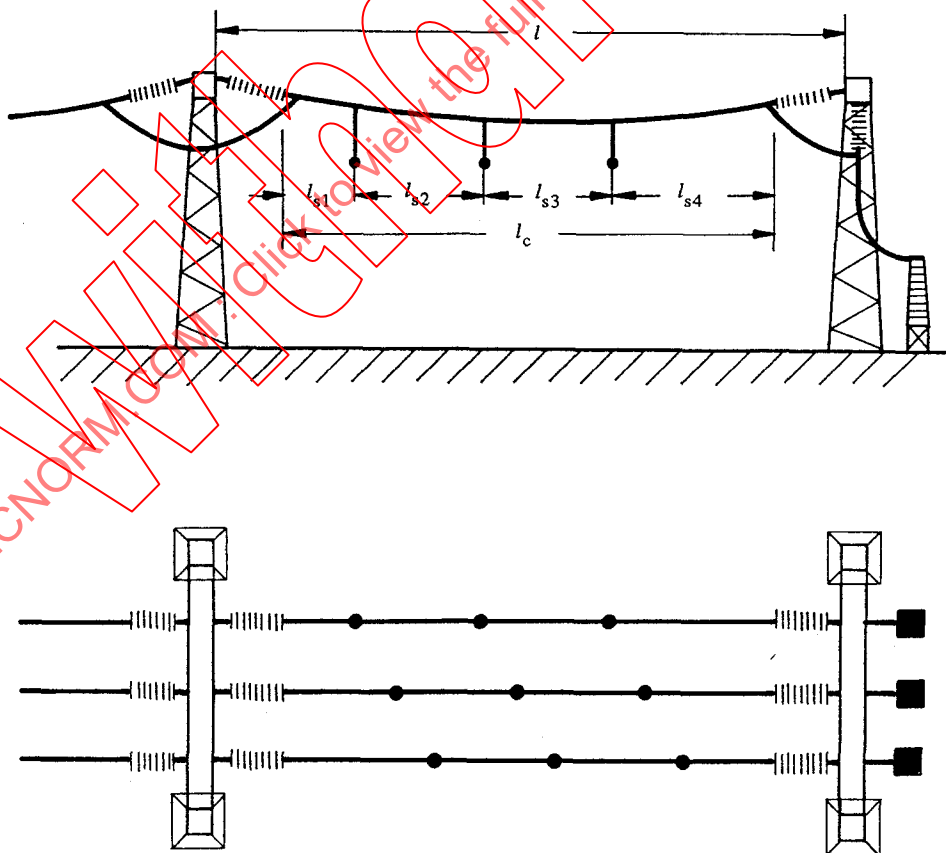
$$\begin{aligned} \max (1,5 \cdot F_t, 1,0 \cdot F_f) &= \max (1,5 \times 2,66 \text{ kN}, 1,0 \times 3,04 \text{ kN}) = \max (3,99 \text{ kN}, 3,04 \text{ kN}) \\ &= 3,99 \text{ kN} \end{aligned}$$

The horizontal span displacement is 0,61 m and the minimum air clearance is 0,78 m.

8 Example 5 – Mechanical effects on strained conductors

The basis for the calculations in this example is a three-phase 380 kV arrangement with strained twin-bundle conductors as shown in figure 5. In the span there are three connections of pantograph-disconnectors, which also operate as spacers.

The calculation is carried out for two different centre-line distances between sub-conductors showing the effect of the pinch force.



