

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

61660-1

Première édition
First edition
1997-06

**Courants de court-circuit dans les installations
auxiliaires alimentées en courant continu
dans les centrales et les postes –**

**Partie 1:
Calcul des courants de court-circuit**

**Short-circuit currents in d.c. auxiliary installations
in power plants and substations –**

**Part 1:
Calculation of short-circuit currents**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 61660-1: 1997

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 60050: *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 60027: *Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique*;
- la CEI 60417: *Symboles graphiques utilisables sur le matériel. Index, relevé et compilation des feuilles individuelles*;
- la CEI 60617: *Symboles graphiques pour schémas*;

et pour les appareils électromédicaux,

- la CEI 60878: *Symboles graphiques pour équipements électriques en pratique médicale*.

Les symboles et signes contenus dans la présente publication ont été soit tirés de la CEI 60027, de la CEI 60417, de la CEI 60617 et/ou de la CEI 60878, 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 60050: *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 60027: *Letter symbols to be used in electrical technology*;
- IEC 60417: *Graphical symbols for use on equipment. Index, survey and compilation of the single sheets*;
- IEC 60617: *Graphical symbols for diagrams*;

and for medical electrical equipment,

- IEC 60878: *Graphical symbols for electromedical equipment in medical practice*.

The symbols and signs contained in the present publication have either been taken from IEC 60027, IEC 60417, IEC 60617 and/or IEC 60878, or have been specifically approved for the purpose of this publication.

IEC publications prepared by the same technical committee

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

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

61660-1

Première édition
First edition
1997-06

**Courants de court-circuit dans les installations
auxiliaires alimentées en courant continu
dans les centrales et les postes –**

**Partie 1:
Calcul des courants de court-circuit**

**Short-circuit currents in d.c. auxiliary installations
in power plants and substations –**

**Part 1:
Calculation of short-circuit currents**

© IEC 1997 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

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

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

International Electrotechnical Commission
Telefax: +41 22 919 0300

3, rue de Varembe Geneva, Switzerland
e-mail: inmail@iec.ch IEC web site <http://www.iec.ch>



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

V

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

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	4
Articles	
1 Généralités	6
1.1 Domaine d'application et objet	6
1.2 Références normatives	6
1.3 Définitions	8
1.4 Symboles et indices	10
2 Calcul des courants de court-circuit	14
2.1 Généralités	14
2.2 Méthodes de calcul	19
2.3 Résistance et inductance du conducteur	24
2.4 Redresseur	26
2.5 Batterie	35
2.6 Condensateur	40
2.7 Moteur à courant continu à excitation indépendante	48
3 Calcul du courant de court-circuit total	58
3.1 Facteur de correction	58
3.2 Superposition des courants de court-circuit partiels au point de défaut	60
3.3 Fonction d'approximation normale	62
Annexe A – Equations pour le calcul de λ_D , κ_D , κ_C et t_{pC}	66

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
Clause	
1 General	7
1.1 Scope and object	7
1.2 Normative references	7
1.3 Definitions	9
1.4 Symbols and subscripts	11
2 Calculation of short-circuit currents	15
2.1 General	15
2.2 Calculating methods	21
2.3 Resistance and inductance of conductor	25
2.4 Rectifier	27
2.5 Battery	37
2.6 Capacitor	41
2.7 DC motor with independent excitation	49
3 Calculation of the total short-circuit current	59
3.1 Correction factor	59
3.2 Superimposing the partial short-circuit currents at the short-circuit location	61
3.3 Standard approximation function	63
Annex A – Equations for the calculation of λ_D , κ_D , κ_C and t_{pC}	67

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

COURANTS DE COURT-CIRCUIT DANS LES INSTALLATIONS AUXILIAIRES ALIMENTÉES EN COURANT CONTINU DANS LES CENTRALES ET LES POSTES –

Partie 1: Calcul des courants de court-circuit

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 concernant les questions techniques, représentent, dans la mesure du possible un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les documents produits se présentent sous la forme de recommandations internationales. Ils sont publiés comme normes, rapports techniques ou guides et agréés comme tels 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.
- 5) La CEI n'a fixé aucune procédure concernant le marquage comme indication d'approbation et sa responsabilité n'est pas engagée quand un matériel est déclaré conforme à l'une de ses normes.
- 6) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Norme internationale peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 61660-1 a été établie par le comité d'études 73 de la CEI: Courants de court-circuit.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
73/84/FDIS	73/97/RVD

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

L'annexe A est donnée uniquement à titre d'information.

La CEI 61660 comprend les parties suivantes, présentées sous le titre général: *Courants de court-circuit dans les installations auxiliaires alimentées en courant continu dans les centrales et les postes*:

- Partie 1: 1997, *Calcul des courants de court-circuit*
- Partie 2: 1997, *Calcul des effets*
- Partie 3: 199X, *Exemples de calcul* (en préparation).

Le contenu des corrigenda de février 1999 et mars 2000 a été pris en considération dans cet exemplaire.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**SHORT-CIRCUIT CURRENTS IN DC AUXILIARY INSTALLATIONS
IN POWER PLANTS AND SUBSTATIONS –****Part 1: Calculation of short-circuit currents**

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 co-operation 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 express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested National Committees.
- 3) The documents produced have the form of recommendations for international use and are 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.
- 5) The IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with one of its standards.
- 6) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this International Standard may be the subject of patent rights. The IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard 61660-1 has been prepared by IEC technical committee 73: Short-circuit currents.

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

FDIS	Report on voting
73/84/FDIS	73/97/RVD

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

Annex A is for information only.

IEC 61660 consists of the following parts, under the general title: *Short-circuit currents in d.c. auxiliary installations in power plants and substations*:

- Part 1: 1997, *Calculation of short-circuit currents*
- Part 2: 1997, *Calculation of effects*
- Part 3: 199X, *Examples of calculations* (in preparation).

The contents of the corrigenda of February 1999 and March 2000 have been included in this copy.

COURANTS DE COURT-CIRCUIT DANS LES INSTALLATIONS AUXILIAIRES ALIMENTÉES EN COURANT CONTINU DANS LES CENTRALES ET LES POSTES –

Partie 1: Calcul des courants de court-circuit

1 Généralités

1.1 *Domaine d'application et objet*

La présente partie de la CEI 61660 décrit une méthode de calcul des courants de court-circuit des réseaux auxiliaires en courant continu dans des centrales et des postes. Ces réseaux peuvent être équipés des éléments suivants, agissant comme sources de courants de court-circuit:

- redresseurs dans des ponts triphasés en courant alternatif pour 50 Hz;
- batteries stationnaires au plomb;
- condensateurs de lissage;
- moteurs à courant continu avec excitation indépendante.

NOTE – Les redresseurs dans des ponts triphasés en courant alternatif pour 60 Hz sont à l'étude. Les informations concernant d'autres matériels peuvent être données par le constructeur.

La présente norme prend en compte seulement les redresseurs dans des ponts triphasés en courant alternatif. Elle ne concerne pas les autres types de redresseurs.

L'objet de cette norme est de fournir une méthode générale de calcul donnant des résultats suffisamment précis et par excès. Des méthodes spéciales adaptées à des circonstances particulières peuvent être utilisées si elles donnent au moins la même précision. Les courants de court-circuit, les résistances et les inductances peuvent être vérifiés à partir de réseaux d'essai ou des mesures sur des réseaux modèles. Dans les réseaux existants en courant continu, les valeurs indispensables peuvent être vérifiées d'après des mesures prises au point de court-circuit présumé. Le courant de charge n'est pas pris en considération pour le calcul du courant de court-circuit. Il est nécessaire de faire la distinction entre deux différentes valeurs de courant de court-circuit:

- le courant de court-circuit maximal, qui détermine les caractéristiques assignées du matériel électrique;
- le courant de court-circuit minimal, qui peut être pris comme base pour l'installation et les caractéristiques des fusibles et des protections.

1.2 *Références normatives*

Les documents normatifs suivants contiennent des dispositions qui, par suite de la référence qui y est faite, constituent des dispositions valables pour la présente partie de la CEI 61660. Au moment de la publication, les éditions indiquées étaient en vigueur. Tout document normatif est sujet à révision et les parties prenantes aux accords fondés sur la présente partie de la CEI 61660 sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des documents normatifs indiqués ci-après. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des Normes internationales en vigueur.

CEI 60038: 1983, *Tensions normales de la CEI*

SHORT-CIRCUIT CURRENTS IN DC AUXILIARY INSTALLATIONS IN POWER PLANTS AND SUBSTATIONS –

Part 1: Calculation of short-circuit currents

1 General

1.1 Scope and object

This part of IEC 61660 describes a method for calculating short-circuit currents in d.c. auxiliary systems in power plants and substations. Such systems can be equipped with the following equipment, acting as short-circuit current sources:

- rectifiers in three-phase a.c. bridge connection for 50 Hz;
- stationary lead-acid batteries;
- smoothing capacitors;
- d.c. motors with independent excitation.

NOTE – Rectifiers in three-phase a.c. bridge connection for 60 Hz are under consideration. The data of other equipment may be given by the manufacturer.

This standard is only concerned with rectifiers in three-phase a.c. bridge connection. It is not concerned with other types of rectifiers.

The purpose of the standard is to provide a generally applicable method of calculation which produces results of sufficient accuracy on the conservative side. Special methods, adjusted to particular circumstances, may be used if they give at least the same precision. Short-circuit currents, resistances and inductances may also be ascertained from system tests or measurements on model systems. In existing d.c. systems the necessary values can be ascertained from measurements taken at the assumed short-circuit location. The load current is not taken into consideration when calculating the short-circuit current. It is necessary to distinguish between two different values of short-circuit current:

- the maximum short-circuit current which determines the rating of the electrical equipment;
- the minimum short-circuit current which can be taken as the basis for fuse and protection ratings and settings.

1.2 Normative references

The following normative documents contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this part of IEC 61660. At the time of publication, the edition indicated was valid. All normative documents are subject to revision, and parties to agreements based on this part of IEC 61660 are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent editions of the normative documents indicated below. Members of IEC and ISO maintain registers of currently valid International Standards.

IEC 60038: 1983, *IEC standard voltages*

CEI 60050(151): 1978, *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) – Chapitre 151: Dispositifs électriques et magnétiques*

CEI 60050 (441): 1984, *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) – Chapitre 441: Appareillage et fusibles*

CEI 60896-1: 1987, *Batteries stationnaires au plomb – Prescriptions générales et méthodes d'essai – Partie 1: Batteries au plomb du type ouvert.*

Modification 1 (1988).

Amendement 2 (1990)

CEI 60909: 1988, *Calcul des courants de court-circuit dans les réseaux triphasés à courant alternatif*

CEI 61660-2: 1997, *Calculs des courants de court-circuit dans les installations auxiliaires alimentées en courant continu dans les centrales et les postes – Partie 2: Calcul des effets*

1.3 Définitions

Pour les besoins de la présente partie de la CEI 61160, les définitions suivantes sont applicables.

1.3.1 court-circuit: Connexion accidentelle ou intentionnelle, par une résistance ou une impédance relativement faible de deux ou plusieurs points d'un circuit se trouvant normalement à des tensions différentes. [VEI 151-03-41]

NOTE – Dans cette norme le branchement est supposé avoir une impédance égale à zéro.

1.3.2 courant de court-circuit: Surintensité résultant d'un court-circuit dû à un défaut ou un branchement incorrect dans un circuit électrique. [VEI 441-11-07]

NOTE – Il y a lieu de distinguer entre le courant de court-circuit au point de défaut et le courant de court-circuit circulant dans les branches du réseau.

1.3.3 courant de court-circuit partiel: Courant de court-circuit au point de défaut alimenté par une source, les autres sources étant débranchées.

1.3.4 branche commune: Branche de réseau avec plusieurs courants de court-circuit partiels provenant de différentes sources.

1.3.5 courant de court-circuit symétrique initial I_k'' : Valeur efficace de la composante symétrique alternative d'un courant de court-circuit présumé à l'instant d'apparition du court-circuit, si l'impédance conserve sa valeur initiale.

1.3.6 courant de crête de court-circuit i_p : Valeur maximale instantanée du courant de court-circuit présumé, côté courant continu (figures 1 et 2).

1.3.7 courant de court-circuit quasi permanent I_k : Valeur du courant de court-circuit côté courant continu 1 s après le début du court-circuit.

1.3.8 temps pour atteindre la crête t_p : Temps entre le début du court-circuit et la valeur crête du courant de court-circuit (figures 1 et 2).

1.3.9 durée du court-circuit T_k : Temps entre le début du court-circuit et la coupure du courant continu de court-circuit.

1.3.10 tension nominale du réseau U_n : Tension (entre phases) désignant un réseau alternatif triphasé et à laquelle certaines caractéristiques de fonctionnement font référence. Les valeurs sont données dans la CEI 60038.

IEC 60050(151): 1978, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 151: Electrical and magnetic devices*

IEC 60050(441): 1984, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 441: Switchgear, controlgear and fuses*

IEC 60896-1: 1987, *Stationary lead-acid batteries – General requirements and methods of test – Part 1: Vented types*

Amendment 1 (1988)

Amendment 2 (1990)

IEC 60909: 1988, *Short-circuit current calculation in three-phase a.c. systems*

IEC 61660-2: 1997, *Short-circuit currents in d.c. auxiliary installations in power plants and substations – Part 2: Calculation of effects*

1.3 Définitions

For the purpose of this part of IEC 61660, the following definitions apply.

1.3.1 short circuit: The accidental or intentional connection, by a relatively low resistance or impedance, of two or more points in a circuit which are normally at different voltages. [IEV 151-03-41]

NOTE – In this standard the connection is assumed to have zero impedance.

1.3.2 short-circuit current: An over-current resulting from a short circuit due to a fault or an incorrect connection in an electric circuit. [IEV 441-11-07]

NOTE – It is necessary to distinguish between the short-circuit current at the short-circuit location and in the network branches.

1.3.3 partial short-circuit current: The short-circuit current at the short-circuit location being fed from one source with all other sources disconnected.

1.3.4 common branch: A network branch with several partial short-circuit currents from different sources.

1.3.5 initial symmetrical short-circuit current I_k'' : The r.m.s. value of the a.c. symmetrical component of a prospective short-circuit current applicable at the instant of short circuit if the impedance remains at zero time value.

1.3.6 peak short-circuit current i_p : The maximum possible instantaneous value of the prospective short-circuit current at the d.c. side (figures 1 and 2).

1.3.7 quasi steady-state short-circuit current I_k : The value of the short-circuit current at the d.c. side 1 s after the beginning of the short circuit.