IEC 339/94

Figure 5 – Arrangement with strained conductors

8.1 Données communes

Courant de court-circuit triphasé symétrique initial (valeur efficace)	$I''_{k3} = 63 \text{ kA}$
Facteur relatif au calcul de la valeur de crête du courant de court-circuit	$\kappa = 1,81$
Durée du premier passage du courant de court-circuit	$T_{k1} = 0,5 \text{ s}$
Distance entre supports	$l = 48 \text{ m}$
Longueur du conducteur parcouru par le courant de court-circuit	$l_c = 37,4 \text{ m}$
($l_c = l - 2 l_i$, où l_i est la longueur d'une chaîne d'isolateurs)	$l_i = 5,3 \text{ m}$
Entraxe des conducteurs de phase	$a = 5 \text{ m}$
Constante d'élasticité résultante des deux supports d'une portée	$S = 500 \text{ N/mm}$
Conducteur double 2 ACSR 1045/45	
– Nombre de sous-conducteurs	$n = 2$
– Section d'un sous-conducteur	$A_s = 1\,090 \text{ mm}^2$
– Masse d'un sous-conducteur par unité de longueur	$m'_s = 3,25 \text{ kg/m}$
– Module de Young	$E = 60\,000 \text{ N/mm}^2$
– Diamètre d'un sous-conducteur	$d_s = 43 \text{ mm}$
Force de tension statique du conducteur à une température de conducteur de -20°C (température hivernale minimale du lieu)	$F_{st,-20} = 23,1 \text{ kN}$
Force de tension statique du conducteur à une température de conducteur de 60°C	$F_{st,60} = 18,9 \text{ kN}$
Masses additionnelles concentrées représentant les connexions des sectionneurs pantographes	
– Nombre	$n_c = 3$
– Masse d'une connexion	$m_c = 36 \text{ kg}$
– Distances	$l_{s1} = 5,7 \text{ m}$ $l_{s2} = 10,0 \text{ m}$ $l_{s3} = 10,0 \text{ m}$ $l_{s4} = 11,7 \text{ m}$
Valeur conventionnelle de l'accélération de la pesanteur	$g_n = 9,81 \text{ m/s}^2$

8.1 Common data

Three-phase initial symmetrical short-circuit current
(r.m.s.)

$$I''_{k3} = 63 \text{ kA}$$

Factor for calculation of peak short-circuit current

$$\kappa = 1,81$$

Duration of the first short-circuit current flow

$$T_{k1} = 0,5 \text{ s}$$

Distance between supports

$$l = 48 \text{ m}$$

Length of the conductor carrying short-circuit
current

$$l_c = 37,4 \text{ m}$$

($l_c = l - 2 l_i$, where l_i is the length of one insulator chain

$$l_i = 5,3 \text{ m}$$

Centre-line distance between phase conductors

$$a = 5 \text{ m}$$

Resulting spring constant of both supports
of one span

$$S = 500 \text{ N/mm}$$

Twin conductor 2 ACSR 1045/45

– Number of sub-conductors

$$n = 2$$

– Sub-conductor cross-section

$$A_s = 1\,090 \text{ mm}^2$$

– Sub-conductor mass per unit length

$$m'_s = 3,25 \text{ kg/m}$$

– Young's modulus

$$E = 60\,000 \text{ N/mm}^2$$

– Sub-conductor diameter

$$d_s = 43 \text{ mm}$$

Static conductor tensile force at a conductor
temperature of -20°C (local minimum
winter temperature)

$$F_{st,-20} = 23,1 \text{ kN}$$

Static conductor tensile force at a conductor
temperature of 60°C

$$F_{st,60} = 18,9 \text{ kN}$$

Additional concentrated masses representing
the connections of pantograph disconnectors

– Number

$$n_c = 3$$

– Mass of one connection

$$m_c = 36 \text{ kg}$$

– Distances

$$l_{s1} = 5,7 \text{ m}$$

$$l_{s2} = 10,0 \text{ m}$$

$$l_{s3} = 10,0 \text{ m}$$

$$l_{s4} = 11,7 \text{ m}$$

Conventional value of acceleration of gravity

$$g_n = 9,81 \text{ m/s}^2$$

8.2 Entraxe des sous-conducteurs $a_s = 0,1 \text{ m}$

8.2.1 Force électromagnétique et paramètres caractéristiques

La force électromagnétique par unité de longueur est:

$$F' = \frac{\mu_0}{2\pi} 0,75 \frac{(I'_{k3})^2}{a} \frac{l_c}{l} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \times 0,75 \times \frac{(63 \cdot 10^3 \text{ A})^2}{5 \text{ m}} \times \frac{37,4 \text{ m}}{48 \text{ m}} = 92,8 \text{ N/m} \quad (19)$$

Le paramètre r est:

$$r = \frac{F'}{nm'_{sc}g_n} = \frac{92,8 \text{ N/m}}{2 \times 4,69 \text{ kg/m} \times 9,81 \text{ m/s}^2} = 1,009 \quad (20)$$

où m'_{sc} est la masse résultante par unité de longueur du sous-conducteur:

$$m'_{sc} = m'_s + \frac{n_c m_c}{nl_c} = 3,25 \frac{\text{kg}}{\text{m}} + \frac{3 \times 36 \text{ kg}}{2 \times 37,4 \text{ m}} = 4,69 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

La direction de la force résultante est:

$$\delta_1 = \arctan r = \arctan 1,009 = 45,3^\circ \quad (21)$$

Les flèches statiques équivalentes du conducteur en milieu de portée sont:

$$b_{c,-20} = \frac{n m'_{sc} g_n l^2}{8 F_{st,-20}} = \frac{2 \times 4,69 \text{ kg/m} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 48^2 \text{ m}^2}{8 \times 23,1 \cdot 10^3 \text{ N}} = 1,15 \text{ m} \quad (22)$$

$$b_{c,60} = \frac{n m'_{sc} g_n l^2}{8 F_{st,60}} = \frac{2 \times 4,69 \text{ kg/m} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 48^2 \text{ m}^2}{8 \times 18,9 \cdot 10^3 \text{ N}} = 1,40 \text{ m} \quad (22)$$

La période d'oscillation du conducteur sont:

$$T_{-20} = 2\pi \sqrt{0,8 \cdot \frac{b_{c,-20}}{g_n}} = 2\pi \sqrt{0,8 \times \frac{1,15 \text{ m}}{9,81 \text{ m/s}^2}} = 1,92 \text{ s} \quad (23)$$

$$T_{60} = 2\pi \sqrt{0,8 \cdot \frac{b_{c,60}}{g_n}} = 2\pi \sqrt{0,8 \times \frac{1,40 \text{ m}}{9,81 \text{ m/s}^2}} = 2,12 \text{ s} \quad (23)$$

8.2 Centre-line distance between sub-conductors $a_s = 0,1 \text{ m}$

8.2.1 Electromagnetic force and characteristic parameters

The electromagnetic force per unit length is

$$F' = \frac{\mu_0}{2\pi} 0,75 \frac{(I'_{k3})^2}{a} \frac{l_c}{l} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \frac{V_S}{\text{Am}} \times 0,75 \times \frac{(63 \cdot 10^3 \text{ A})^2}{5 \text{ m}} \times \frac{37,4 \text{ m}}{48 \text{ m}} = 92,8 \text{ N/m} \quad (19)$$

The parameter r is:

$$r = \frac{F'}{nm'_{sc}g_n} = \frac{92,8 \text{ N/m}}{2 \times 4,69 \text{ kg/m} \times 9,81 \text{ m/s}^2} = 1,009 \quad (20)$$

where m'_{sc} is the resulting mass per unit length of one sub-conductor:

$$m'_{sc} = m'_s + \frac{n_c m_c}{nl_c} = 3,25 \frac{\text{kg}}{\text{m}} + \frac{3 \times 36 \text{ kg}}{2 \times 37,4 \text{ m}} = 4,69 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