1.3.8 time to peak t_p : The interval between the initiation of the short circuit and the peak value of the short-circuit current (figures 1 and 2).

1.3.9 short-circuit duration T_k : The time interval between the initiation of the short circuit and the breaking of the d.c. short-circuit current.

1.3.10 nominal system voltage U_n : Voltage (line-to-line) by which a three-phase a.c. system is designated and to which certain operating characteristics are referred. Values are given in IEC 60038.

1.3.11 tension nominale U_{nB} d'une batterie au plomb: La tension nominale d'une batterie au plomb est donnée par le constructeur. Si la valeur est inconnue, la tension nominale d'un élément de 2,0 V multipliée par le nombre d'éléments en série, peut être utilisée.

1.3.12 batterie stationnaire: Batterie conçue pour une utilisation à poste fixe et qui est en permanence raccordée à la charge et au circuit de charge associée à la batterie (voir CEI 60896-1).

1.3.13 tension finale d'une batterie (tension à la fin de la décharge): Tension minimale admise après un temps spécifié de décharge.

1.4 Symboles et indices

Toutes les équations sont écrites sans spécifier les unités. Les symboles représentent des quantités ayant à la fois des valeurs numériques et des dimensions qui sont indépendantes des unités pourvu qu'un système cohérent d'unités soit choisi, par exemple le système international des unités (SI).

1.4.1 Symboles

A	Section de conducteur
a	Entraxe entre conducteurs
d	Épaisseur de conducteur rectangulaire
C	Capacité
c	Facteur de tension selon la CEI 60909
$cU_n/\sqrt{3}$	Source de tension équivalente selon la CEI 60909
E_B	Tension en circuit ouvert d'une batterie
f	Fréquence de réseau
b	Hauteur de conducteur rectangulaire
I_k''	Courant de court-circuit symétrique initial triphasé
I_k	Courant de court-circuit quasi permanent
I_r	Courant assigné
i	Valeur instantanée du courant
i_1, i_2	Sections de la fonction d'approximation normale
i_{Br}	Courant de court-circuit dans une branche
i_p	Courant de court-circuit de crête
i_{cor}	Courant corrigé
J	Moment d'inertie de l'ensemble de la partie rotative
k_{1C}, k_{2C}	Facteurs pour le calcul des constantes du temps de croissance et du temps de décroissance du courant capacitif
k_{1M}	Facteur pour le calcul du temps pour atteindre la crête du courant du moteur
k_{2M}, k_{3M}	Facteurs pour le calcul des constantes de temps de croissance du courant du moteur
k_{4M}	Facteur pour le calcul des constantes de temps de décroissance du courant du moteur
L, L'	Inductance/Inductance par unité
L_F	Inductance saturée équivalente du circuit de charge en cas de court-circuit

1.3.11 nominal voltage U_{nB} of a lead-acid battery: The nominal voltage of a lead-acid battery is given by the manufacturer. If the value is unknown, then the nominal voltage of one cell 2,0 V multiplied by the number of cells in series may be used.

1.3.12 stationary battery: A battery designed for service in a fixed location and which is permanently connected to the load and to the associated battery charging circuit (see IEC 60896-1).

1.3.13 final voltage of a battery (end-of-discharge voltage): The minimum permissible voltage after a specified discharge time.

1.4 Symbols and subscripts

All equations are written without specifying units. The symbols represent quantities possessing both numerical values and dimensions that are independent of units, provided a coherent unit system is chosen, for example the International System of Units (SI).

1.4.1 Symbols

A	Conductor cross-section
a	Centre-line distance between conductors
d	Thickness of rectangular conductor
C	Capacitance
c	Voltage factor according to IEC 60909
$cU_n/\sqrt{3}$	Equivalent voltage source according to IEC 60909
E_B	Open-circuit voltage of a battery
f	System frequency
b	Height of rectangular conductor
I_k''	Three-phase initial symmetrical short-circuit current
I_k	Quasi steady-state short-circuit current
I_r	Rated current
i	Instantaneous value of current
i_1, i_2	Sections of the standard approximation function
i_{Br}	Short-circuit current in a branch
i_p	Peak short-circuit current
i_{cor}	Corrected current
J	Moment of inertia of the whole rotating part
k_{1C}, k_{2C}	Factors for calculating the rise-time and decay-time constant of the capacitor current
k_{1M}	Factor for calculating the time to peak of the motor current
k_{2M}, k_{3M}	Factors for calculating the rise-time constant of the motor current
k_{4M}	Factor for calculating the decay-time constant of the motor current
L, L'	Inductance, inductance per unit length
L_F	Equivalent saturated inductance of the field circuit at short circuit

L_{OF}	Inductance non saturée équivalente du circuit de charge à charge nulle
l	Longueur
M_r	Couple assigné d'un moteur
n, n_0, n_n	Vitesse de moteur/vitesse de moteur à charge nulle/vitesse nominale de moteur
p	Rapport I_k/I_p
R, R'	Résistance/résistance par unité
R_{joint}	Résistance de jonction
r	Rayon du conducteur
T_k	Durée du court-circuit
t	Temps
t_p	Temps jusqu'à la crête
U	Tension au point de court-circuit avant le court-circuit
U_n	Tension normale de réseau triphasé à courant alternatif, entre-phase (valeur efficace)
U_{nB}	Tension nominale d'une batterie
X	Réactance
Z_N	Impédance du réseau triphasé à courant alternatif
δ	Coefficient de décroissance
κ	Facteur pour le calcul du courant de court-circuit de crête
λ_d	Facteur pour le calcul du courant de court-circuit quasi permanent du redresseur
μ_0	Perméabilité absolue du vide, $\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7}$ H/m
ρ	Résistivité
σ	Facteur de correction pour le courant de court-circuit partiel
τ_M	Constante de temps de l'armature du moteur
τ_F	Constante de temps du circuit de champ du moteur
τ_{mec}	Constante de temps mécanique du moteur
τ_1, τ_2	Constante de temps de croissance/de décroissance de la fonction d'approximation normale
ω_0, ω_d	Fréquence angulaire propre sans/avec amortissement

1.4.2 Indices

a.c.	Courant alternatif
B	Batterie
Br	Branche côté courant continu
C	Condensateur
cor	Corrigé
D	Redresseur
d.c.	Courant continu
F	Point du court-circuit
F	Circuit de champ du moteur

L_{OF}	Equivalent unsaturated inductance of the field circuit at no-load
l	Length
M_r	Rated torque of the motor
n, n_0, n_n	Motor speed, no-load motor speed, nominal motor speed
ρ	Ratio I_k/i_p
R, R'	Resistance, resistance per unit length
R_{joint}	Joint resistance
r	Radius of the conductor
T_k	Short-circuit duration
t	Time
t_p	Time to peak
U	Voltage at the short-circuit location before short circuit
U_n	Nominal system voltage of the three-phase a.c. system, line-to-line (r.m.s.)
U_{nB}	Nominal voltage of a battery
X	Reactance
Z_N	Impedance of the three-phase a.c. network
δ	Decay coefficient
κ	Factor for calculating the peak short-circuit current
λ_D	Factor for calculating the quasi steady-state short-circuit current of the rectifier
μ_0	Absolute permeability of vacuum, $\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7}$ H/m
ρ	Resistivity
σ	Correction factor for the partial short-circuit current
τ_M	Armature time constant of the motor
τ_F	Field circuit time constant of the motor
τ_{mec}	Mechanical time constant of the motor
τ_1, τ_2	Rise-time, decay-time constants of the standard approximation function
ω_0, ω_d	Undamped, damped natural angular frequency

1.4.2 Subscripts

a.c.	Alternating current
B	Battery
Br	Branch on the d.c. side
C	Capacitor
cor	Corrected
D	Rectifier
d.c.	Direct current
F	Short-circuit location
F	Field circuit of the motor

HV, LV	Haute tension, basse tension
i	Interne
j,m	Numéro de la source de tension
k	Court-circuit
L	Ligne
M	Moteur
max, min	Maximal/minimal
mec	mécanique
N	Réseau triphasé à courant alternatif
n	Nominal
p	Crête
P	Câble de puissance
Q	Entrée du réseau selon CEI 60909
R	Réactance de commutation
r	Assigné
res	Résiduel
S	Réactance de lissage
T	Transformateur
Y	Branche commune
O	Charge nulle/sans amortissement

2 Calcul des courants de court-circuit

2.1 Généralités

Un calcul complet des courants de court-circuit fournit les variations en fonction du temps des courants au point de défaut, depuis le début du court-circuit jusqu'à sa fin; étant donné les variations nombreuses du courant et la non-linéarité du matériel, ces calculs ne peuvent être effectués que par des moyens numériques. Le coût en est très élevé, en particulier du fait qu'il n'y a pas de méthodes universelles de calcul. Pour cette raison, seul le calcul des grandeurs caractéristiques est traité.

La figure 1 montre les courants de court-circuit typiques de plusieurs sources. Le courant de court-circuit total au point de défaut peut être produit par plusieurs sources différentes.

La figure 2 montre la fonction d'approximation normale couvrant les différentes variations de courant. La fonction est décrite par les équations (1) à (3).

$$i_1(t) = i_p \frac{1 - e^{-t/\tau_1}}{1 - e^{-t_p/\tau_1}} \quad 0 \leq t \leq t_p \quad (1)$$

$$i_2(t) = i_p \left((1 - p) e^{-(t-t_p)/\tau_2} + p \right) \quad t_p \leq t \quad (2)$$

HV, LV	High voltage, low voltage
i	Internal
j, m	Numeral/number of the voltage source
k	Short circuit
L	Line
M	Motor
max, min	Maximum, minimum
mec	Mechanical
N	Three-phase a.c. network
n	Nominal
p	Peak
P	Power cable
Q	Feeder connection point according to IEC 60909
R	Commutation reactor
r	Rated
res	Residual
S	Smoothing reactor
T	Transformer
Y	Common branch
O	No load/undamped

2 Calculation of short-circuit currents

2.1 General

A complete calculation of the short-circuit currents provides details of the time variation of the currents at the short-circuit location, from the initiation of the short circuit to its end. Due to many variations of current and the non-linearity of equipment, such calculations can only be performed by numerical means. The expense is very high, especially since there are no universal methods of calculation. For this reason only calculation of characteristic quantities is dealt with.

Figure 1 shows the typical short-circuit currents of various sources. The total short-circuit current at the short-circuit location may be produced by the action of several different sources.

Figure 2 shows the standard approximation function which covers the different current variations. The function is described by equations (1) to (3).

$$i_1(t) = i_p \frac{1 - e^{-t/\tau_1}}{1 - e^{-t_p/\tau_1}} \quad 0 \leq t \leq t_p \quad (1)$$

$$i_2(t) = i_p \left((1-p) e^{-(t-t_p)/\tau_2} + p \right) \quad t_p \leq t \quad (2)$$

$$\rho = \frac{I_k}{I_p} \quad (3)$$

où

- I_p est le courant de crête;
- I_k est le courant de court-circuit quasi permanent;
- t_p est le temps jusqu'à la crête;
- τ_1 est la constante de temps de croissance;
- τ_2 est la constante de temps de décroissance.

S'il n'y a pas de courant maximal défini, alors $I_p = I_k$ et $t_p = T_k$; l'équation (1) décrit alors toute la variation dans le temps du courant de court-circuit.

Par calcul des grandeurs caractéristiques pour la variation dans le temps du courant de court-circuit selon la figure 2, les contraintes mécaniques et thermiques dues au court-circuit peuvent être vérifiées. Il convient d'utiliser les équations (13), (22), (36) et (37) lorsque les courants de court-circuit quasi permanents seulement sont requis.

Les hypothèses de l'impédance zéro entre les points de potentiel différent au point du défaut et la non prise en compte des résistances de charge (résistances shunts) sont valables pour le calcul des courants maximaux et minimaux de court-circuit.

Lors du calcul des courants de court-circuit maximaux, les conditions de commutation et de fonctionnement suivantes doivent être prises en compte, de telle façon que le plus grand courant de court-circuit circule:

- les résistances des conducteurs sont référencées à la température de 20 °C;
- les résistances de jonction des jeux de barre sont négligées;
- le contrôle pour limiter le courant du redresseur n'est pas efficace;
- les diodes pour découpler les parties du réseau sont négligées;
- la batterie est chargée à pleine capacité;
- l'effet de limitation du courant par les fusibles ou d'autres dispositifs de protection doit être pris en compte.

Lors du calcul des courants de court-circuit minimaux, les conditions de commutation et de fonctionnement suivantes doivent être prises en compte, de telle façon que le courant de court-circuit minimal circule:

- les résistances de conducteur sont référencées à la température maximale de fonctionnement;
- les résistances de jonction doivent être prises en compte (voir 2.3.1);
- la contribution du redresseur est le courant de court-circuit assigné;
- la batterie est à la tension finale comme spécifié par le constructeur;
- les diodes de découplage des parties du réseau sont prises en compte;
- les effets de limitation du courant dus aux fusibles ou à d'autres dispositifs de protection doivent être pris en compte.

$$p = \frac{I_k}{i_p} \quad (3)$$

where

- i_p is the peak short-circuit current;
- I_k is the quasi steady-state short-circuit current;
- t_p is the time to peak;
- τ_1 is the rise-time constant;
- τ_2 is the decay-time constant.

If there is no defined maximum current present, then $i_p = I_k$ and $t_p = T_k$; equation (1) then describes the whole time variation of the short-circuit current.

By calculation of the characteristic quantities for the time variation of the short-circuit current according to figure 2, the mechanical and thermal short-circuit stresses can be ascertained. If only the quasi steady-state short-circuit currents are required, the equations (13), (22), (36) and (37) should be used.

The assumptions that the impedance is zero between points of different potential at the short-circuit location and that the load resistances (shunt resistors) can be ignored, are valid for calculation of both the maximum and minimum short-circuit currents.

When calculating the maximum short-circuit currents the following switching and operating conditions shall be taken into account so that the maximum short-circuit current is flowing:

- the conductor resistances are referred to a temperature of 20 °C;
- the joint resistances of the busbars are neglected;
- the control for limiting the rectifier current is not effective;
- any diodes for decoupling parts of the system are neglected;
- the battery is charged to full capacity;
- the current-limiting effect of fuses or other protective devices shall be taken into account.

When calculating the minimum short-circuit currents the following switching and operating conditions shall be taken into account so that the minimum short-circuit current is flowing:

- the conductor resistances are referred to the maximum operating temperature;
- the joint resistances shall be taken into account (see 2.3.1);
- the contribution of the rectifier is the rated short-circuit current;
- the battery is at the final voltage as specified by the manufacturer;
- any diodes for decoupling parts of the system are taken into account;
- the current-limiting effect of fuses or other protective devices shall be taken into account.

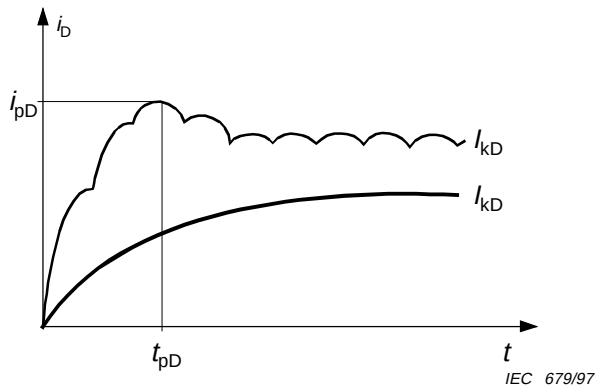


Figure 1a – Redresseur sans et avec réactance de lissage

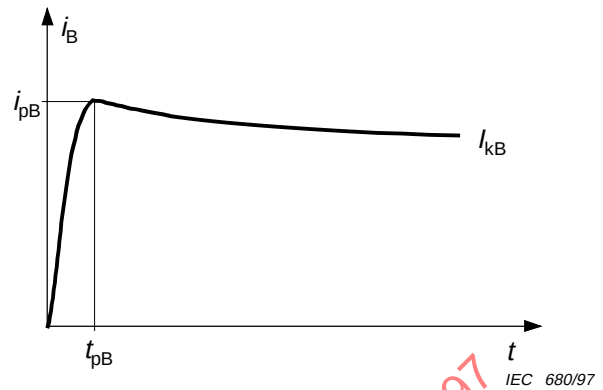


Figure 1b – Batterie

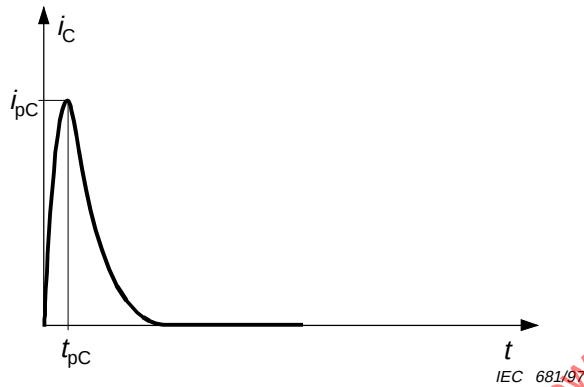


Figure 1c – Condensateur

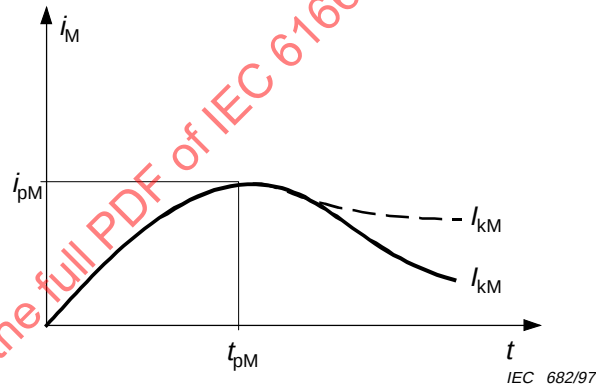
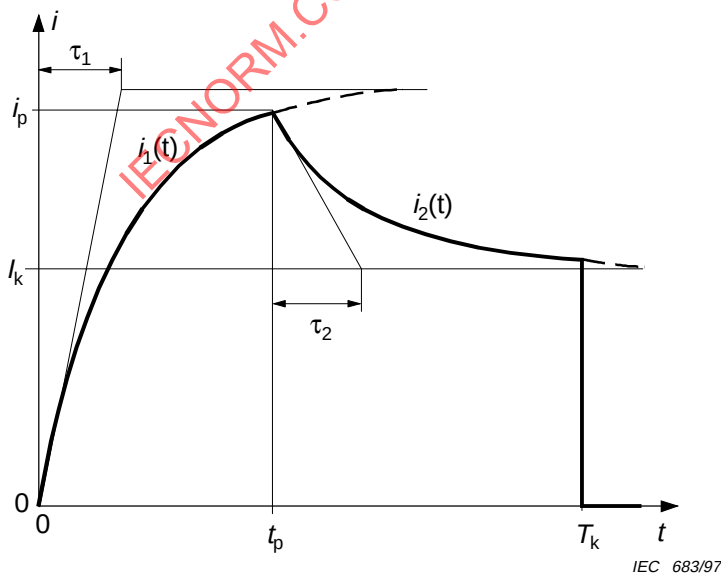


Figure 1d

— Moteur sans masse supplémentaire d'inertie
..... Moteur avec masse supplémentaire d'inertie

Figure 1 – Courbe de courants de court-circuit typiques



I_k Courant de court-circuit quasi permanent
 i_p Courant de crête du court-circuit
 T_k Durée de court-circuit
 t_p Temps jusqu'à la crête
 τ_1 Constante de temps de croissance
 τ_2 Constante de temps de décroissance

Figure 2 – Fonction d'approximation normale

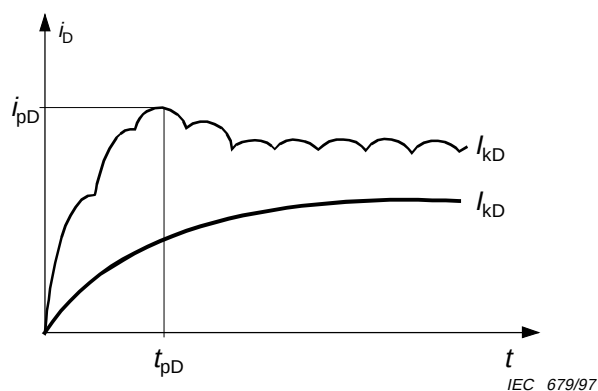


Figure 1a – Rectifier without and with smoothing reactor

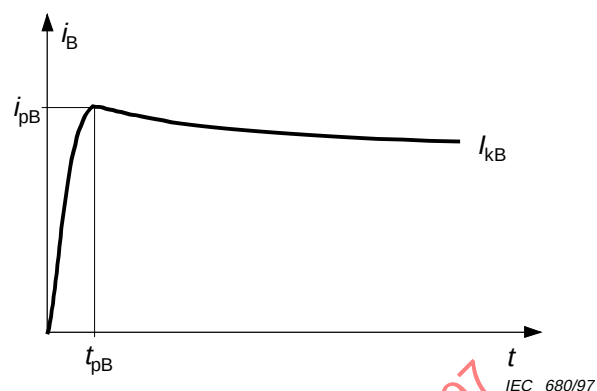


Figure 1b – Battery

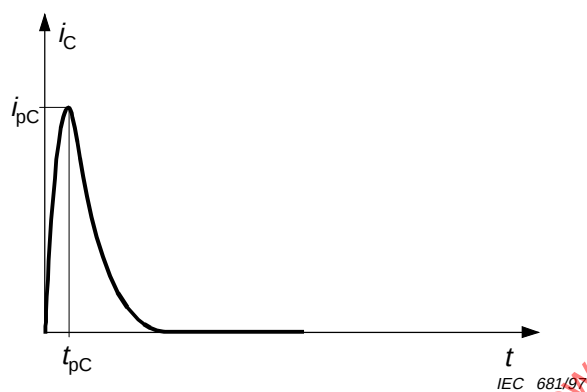


Figure 1c – Capacitor

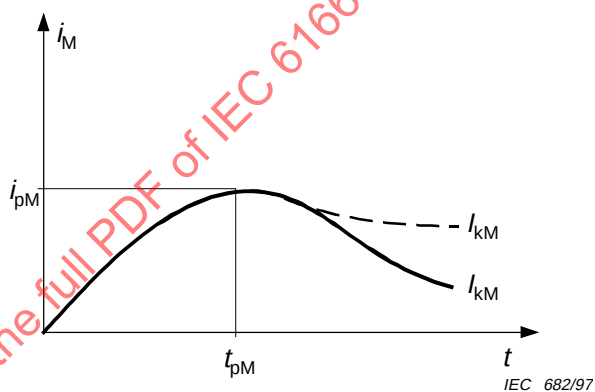


Figure 1d

— Motor without additional inertia mass
 Motor with additional inertia mass

Figure 1 – Diagrams of typical short-circuit currents

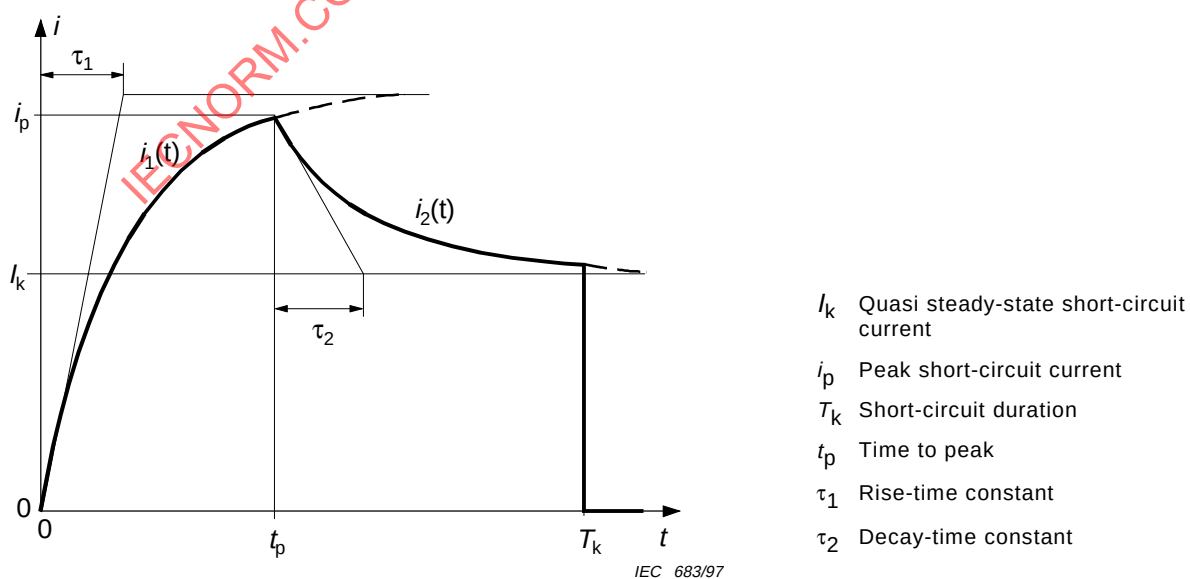


Figure 2 – Standard approximation function

2.2 Méthodes de calcul

La figure 3 montre le diagramme de circuit équivalent d'un réseau contenant quatre sources: un redresseur dans un pont triphasé, une batterie, un condensateur et un moteur. Pour les grandeurs caractéristiques des diagrammes de circuit équivalents de ces sources, voir ci-après en 2.4, 2.5, 2.6 et 2.7.

Lorsque le diagramme de circuit équivalent contient seulement une source, le courant de court-circuit au point de défaut est calculé en tenant compte seulement des séries de résistances et d'inductances.

Lorsque le diagramme de circuit équivalent contient plusieurs sources, le courant de court-circuit, dans le cas d'un point de défaut F1, est trouvé en ajoutant les courants de court-circuit des différentes sources.

Lorsque le diagramme de circuit équivalent contient plusieurs sources et une branche commune, le courant de court-circuit, dans le cas d'un point de défaut F2, est trouvé de la façon suivante:

- calculer les courants de court-circuit pour les différentes sources comme dans le cas d'un point de défaut F1, mais ajouter R_Y et L_Y de la branche commune;
- corriger les courants de court-circuit calculés ainsi avec le facteur de correction δ selon 3.1;
- insérer les valeurs calculées pour les différentes sources dans les équations (1) à (3);
- ajouter les différentes fonctions de temps à la fonction de temps du courant de court-circuit total en F2.

Lorsque les forces de court-circuit doivent être calculées selon la CEI 61660-2, il est alors nécessaire de trouver la fonction d'approximation normale de la figure 2 selon 3.3.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61660-1:1997

2.2 Calculating methods

Figure 3 shows the equivalent circuit diagram of a system containing four sources: a rectifier in three-phase a.c. bridge connection, a battery, a capacitor, and a motor. For the characteristic quantities of the equivalent circuit diagrams of these sources, see 2.4, 2.5, 2.6 and 2.7.

If the equivalent circuit diagram of the system contains only one source, the short-circuit current at the short-circuit location is calculated allowing for the series resistances and inductances only.

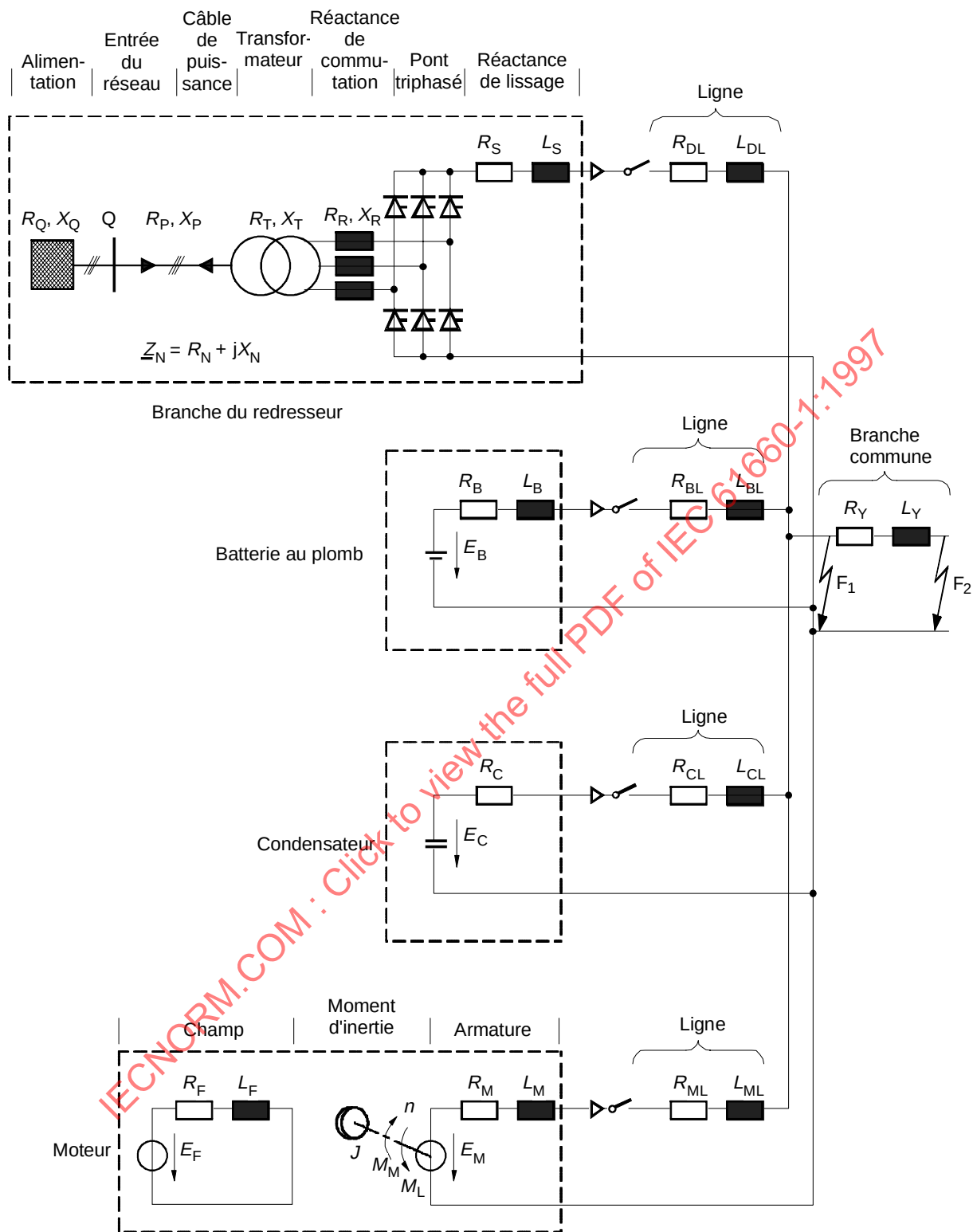
If the equivalent circuit diagram contains several sources, the short-circuit current, in case of a short-circuit location F1, is found by adding the short-circuit currents of the different sources.