The direction of the resulting force is:

$$\delta_1 = \arctan r = \arctan 1,009 = 45,3^\circ \quad (21)$$

The equivalent static conductor sags at midspan are:

$$b_{c,-20} = \frac{n m'_{sc} g_n l^2}{8 F_{st,-20}} = \frac{2 \times 4,69 \text{ kg/m} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 48^2 \text{ m}^2}{8 \times 23,1 \cdot 10^3 \text{ N}} = 1,15 \text{ m} \quad (22)$$

$$b_{c,60} = \frac{n m'_{sc} g_n l^2}{8 F_{st,60}} = \frac{2 \times 4,69 \text{ kg/m} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 48^2 \text{ m}^2}{8 \times 18,9 \cdot 10^3 \text{ N}} = 1,40 \text{ m} \quad (22)$$

The periods of the conductor oscillation are

$$T_{-20} = 2\pi \sqrt{0,8 \cdot \frac{b_{c,-20}}{g_n}} = 2\pi \sqrt{0,8 \times \frac{1,15 \text{ m}}{9,81 \text{ m/s}^2}} = 1,92 \text{ s} \quad (23)$$

$$T_{60} = 2\pi \sqrt{0,8 \cdot \frac{b_{c,60}}{g_n}} = 2\pi \sqrt{0,8 \times \frac{1,40 \text{ m}}{9,81 \text{ m/s}^2}} = 2,12 \text{ s} \quad (23)$$

Les périodes résultantes d'oscillation sont:

$$T_{\text{res},-20} = \frac{T_{-20}}{\sqrt[4]{1+r^2} \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \left(\frac{\delta_1}{90^\circ} \right)^2 \right]} \quad (24)$$

$$= \frac{1,92 \text{ s}}{\sqrt[4]{1+1,009^2} \times \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \times \left(\frac{45,3^\circ}{90^\circ} \right)^2 \right]} = 1,68 \text{ s}$$

$$T_{\text{res},60} = \frac{T_{60}}{\sqrt[4]{1+r^2} \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \left(\frac{\delta_1}{90^\circ} \right)^2 \right]} \quad (24)$$

$$= \frac{2,12 \text{ s}}{\sqrt[4]{1+1,009^2} \times \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \times \left(\frac{45,3^\circ}{90^\circ} \right)^2 \right]} = 1,85 \text{ s}$$

Les normes de rigidité sont:

$$N_{-20} = \frac{1}{Sl} + \frac{1}{n E_{s,-20} A_s} \quad (25)$$

$$= \frac{1}{5 \cdot 10^5 \text{ N/m} \times 48 \text{ m}} + \frac{1}{2 \times 3,17 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2 \times 1\,090 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 5,61 \cdot 10^{-8} \frac{1}{\text{N}}$$

avec

$$E_{s,-20} = E \left[0,3 + 0,7 \cdot \sin \left(\frac{F_{\text{st},-20}}{n A_s \sigma_{\text{fin}}} \cdot 90^\circ \right) \right] \quad (26)$$

$$= 6 \cdot 10^{10} \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \times \left[0,3 + 0,7 \times \sin \left(\frac{10,6 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2}{5 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2} \times 90^\circ \right) \right] = 3,17 \cdot 10^{10} \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

parce que

$$\frac{F_{\text{st},-20}}{n A_s} = \frac{23,1 \cdot 10^3 \text{ N}}{2 \times 1\,090 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 10,6 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \text{ inférieur à } \sigma_{\text{fin}} = 5 \cdot 10^7 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad (27)$$

The resulting periods of oscillation are:

$$T_{\text{res},-20} = \frac{T_{-20}}{\sqrt[4]{1+r^2} \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \left(\frac{\delta_1}{90^\circ} \right)^2 \right]} \quad (24)$$

$$= \frac{1,92 \text{ s}}{\sqrt[4]{1+1,009^2} \times \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \times \left(\frac{45,3^\circ}{90^\circ} \right)^2 \right]} = 1,68 \text{ s}$$

$$T_{\text{res},60} = \frac{T_{60}}{\sqrt[4]{1+r^2} \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \left(\frac{\delta_1}{90^\circ} \right)^2 \right]} \quad (24)$$

$$= \frac{2,12 \text{ s}}{\sqrt[4]{1+1,009^2} \times \left[1 - \frac{\pi^2}{64} \times \left(\frac{45,3^\circ}{90^\circ} \right)^2 \right]} = 1,85 \text{ s}$$