If the equivalent circuit diagram contains several sources and a common branch, the short-circuit current, in case of a short-circuit location F2, is found in the following way:

- calculate the short-circuit currents for the different sources as in the case of short-circuit location F1 but add R_Y and L_Y of the common branch;
- correct the short-circuit currents calculated in this way with the correction factor according to 3.1;
- insert the calculated values for the different sources to equations (1) to (3);
- add the different time functions to the time function of the total short-circuit current in F2.

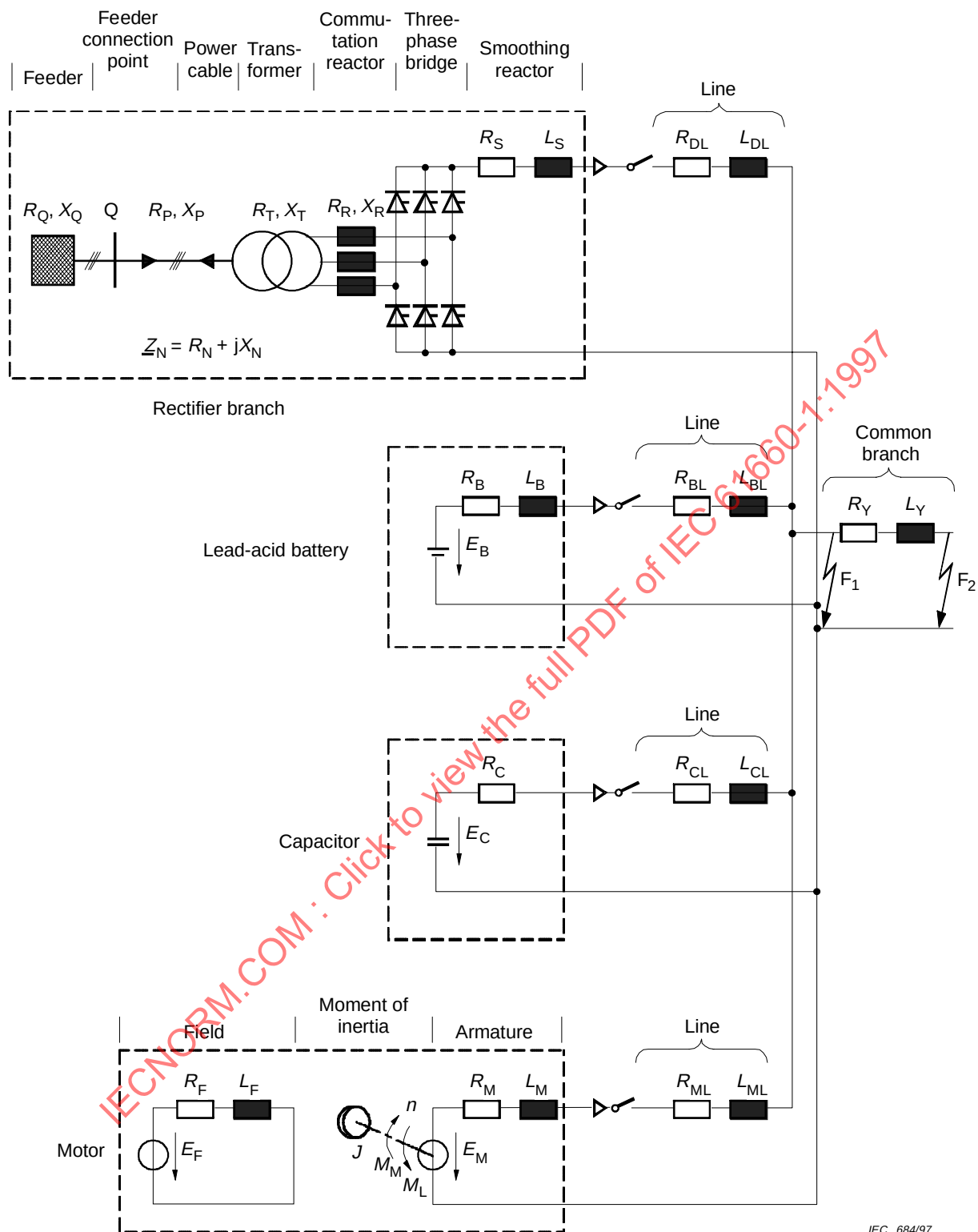
If the short-circuit forces have to be calculated according to IEC 61660-2, then it is necessary to find the standard approximation function of figure 2 according to 3.3.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61660-1:1997



Points de défaut:
F1 Court-circuit sans branche commune
F2 Court-circuit avec branche commune

Figure 3 – Diagramme de circuit équivalent pour le calcul des courants de court-circuit partiels



Short-circuit locations:

F1 Short circuit without common branch

F2 Short circuit with common branch

Figure 3 – Equivalent circuit diagram for calculating the partial short-circuit currents

2.3 Résistance et inductance du conducteur

Les valeurs de résistance et d'inductance sont obtenues en multipliant les valeurs respectives de la résistance de boucle et de l'inductance de boucle par unité de longueur R' et L' par la longueur du conducteur.

2.3.1 Résistance par unité de longueur et résistance de jonction

La résistance de boucle par unité de longueur peut être calculée à partir de la section nominale A et de la résistivité ρ :

$$R' = 2 \frac{\rho}{A} \quad (4a)$$

NOTE - La résistance à 20 °C peut être calculée par:

$$\rho = \frac{1}{54} \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}} \quad \text{pour le cuivre}$$

$$\rho = \frac{1}{34} \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}} \quad \text{pour l'aluminium}$$

La résistance à d'autres températures θ peut être calculée à partir de la résistance 20 °C, R_{20} en utilisant l'équation suivante:

$$R = R_{20} [1 + 0,004 \text{ K}^{-1} (\theta - 20 \text{ °C})] \quad (4b)$$

Pour la détermination du courant maximal de court-circuit, les résistances de jonction sont négligées. Pour la détermination du courant minimal de court-circuit, la résistance de jonction des connexions boulonnées doit être estimée par l'équation (5) et la figure 4.

$$R_{\text{joint}} = \frac{14\rho \cdot d}{A} \quad (5)$$

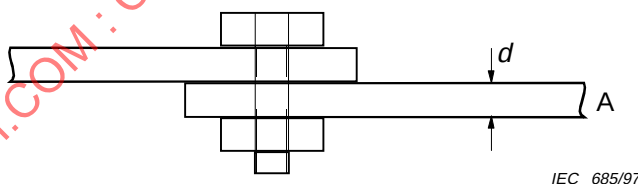


Figure 4 – Jonction boulonnée

2.3 Resistance and inductance of conductor

The values of resistance and inductance are obtained by multiplying the respective values of loop resistance and loop inductance per unit length R' and L' by the one-way length of conductor.

2.3.1 Resistance per unit length and joint resistance

The loop resistance per unit length can be calculated from the nominal cross-section A and the resistivity ρ :

$$R' = 2 \frac{\rho}{A} \quad (4a)$$

NOTE –The resistance at 20 °C may be calculated with:

$$\rho = \frac{1}{54} \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}} \quad \text{for copper}$$

$$\rho = \frac{1}{34} \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}} \quad \text{for aluminium}$$

The resistance at other temperatures θ can be calculated from the resistance at 20 °C, R_{20} , using the following equation:

$$R = R_{20} [1 + 0,004 \text{ K}^{-1} (\theta - 20 \text{ °C})] \quad (4b)$$

When determining the maximum short-circuit current the joint resistances are neglected. When determining the minimum short-circuit current the joint resistance of the bolted joints shall be assessed using equation (5) and figure 4.

$$R_{\text{joint}} = \frac{14\rho \cdot d}{A} \quad (5)$$

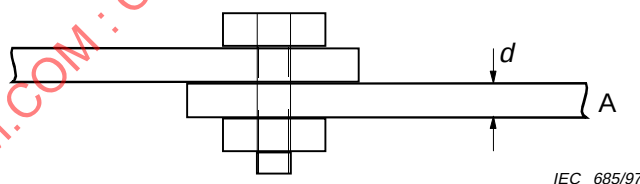


Figure 4 – Bolted joint

2.3.2 Inductance de boucle par unité de longueur

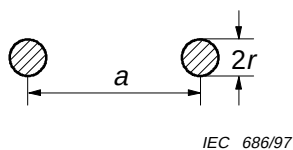


Figure 5a – Disposition de câble

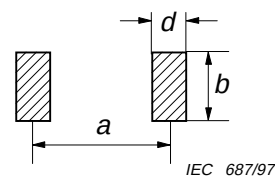


Figure 5b – Disposition du jeu de barre

Figure 5 – Inductance de boucle par unité de longueur

L'inductance de boucle par unité de longueur de câbles à une seule âme selon la figure 5a est donnée par:

$$L' = \frac{\mu_0}{\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{a}{r} \right) \quad (6)$$

où

$\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7}$ H/m, est la perméabilité absolue du vide;

a est l'entraxe entre conducteurs;

r est le rayon du conducteur.

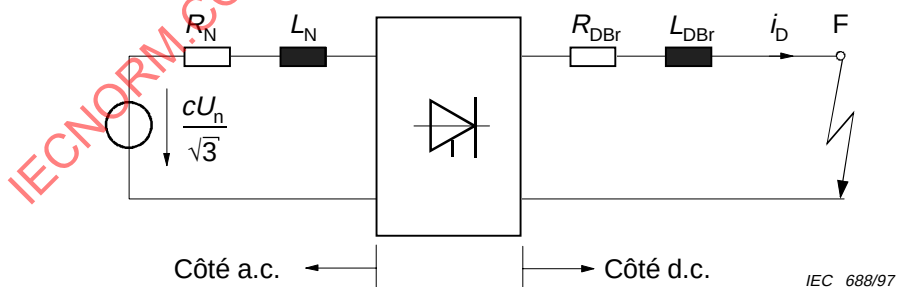
L'inductance de boucle par unité de longueur de barres conductrices de section rectangulaire selon la figure 5b est donnée par:

$$L' = \frac{\mu_0}{\pi} \left(\frac{3}{2} + \ln \frac{a}{(d+b)} \right) \quad \text{quand } a > b \quad (7)$$

L'inductance de boucle des réseaux composés de plusieurs câbles ou de barres parallèles est vérifiée d'après la méthode de la distance moyenne géométrique.

2.4 Redresseur

2.4.1 Diagramme du circuit équivalent et paramètres de court-circuit



NOTE – $cU_n/\sqrt{3}$ est la source de tension équivalente selon la CEI 60909.

Figure 6 – Diagramme du circuit équivalent du redresseur pour le calcul des courants de court-circuit

2.3.2 Loop inductance per unit length

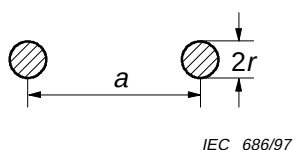


Figure 5a – Cable arrangement

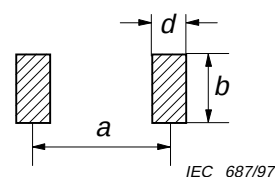


Figure 5b – Busbar arrangement

Figure 5 – Loop inductance per unit length

The loop inductance per unit length of single core cables according to figure 5a is given by:

$$L' = \frac{\mu_0}{\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{a}{r} \right) \quad (6)$$

where:

$\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7}$ H/m, is the absolute permeability of vacuum;

a is the centre-line distance between conductors;

r is the conductor radius.

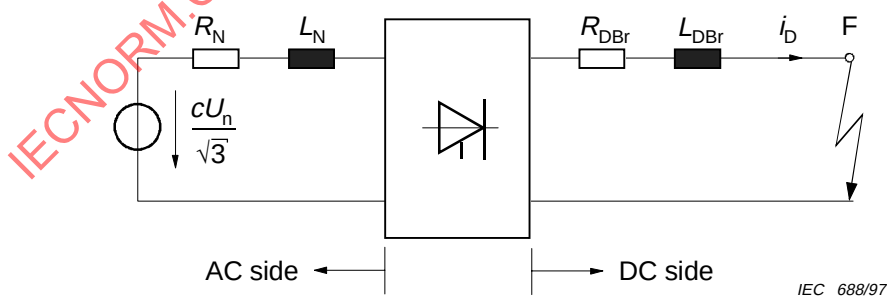
The loop inductance per unit length of conductors of rectangular cross-section according to figure 5b is given by:

$$L' = \frac{\mu_0}{\pi} \left(\frac{3}{2} + \ln \frac{a}{(d+b)} \right) \quad \text{when } a > b \quad (7)$$

The loop inductance of several parallel cables or bars is found using the method of geometric mean distance.

2.4 Rectifier

2.4.1 Equivalent circuit diagram and short-circuit parameters



NOTE – $cU_n/\sqrt{3}$ is the equivalent voltage source according to IEC 60909.

Figure 6 – Equivalent circuit diagram of the rectifier for the calculation of short-circuit currents

R_N et X_N dans la figure 6 sont des abréviations pour les résistances et inductances du côté courant alternatif de la branche du redresseur dans la figure 3.

$$R_N = R_Q + R_P + R_T + R_R \quad (8)$$

$$X_N = X_Q + X_P + X_T + X_R \quad (9)$$

où

- R_Q, X_Q sont la résistance et l'inductance de court-circuit de l'alimentation en courant alternatif selon la CEI 60909 vue du côté secondaire du transformateur;
- R_P, X_P sont la résistance et l'inductance de court-circuit du câble d'alimentation de puissance vue du côté secondaire du transformateur;
- R_T, X_T sont la résistance et l'inductance de court-circuit du transformateur vue du côté secondaire du transformateur selon la CEI 60909;
- R_R, X_R sont la résistance et l'inductance de court-circuit de la réactance de commutation si elle existe.

Afin de déterminer le courant continu de court-circuit maximal, l'impédance minimale Z_{Qmin} est calculée en utilisant le courant de court-circuit maximal I''_{kQmax} du réseau au point d'alimentation Q:

$$Z_{Qmin} = \frac{cU_n}{\sqrt{3} I''_{kQmax}} \quad (10a)$$

Afin de déterminer le courant continu minimal de court-circuit, l'impédance maximale Z_{Qmax} est calculée en utilisant le courant alternatif de court-circuit minimal I''_{kQmin} du réseau au point d'alimentation Q:

$$Z_{Qmax} = \frac{cU_n}{\sqrt{3} I''_{kQmin}} \quad (10b)$$

R_{DBr} et L_{DBr} dans la figure 6 sont des abréviations pour les résistances et les inductances du côté du courant continu du redresseur et le réseau à courant continu, selon la figure 3.

$$R_{DBr} = R_S + R_{DL} + R_Y \quad (11)$$

$$L_{DBr} = L_S + L_{DL} + L_Y \quad (12)$$

où

- R_S, L_S sont la résistance et l'inductance de la réactance de lissage saturée en courant continu;
- R_{DL}, L_{DL} sont la résistance et l'inductance du conducteur dans la branche du redresseur;
- R_Y, L_Y sont la résistance et l'inductance de la branche commune.

2.4.2 Courant de court-circuit partiel

La méthode est utilisée pour déterminer les grandeurs caractéristiques de la fonction d'approximation normale selon la figure 2. Les paramètres définis en 2.4.1 sont utilisés.

R_N and X_N in figure 6 are abbreviations for the resistances and reactances of the a.c. side of the rectifier branch in figure 3.

$$R_N = R_Q + R_P + R_T + R_R \quad (8)$$

$$X_N = X_Q + X_P + X_T + X_R \quad (9)$$

were

- R_Q, X_Q is the short-circuit resistance and reactance of the a.c. feeder according to IEC 60909 referred to the secondary side of the transformer;
- R_P, X_P is the short-circuit resistance and reactance of the power supply cable referred to the secondary side of the transformer;
- R_T, X_T is the short-circuit resistance and reactance of the transformer referred to the secondary side, determined according to IEC 60909;
- R_R, X_R is the short-circuit resistance and reactance of the commutating reactor, if it exists.

To determine the maximum d.c. short-circuit current, the minimum impedance Z_{Qmin} is calculated using the maximum short-circuit current I''_{kQmax} of the system at the feeder connection point Q:

$$Z_{Qmin} = \frac{cU_n}{\sqrt{3} I''_{kQmax}} \quad (10a)$$

To determine the minimum d.c. short-circuit current, the maximum impedance Z_{Qmax} is calculated using the minimum a.c. short-circuit current I''_{kQmin} of the system at the feeder connection point Q:

$$Z_{Qmax} = \frac{cU_n}{\sqrt{3} I''_{kQmin}} \quad (10b)$$

R_{DBr} and L_{DBr} in figure 6 are abbreviations for the resistances and inductances of the d.c. side of the rectifier and the d.c. system, according to figure 3:

$$R_{DBr} = R_S + R_{DL} + R_Y \quad (11)$$

$$L_{DBr} = L_S + L_{DL} + L_Y \quad (12)$$

where

- R_S, L_S is the resistance and inductance of the d.c. saturated smoothing reactor;
- R_{DL}, L_{DL} is the resistance and inductance of the conductor in the rectifier branch;
- R_Y, L_Y is the resistance and inductance of the common branch, if it exists.

2.4.2 Partial short-circuit current

The method is used for determining the characteristic quantities of the standard approximation function according to figure 2. The parameters defined in 2.4.1 are used.

2.4.2.1 Courant de court-circuit quasi permanent I_{kD}

Le courant de court-circuit quasi permanent est:

$$I_{kD} = \lambda_D \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_N} \cdot \frac{U_{rTLV}}{U_{rTHV}} \quad (13)$$

Le facteur λ_D dépend de R_N/X_N et R_{DBr}/R_N et peut être pris de la figure 7.

2.4.2.2 Courant de court-circuit de crête i_{pD}

Le courant de court-circuit de crête est:

$$i_{pD} = \kappa_D I_{kD} \quad (14)$$

Le facteur κ_D dépend de:

$$\frac{R_N}{X_N} \left(1 + \frac{2 R_{DBr}}{3 R_N} \right) \text{ et } \frac{L_{DBr}}{L_N}$$

et est pris de la figure 8.

2.4.2.3 Temps jusqu'à la crête t_{pD}

Lorsque $\kappa_D \geq 1,05$, le temps jusqu'à la crête est

$$t_{pD} = (3 \kappa_D + 6) \text{ ms} \quad \text{quand } \frac{L_{DBr}}{L_N} \leq 1 \quad (15)$$

$$t_{pD} = \left[(3 \kappa_D + 6) + 4 \left(\frac{L_{DBr}}{L_N} - 1 \right) \right] \text{ ms} \quad \text{quand } \frac{L_{DBr}}{L_N} > 1 \quad (16)$$

NOTE – Lorsque $\kappa_D < 1,05$ le courant maximal comparé au courant de court-circuit quasi permanent est négligé et $t_{pD} = T_k$ est utilisé.

2.4.2.4 Constante de temps de croissance τ_{1D}

Lorsque $f_n = 50 \text{ Hz}$, la constante de temps de croissance est:

$$\tau_{1D} = \left[2 + (\kappa_D - 0,9) \left(2,5 + 9 \frac{L_{DBr}}{L_N} \right) \right] \text{ ms} \quad \text{quand } \kappa_D \geq 1,05 \quad (17)$$

$$\tau_{1D} = \left[0,7 + \left[7 - \frac{R_N}{X_N} \left(1 + \frac{2 L_{DBr}}{3 L_N} \right) \right] \left(0,1 + 0,2 \frac{L_{DBr}}{L_N} \right) \right] \text{ ms} \quad \text{quand } \kappa_D < 1,05 \quad (18)$$

Pour la simplification $\tau_{1D} = \frac{1}{3} t_{pD}$ peut être utilisé sur le plan conservatif.

2.4.2.1 Quasi steady-state short-circuit current I_{kD}

The quasi steady-state short-circuit current is:

$$I_{kD} = \lambda_D \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_N} \cdot \frac{U_{rTLV}}{U_{rTHV}} \quad (13)$$

The factor λ_D depends on R_N/X_N and R_{DBr}/R_N and can be taken from figure 7.

2.4.2.2 Peak short-circuit current i_{pD}

The peak short-circuit current is:

$$i_{pD} = \kappa_D I_{kD} \quad (14)$$

The factor κ_D , dependent on:

$$\frac{R_N}{X_N} \left(1 + \frac{2}{3} \frac{R_{DBr}}{R_N} \right) \quad \text{and} \quad \frac{L_{DBr}}{L_N}$$

is taken from figure 8.

2.4.2.3 Time to peak t_{pD}

When $\kappa_D \geq 1,05$, the time to peak is:

$$t_{pD} = (3 \kappa_D + 6) \text{ ms} \quad \text{when} \quad \frac{L_{DBr}}{L_N} \leq 1 \quad (15)$$

$$t_{pD} = \left[(3\kappa_D + 6) + 4 \left(\frac{L_{DBr}}{L_N} - 1 \right) \right] \text{ ms} \quad \text{when} \quad \frac{L_{DBr}}{L_N} > 1 \quad (16)$$

NOTE – If $\kappa_D < 1,05$, the maximum current, compared with the quasi steady-state short-circuit current is neglected and $t_{pD} = T_k$ is used.

2.4.2.4 Rise-time constant τ_{1D}

When $f_n = 50 \text{ Hz}$, the rise-time constant is:

$$\tau_{1D} = \left[2 + (\kappa_D - 0,9) \left(2,5 + 9 \frac{L_{DBr}}{L_N} \right) \right] \text{ ms} \quad \text{when} \quad \kappa_D \geq 1,05 \quad (17)$$

$$\tau_{1D} = \left[0,7 + \left[7 - \frac{R_N}{X_N} \left(1 + \frac{2}{3} \frac{L_{DBr}}{L_N} \right) \right] \left(0,1 + 0,2 \frac{L_{DBr}}{L_N} \right) \right] \text{ ms} \quad \text{when} \quad \kappa_D < 1,05 \quad (18)$$

For simplification $\tau_{1D} = \frac{1}{3} t_{pD}$ may be used on the conservative side.

2.4.2.5 Constante de temps de décroissance τ_{2D}

Lorsque $f_n = 50$ Hz, la constante de temps de décroissance est:

$$\tau_{2D} = \frac{2 \text{ ms}}{\frac{R_N}{X_N} \left(0,6 + 0,9 \frac{R_{DBr}}{R_N} \right)} \quad (19)$$

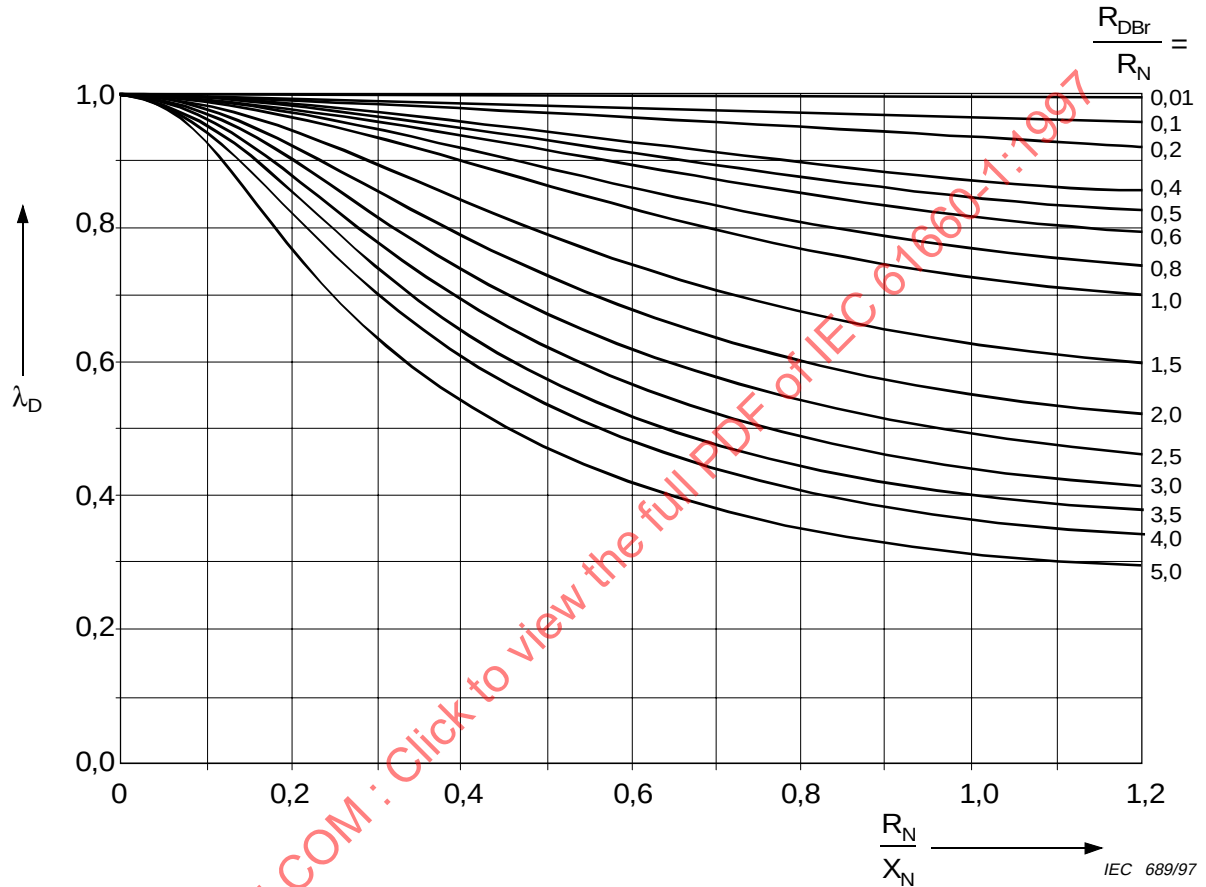


Figure 7 – Facteur λ_D pour la détermination du courant de court-circuit quasi permanent I_{kD} (formules en annexe A)

2.4.2.5 Decay-time constant τ_{2D}

When $f_n = 50$ Hz, the decay-time constant is:

$$\tau_{2D} = \frac{2 \text{ ms}}{\frac{R_N}{X_N} \left(0,6 + 0,9 \frac{R_{DBr}}{R_N} \right)} \quad (19)$$