The stiffness norms are:

$$N_{-20} = \frac{1}{Sl} + \frac{1}{n E_{s,-20} A_s} \quad (25)$$

$$= \frac{1}{5 \cdot 10^5 \text{ N/m} \times 48 \text{ m}} + \frac{1}{2 \times 3,17 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2 \times 1\,090 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 5,61 \cdot 10^{-8} \frac{1}{\text{N}}$$

with

$$E_{s,-20} = E \left[0,3 + 0,7 \cdot \sin \left(\frac{F_{\text{st},-20}}{n A_s \sigma_{\text{fin}}} \cdot 90^\circ \right) \right] \quad (26)$$

$$= 6 \cdot 10^{10} \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \times \left[0,3 + 0,7 \times \sin \left(\frac{10,6 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2}{5 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2} \times 90^\circ \right) \right] = 3,17 \cdot 10^{10} \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

because

$$\frac{F_{\text{st},-20}}{n A_s} = \frac{23,1 \cdot 10^3 \text{ N}}{2 \times 1\,090 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 10,6 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad \text{less than} \quad \sigma_{\text{fin}} = 5 \cdot 10^7 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad (27)$$

$$N_{60} = \frac{1}{SI} + \frac{1}{n E_{s,60} A_s} \quad (25)$$

$$= \frac{1}{5 \cdot 10^5 \text{ N/m} \times 48 \text{ m}} + \frac{1}{2 \times 2,93 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2 \times 1\,090 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 5,73 \cdot 10^{-8} \frac{1}{\text{N}}$$

avec

$$E_{s,60} = E \left[0,3 + 0,7 \cdot \sin \left(\frac{F_{st,60}}{n A_s \sigma_{fin}} \cdot 90^\circ \right) \right] \quad (26)$$

$$= 6 \cdot 10^{10} \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \times \left[0,3 + 0,7 \times \sin \left(\frac{8,67 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2}{5 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2} \times 90^\circ \right) \right] = 2,93 \cdot 10^{10} \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

parce que

$$\frac{F_{st,60}}{n A_s} = \frac{18,9 \cdot 10^3 \text{ N}}{2 \times 1\,090 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 8,67 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \text{ inférieur à } \sigma_{fin} = 5 \cdot 10^7 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad (27)$$

Les facteurs de contrainte sont:

$$\zeta_{-20} = \frac{(nm'_{sc} g_n l)^2}{24 F_{st,-20}^3 N_{-20}} = \frac{(2 \times 4,69 \text{ kg/m} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 48 \text{ m})^2}{24 \times (23,1 \cdot 10^3 \text{ N})^3 \times 5,61 \cdot 10^{-8} \text{ 1/N}} = 1,176 \quad (28)$$

$$\zeta_{60} = \frac{(nm'_{sc} g_n l)^2}{24 F_{st,60}^3 N_{60}} = \frac{(2 \times 4,69 \text{ kg/m} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 48 \text{ m})^2}{24 \times (18,9 \cdot 10^3 \text{ N})^3 \times 5,73 \cdot 10^{-8} \text{ 1/N}} = 2,101 \quad (28)$$