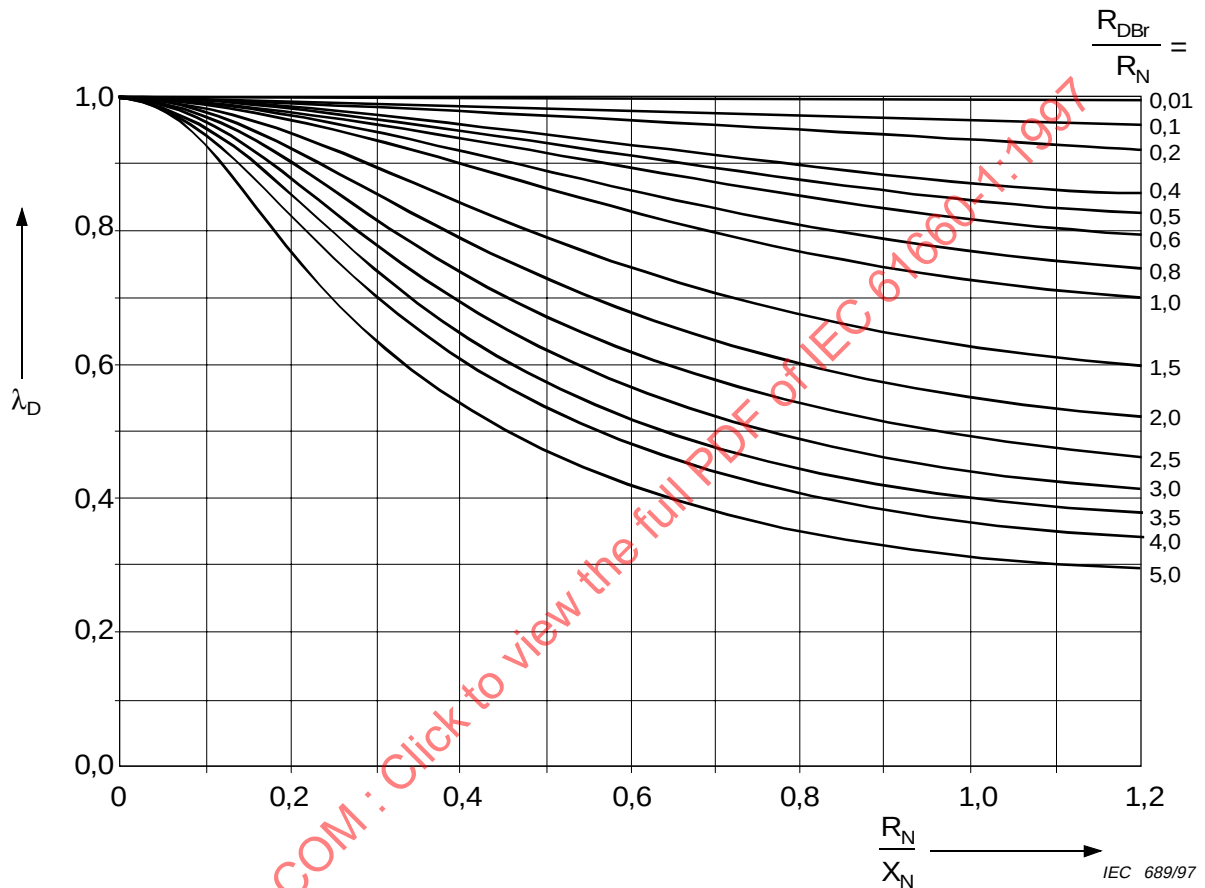


Figure 7 – Factor λ_D for determining the quasi steady-state short-circuit current I_{kD} (equation in annex A)

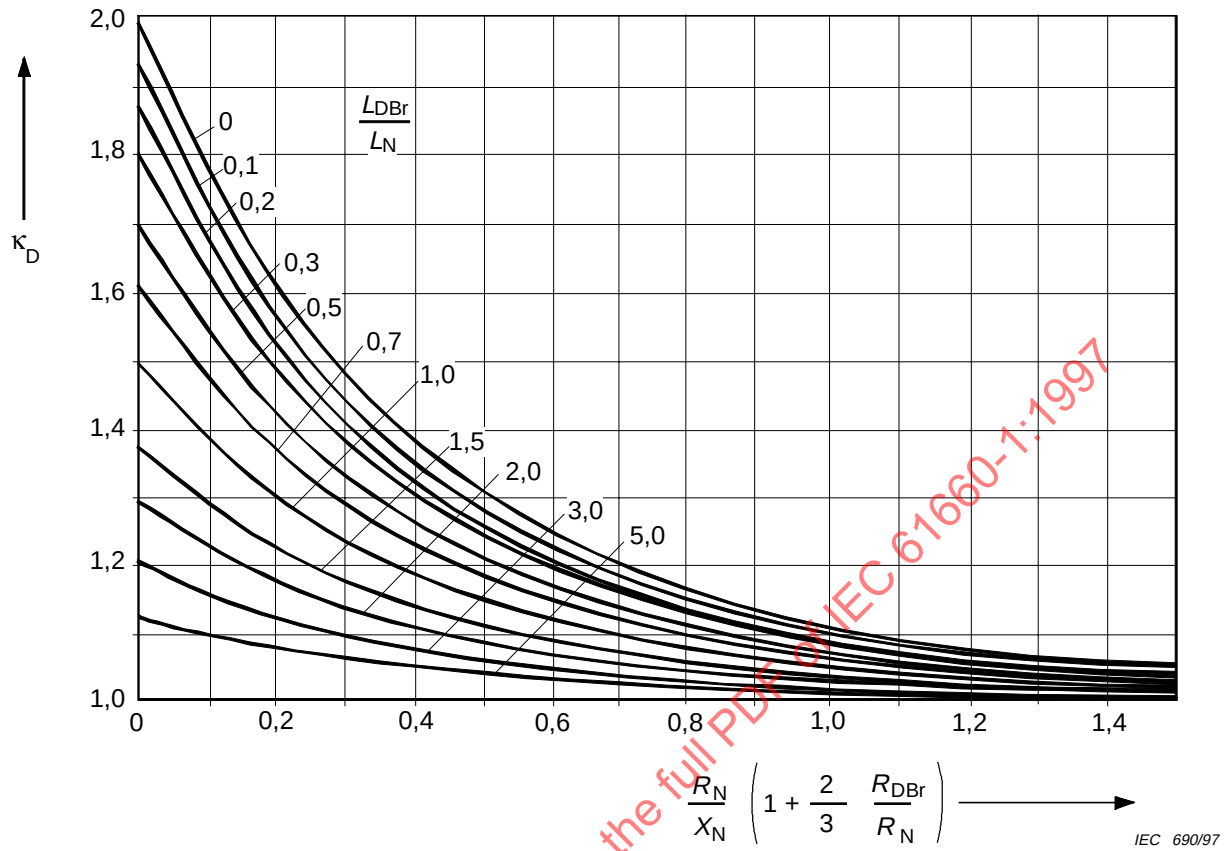


Figure 8 – Facteur κ_D pour la détermination du courant de court-circuit de crête i_{pD} (équations en annexe A)

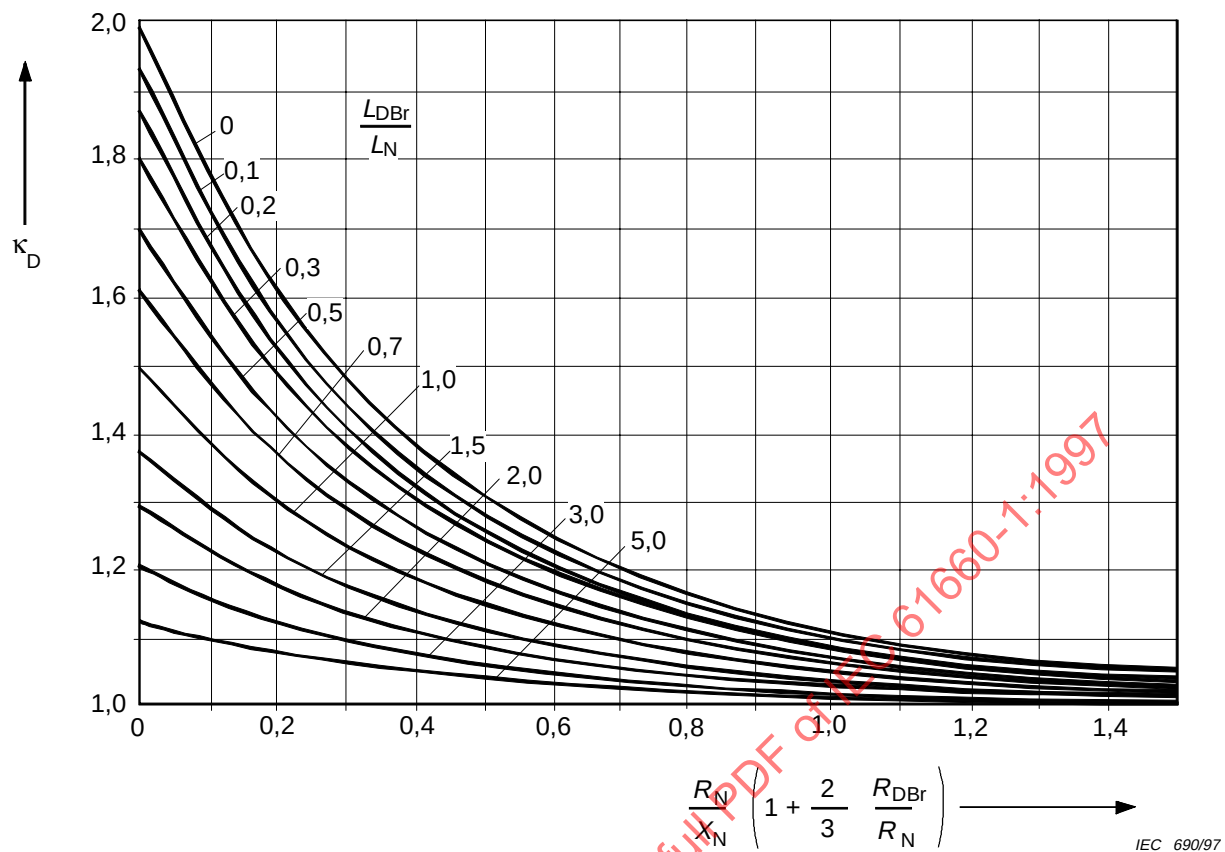


Figure 8 – Factor κ_D for determining the peak short-circuit current i_{pD} (equations in annex A)

2.5 Batterie

2.5.1 Diagramme du circuit équivalent et paramètres de court-circuit

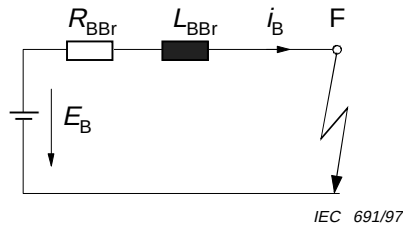


Figure 9 – Diagramme du circuit équivalent de la batterie stationnaire au plomb pour le calcul des courants de court-circuit

Si la tension de la batterie E_B en circuit ouvert est inconnue, utiliser $E_B = 1,05 U_{nB}$ pour les batteries chargées et $E_B = 0,9 U_{nB}$ pour les batteries déchargées.

Pour les batteries au plomb utiliser $U_{nB} = 2,0$ V par élément si l'information du constructeur est manquante.

$R_{BB r}$ et $L_{BB r}$, dans la figure 9, sont des abréviations pour les résistances et les inductances selon la figure 3:

$$R_{BB r} = 0,9 R_B + R_{BL} + R_Y \quad (20)$$

$$L_{BB r} = L_B + L_{BL} + L_Y \quad (21)$$

où

R_B, L_B sont la résistance et l'inductance de la batterie en cas de court-circuit, pour une batterie chargée, spécifiées par le constructeur;

Si R_B n'est pas connue pour une batterie déchargée, R_B pour une batterie chargée multipliée par le facteur 1,7 peut être utilisée. Si l'inductance d'un élément, y compris les connexions, est inconnue, la valeur $L = 0,2 \mu H$ peut être utilisée.

R_{BL}, L_{BL} sont la résistance et l'inductance du conducteur dans la branche de la batterie;

R_Y, L_Y sont la résistance et l'inductance de la branche commune, si elle existe.

2.5.2 Courant de court-circuit partiel

La méthode est utilisée pour la détermination des grandeurs caractéristiques de la fonction d'approximation normale selon la figure 2. Les paramètres définis en 2.5.1 sont utilisés.

2.5.2.1 Courant de court-circuit quasi permanent I_{kB}

Le courant de court-circuit quasi permanent de 1 s après le début du court-circuit est

$$I_{kB} = \frac{0,95 E_B}{R_{BB r} + 0,1 R_B} \quad (22)$$

2.5 Battery

2.5.1 Equivalent circuit diagram and short-circuit parameters

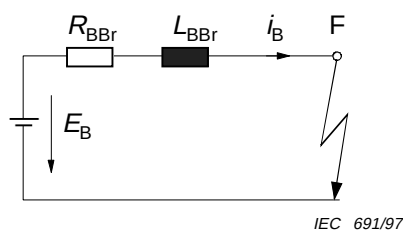


Figure 9 –Equivalent circuit diagram of the stationary lead-acid battery for the calculation of short-circuit currents

If the open-circuit voltage of the battery E_B is unknown, use $E_B = 1,05 U_{nB}$ for charged batteries and $E_B = 0,9 U_{nB}$ for discharged batteries.

For lead-acid batteries use $U_{nB} = 2,0$ V/cell if information from the manufacturer is missing.

R_{BB_r} and L_{BB_r} in figure 9 are abbreviations for the resistances and inductances according to figure 3:

$$R_{BB_r} = 0,9 R_B + R_{BL} + R_Y \quad (20)$$

$$L_{BB_r} = L_B + L_{BL} + L_Y \quad (21)$$

where

R_B, L_B is the resistance and inductance of the battery in case of short circuit, for a charged battery specified by the manufacturer;

If R_B is unknown for a discharged battery, R_B for a charged battery multiplied by the factor 1,7 may be used. If the inductance of a cell including the connection is unknown, the value $L = 0,2 \mu\text{H}$ may be used.

R_{BL}, L_{BL} is the resistance and inductance of the conductor in the battery branch;

R_Y, L_Y is the resistance and inductance of the common branch, if it exists.

2.5.2 Partial short-circuit current

The method is used for determining the characteristic quantities of the standard approximation function according to figure 2. The parameters defined in 2.5.1 are used.

2.5.2.1 Quasi steady-state short-circuit current I_{kB}

The quasi steady-state short-circuit current 1s after the beginning of the short circuit is:

$$I_{kB} = \frac{0,95 E_B}{R_{BB_r} + 0,1 R_B} \quad (22)$$

2.5.2.2 Courant de court-circuit de crête i_{pB}

Le courant de court-circuit de crête est

$$i_{pB} = \frac{E_B}{R_{BBr}} \quad (23)$$

2.5.2.3 Temps jusqu'à la crête t_{pB} et constante de temps de croissance τ_{1B}

Le temps jusqu'à la crête t_{pB} et la constante de temps de croissance τ_{1B} dépendant de $\frac{1}{\delta}$ sont donnés par la figure 10, où

$$\frac{1}{\delta} = \frac{2}{\frac{R_{BBr}}{L_{BBr}} + \frac{1}{T_B}} \quad (24)$$

La constante de temps $T_B = 30$ ms.