Les angles d'oscillation de la portée sont:

$$\delta_{k,-20} = \delta_1 \left[1 - \cos \left(360^\circ \cdot \frac{T_{k1}}{T_{res,-20}} \right) \right] = 45,3^\circ \left[1 - \cos \left(360^\circ \times \frac{0,5 \text{ s}}{1,68 \text{ s}} \right) \right] = 58,7^\circ \quad (29)$$

parce que

$$\frac{T_{k1}}{T_{res,-20}} = \frac{0,5 \text{ s}}{1,68 \text{ s}} = 0,30 \text{ qui est inférieur à } 0,5;$$

$$\delta_{k,60} = \delta_1 \left[1 - \cos \left(360^\circ \cdot \frac{T_{k1}}{T_{res,60}} \right) \right] = 45,3^\circ \left[1 - \cos \left(360^\circ \times \frac{0,5 \text{ s}}{1,85 \text{ s}} \right) \right] = 51,1^\circ \quad (29)$$

parce que

$$\frac{T_{k1}}{T_{res,60}} = \frac{0,5 \text{ s}}{1,85 \text{ s}} = 0,27 \text{ qui est inférieur à } 0,5$$

$$N_{60} = \frac{1}{Sl} + \frac{1}{n E_{s,60} A_s} \quad (25)$$

$$= \frac{1}{5 \cdot 10^5 \text{ N/m} \times 48 \text{ m}} + \frac{1}{2 \times 2,93 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2 \times 1\,090 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 5,73 \cdot 10^{-8} \frac{1}{\text{N}}$$

with

$$E_{s,60} = E \left[0,3 + 0,7 \cdot \sin \left(\frac{F_{st,60}}{n A_s \sigma_{fin}} \cdot 90^\circ \right) \right] \quad (26)$$

$$= 6 \cdot 10^{10} \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \times \left[0,3 + 0,7 \times \sin \left(\frac{8,67 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2}{5 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2} \times 90^\circ \right) \right] = 2,93 \cdot 10^{10} \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

because

$$\frac{F_{st,60}}{n A_s} = \frac{18,9 \cdot 10^3 \text{ N}}{2 \times 1\,090 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2} = 8,67 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \text{ less than } \sigma_{fin} = 5 \cdot 10^7 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad (27)$$

The stress factors are

$$\zeta_{-20} = \frac{(nm'_{sc} g_n l)^2}{24 F_{st,-20}^3 N_{-20}} = \frac{(2 \times 4,69 \text{ kg/m} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 48 \text{ m})^2}{24 \times (23,1 \cdot 10^3 \text{ N})^3 \times 5,61 \cdot 10^{-8} \text{ 1/N}} = 1,176 \quad (28)$$

$$\zeta_{60} = \frac{(nm'_{sc} g_n l)^2}{24 F_{st,60}^3 N_{60}} = \frac{(2 \times 4,69 \text{ kg/m} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 48 \text{ m})^2}{24 \times (18,9 \cdot 10^3 \text{ N})^3 \times 5,73 \cdot 10^{-8} \text{ 1/N}} = 2,101 \quad (28)$$

The span swing-out angles are

$$\delta_{k,-20} = \delta_1 \left[1 - \cos \left(360^\circ \cdot \frac{T_{k1}}{T_{res,-20}} \right) \right] = 45,3^\circ \left[1 - \cos \left(360^\circ \times \frac{0,5 \text{ s}}{1,68 \text{ s}} \right) \right] = 58,7^\circ \quad (29)$$

because

$$\frac{T_{k1}}{T_{res,-20}} = \frac{0,5 \text{ s}}{1,68 \text{ s}} = 0,30 \text{ less than } 0,5$$

$$\delta_{k,60} = \delta_1 \left[1 - \cos \left(360^\circ \cdot \frac{T_{k1}}{T_{res,60}} \right) \right] = 45,3^\circ \left[1 - \cos \left(360^\circ \times \frac{0,5 \text{ s}}{1,85 \text{ s}} \right) \right] = 51,1^\circ \quad (29)$$

because

$$\frac{T_{k1}}{T_{res,60}} = \frac{0,5 \text{ s}}{1,85 \text{ s}} = 0,27 \text{ less than } 0,5$$