2.5.2.4 Constante de temps de décroissance τ_{2B}

La constante de temps de décroissance est:

$$\tau_{2B} = 100 \text{ ms} \quad (25)$$

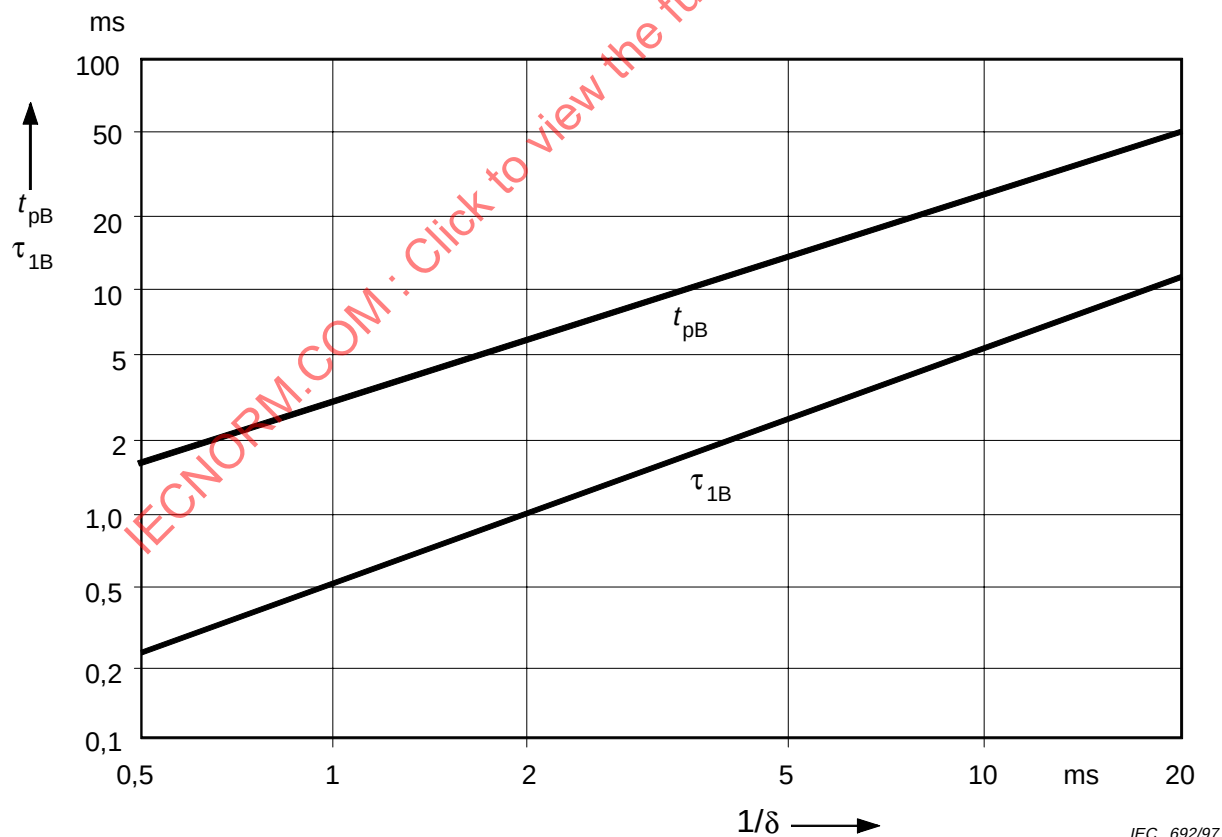


Figure 10 – Temps jusqu'à la crête t_{pB} et constante de temps de croissance τ_{1B}

2.5.2.2 Peak short-circuit current i_{pB}

The peak short-circuit current is:

$$i_{pB} = \frac{E_B}{R_{BBr}} \quad (23)$$

2.5.2.3 Time to peak t_{pB} and rise-time constant τ_{1B}

The time to peak t_{pB} and the rise-time constant τ_{1B} , dependent on $\frac{1}{\delta}$, are taken from figure 10, where:

$$\frac{1}{\delta} = \frac{2}{\frac{R_{BBr}}{L_{BBr}} + \frac{1}{T_B}} \quad (24)$$

The time constant $T_B = 30$ ms.

2.5.2.4 Decay-time constant τ_{2B}

The decay-time constant is:

$$\tau_{2B} = 100 \text{ ms} \quad (25)$$

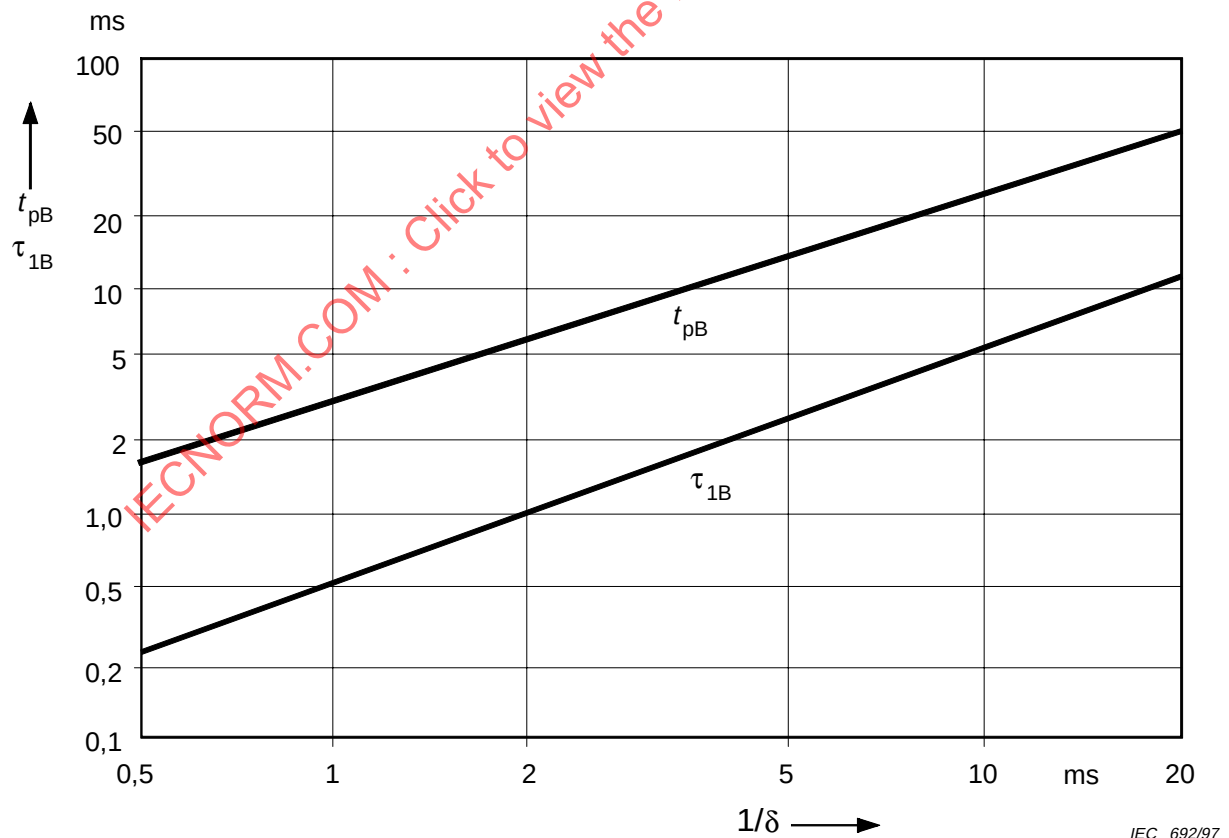


Figure 10 – Time to peak t_{pB} and rise-time constant τ_{1B}

2.6 Condensateur

2.6.1 Diagramme du circuit équivalent et paramètres de court-circuit

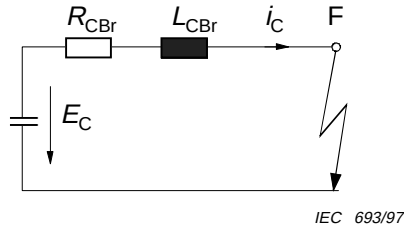


Figure 11 – Diagramme du circuit équivalent du condensateur pour le calcul des courants de court-circuit

R_{CBr} et L_{CBr} , dans la figure 11, sont des abréviations pour les résistances et les inductances selon la figure 3.

$$R_{CBr} = R_C + R_{CL} + R_Y \quad (26)$$

$$L_{CBr} = L_{CL} + L_Y \quad (27)$$

où

R_C est la résistance équivalente en série en courant continu du condensateur donnée par le constructeur;

Si la résistance en courant continu n'est pas connue, il faut utiliser les résistances maximales en courant alternatif;

R_{CL} , L_{CL} sont la résistance et l'inductance du conducteur dans la branche du condensateur;

R_Y , L_Y sont la résistance et l'inductance de la branche commune, si elle existe.

La valeur de la capacité C est la capacité en courant continu. Si elle n'est pas connue, $C = 1,2 C_{a.c.}$ peut être utilisée, où $C_{a.c.}$ est la capacité pour $f = 100$ Hz.

2.6.2 Courant de court-circuit partiel

La méthode est utilisée pour déterminer les grandeurs caractéristiques de la fonction d'approximation normale selon la figure 2. Les paramètres définis en 2.6.1 sont utilisés.

2.6.2.1 Courant de court-circuit quasi permanent I_{kC}

Le courant de court-circuit quasi permanent est $I_{kC} = 0$.

2.6.2.2 Courant de crête de court-circuit i_{pC}

Le courant de crête de court-circuit est:

$$i_{pC} = \kappa_C \frac{E_C}{R_{CBr}} \quad (28)$$

où

κ_C est le facteur pour le calcul du courant de court-circuit de crête;

E_C est la tension du condensateur avant le court-circuit.

2.6 Capacitor

2.6.1 Equivalent circuit diagram and short-circuit parameters

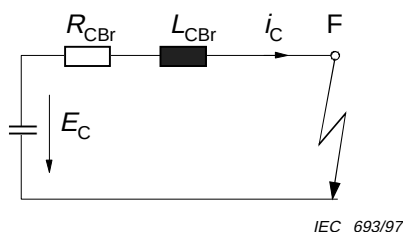


Figure 11 – Equivalent circuit diagram of the capacitor for the calculation of short-circuit currents

R_{CBr} and L_{CBr} in figure 11 are abbreviations for the resistances and inductances according to figure 3:

$$R_{CBr} = R_C + R_{CL} + R_Y \quad (26)$$

$$L_{CBr} = L_{CL} + L_Y \quad (27)$$

where

R_C is the equivalent series d.c. resistance of the capacitor given by the manufacturer;

If d.c. resistance is unknown the maximum a.c. resistance shall be used.

R_{CL} , L_{CL} is the resistance and inductance of the conductor in the capacitor branch;

R_Y , L_Y is the resistance and inductance of the common branch, if it exists.

The value of capacitance C is the d.c. capacitance. If unknown, $C = 1,2 C_{a.c.}$ may be used, where $C_{a.c.}$ is the capacitance when $f = 100$ Hz.

2.6.2 Partial short-circuit current

The method is used for determining the characteristic quantities of the standard approximation function according to figure 2. The parameters defined in 2.6.1 are used.

2.6.2.1 Quasi steady-state short-circuit current I_{kC}

The quasi steady-state short-circuit current is $I_{kC} = 0$.

2.6.2.2 Peak short-circuit current i_{pC}

The peak short-circuit current is:

$$i_{pC} = \kappa_C \frac{E_C}{R_{CBr}} \quad (28)$$

where

κ_C is the factor for calculating the peak short-circuit current;

E_C is the capacitor voltage before the short circuit.

Le facteur κ_C , dépendant de $\frac{1}{\delta}$ et de ω_0 , est donné par la figure 12.

$$\frac{1}{\delta} = \frac{2 L_{CBr}}{R_{CBr}} \quad (29)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{CBr} C}} \quad (30)$$

Si $L_{CBr} = 0$, alors $\kappa_C = 1$.

2.6.2.3 Temps jusqu'à la crête t_{pC}

Le temps jusqu'à la crête t_{pC} , dépendant de $\frac{1}{\delta}$ et de ω_0 , est donnée par la figure 13.

Si $L_{CBr} = 0$, alors $t_{pC} = 0$.

2.6.2.4 Constante de temps de croissance τ_{1C}

La constante de temps de croissance est:

$$\tau_{1C} = k_{1C} t_{pC} \quad (31)$$

où k_{1C} , dépendant de $\frac{1}{\delta}$ et de ω_0 , est donnée par la figure 14.

2.6.2.5 Constante de temps de décroissance τ_{2C}

La constante de temps de décroissance est:

$$\tau_{2C} = k_{2C} R_{CBr} C \quad (32)$$

où k_{2C} , dépendant de $\frac{1}{\delta}$ et de ω_0 , est donnée par la figure 15. Si $L_{CBr} = 0$, alors $k_{2C} = 1$.

The factor κ_C , dependent on $\frac{1}{\delta}$ and ω_0 , is taken from figure 12:

$$\frac{1}{\delta} = \frac{2 L_{CBr}}{R_{CBr}} \quad (29)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{CBr} C}} \quad (30)$$

If $L_{CBr} = 0$ then $\kappa_C = 1$.

2.6.2.3 Time to peak t_{pC}

The time to peak t_{pC} , dependent on $\frac{1}{\delta}$ and ω_0 , is taken from figure 13.

If $L_{CBr} = 0$ then $t_{pC} = 0$.

2.6.2.4 Rise-time constant τ_{1C}

The rise-time constant is

$$\tau_{1C} = k_{1C} t_{pC} \quad (31)$$

where k_{1C} , dependent on $\frac{1}{\delta}$ and ω_0 , is taken from figure 14.

2.6.2.5 Decay-time constant τ_{2C}

The decay-time constant is:

$$\tau_{2C} = k_{2C} R_{CBr} C \quad (32)$$

where k_{2C} , dependent on $\frac{1}{\delta}$ and ω_0 , is taken from figure 15. If $L_{CBr} = 0$ then $k_{2C} = 1$.

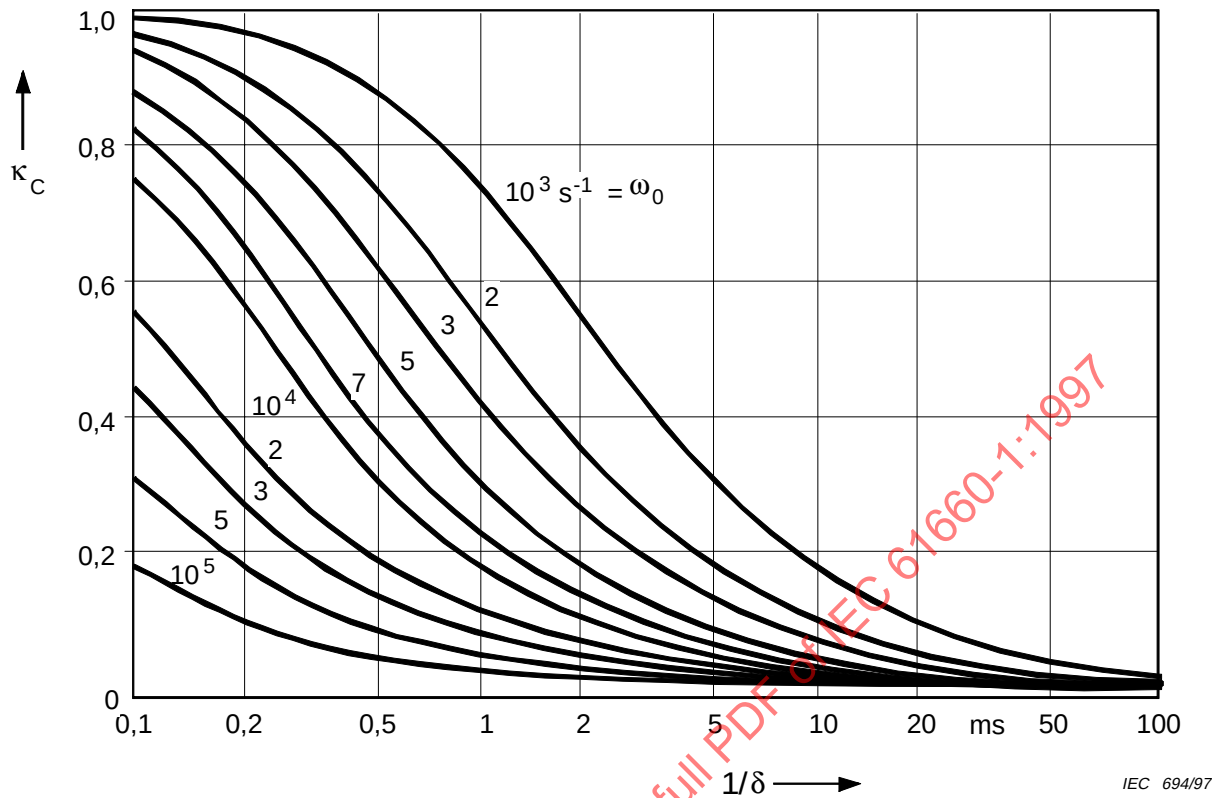


Figure 12 – Facteur κ_C pour déterminer le courant de court-circuit de crête i_{pc}
(Equation en annexe A)

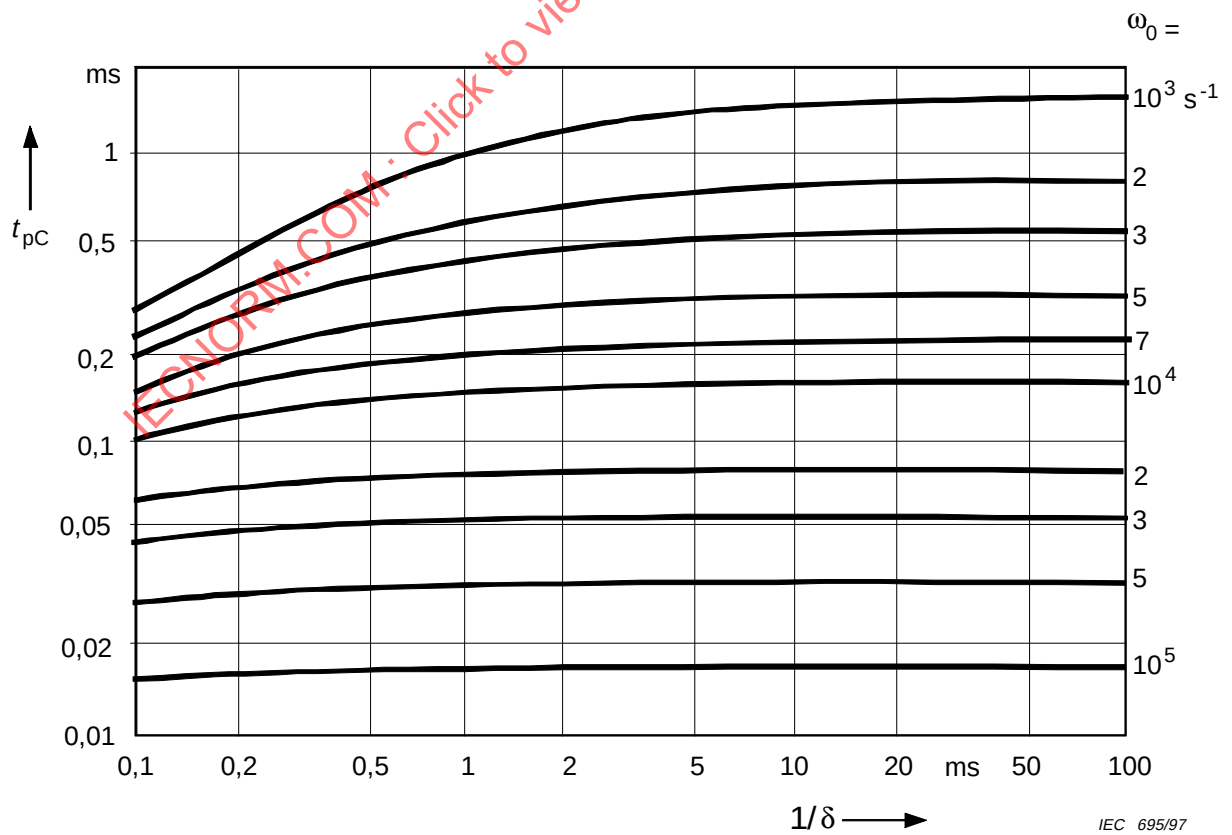


Figure 13 – Temps jusqu'à la crête t_{pc}
(Equation en annexe A)

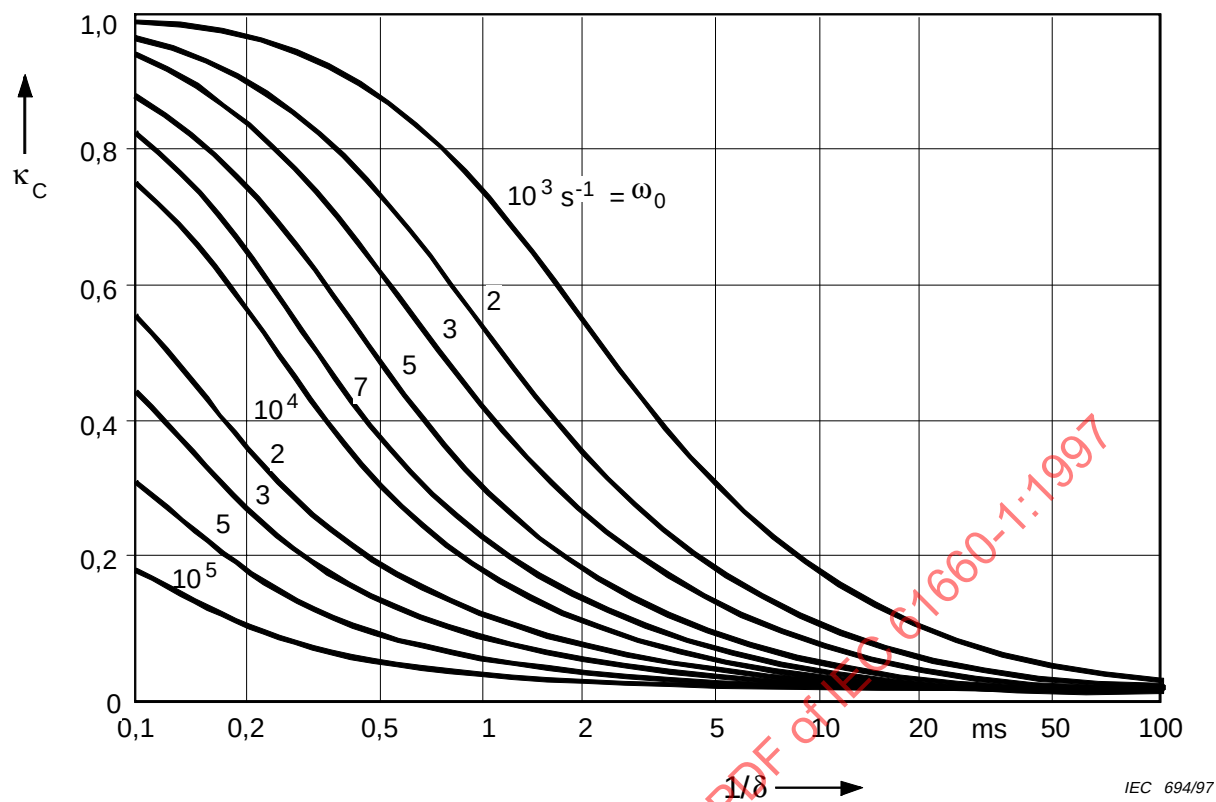


Figure 12 – Factor κ_C for determining the peak short-circuit current i_{pC} (Equation in Annex A)

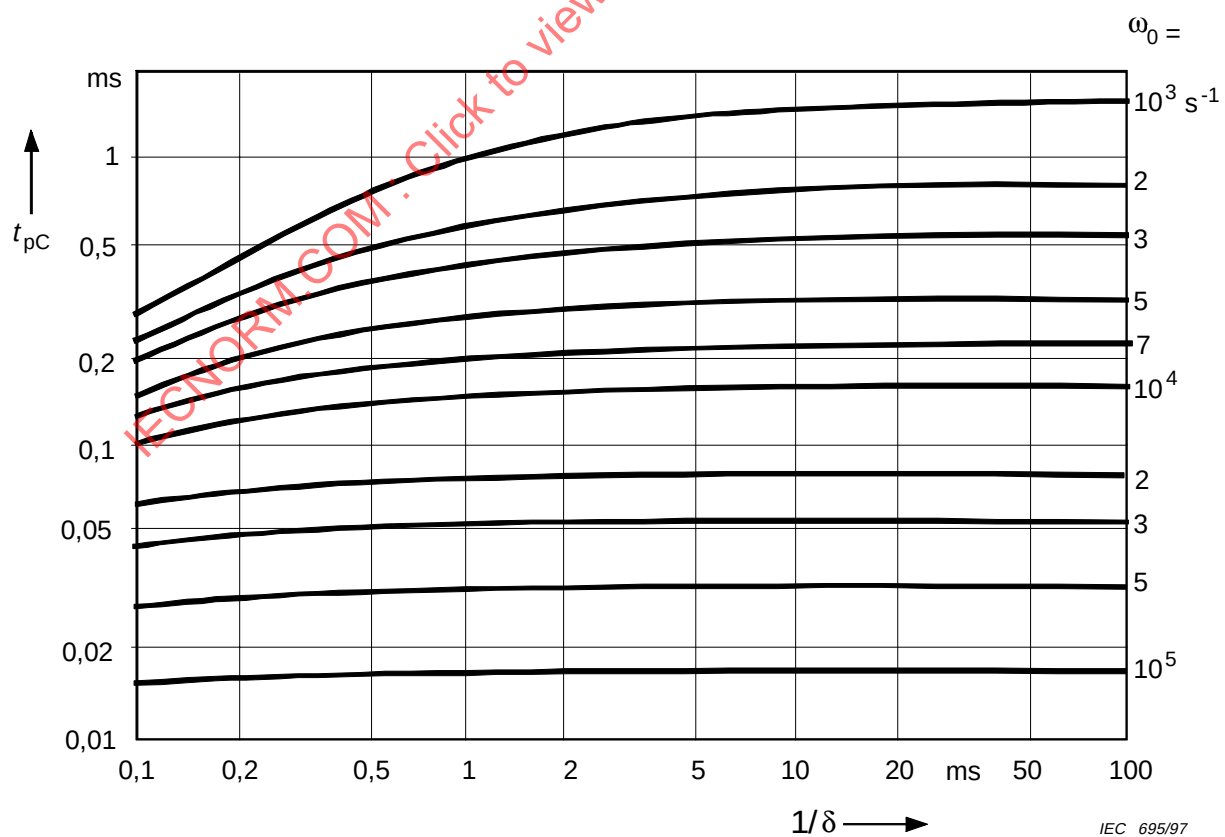


Figure 13 – Time to peak t_{pC} (Equation in Annex A)

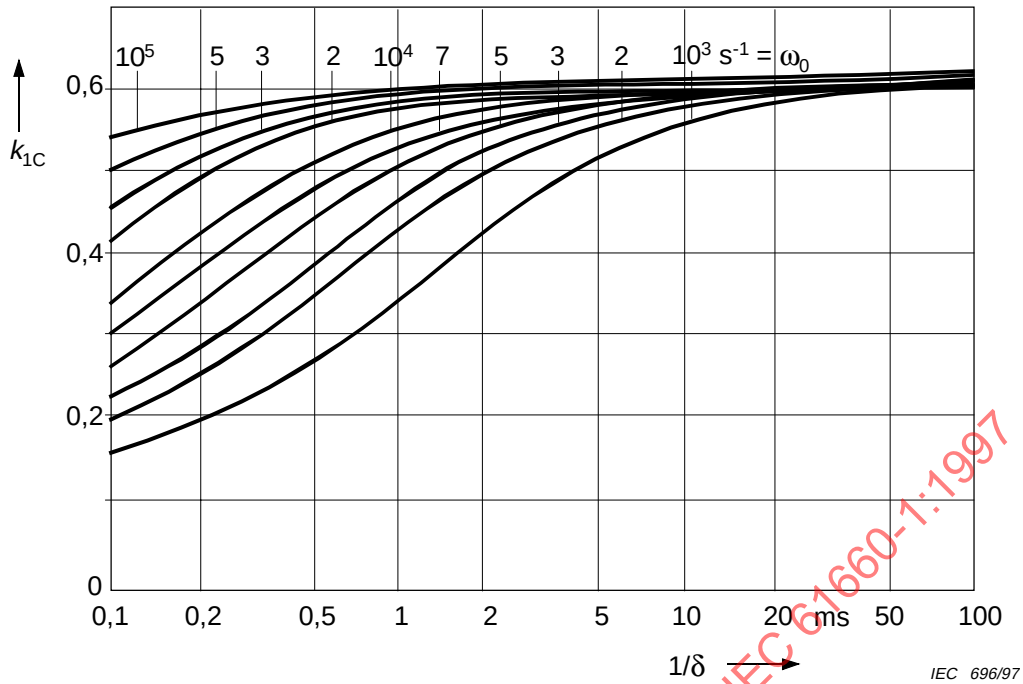


Figure 14 – Facteur k_{1C} pour déterminer la constante de temps de croissance τ_{1C}

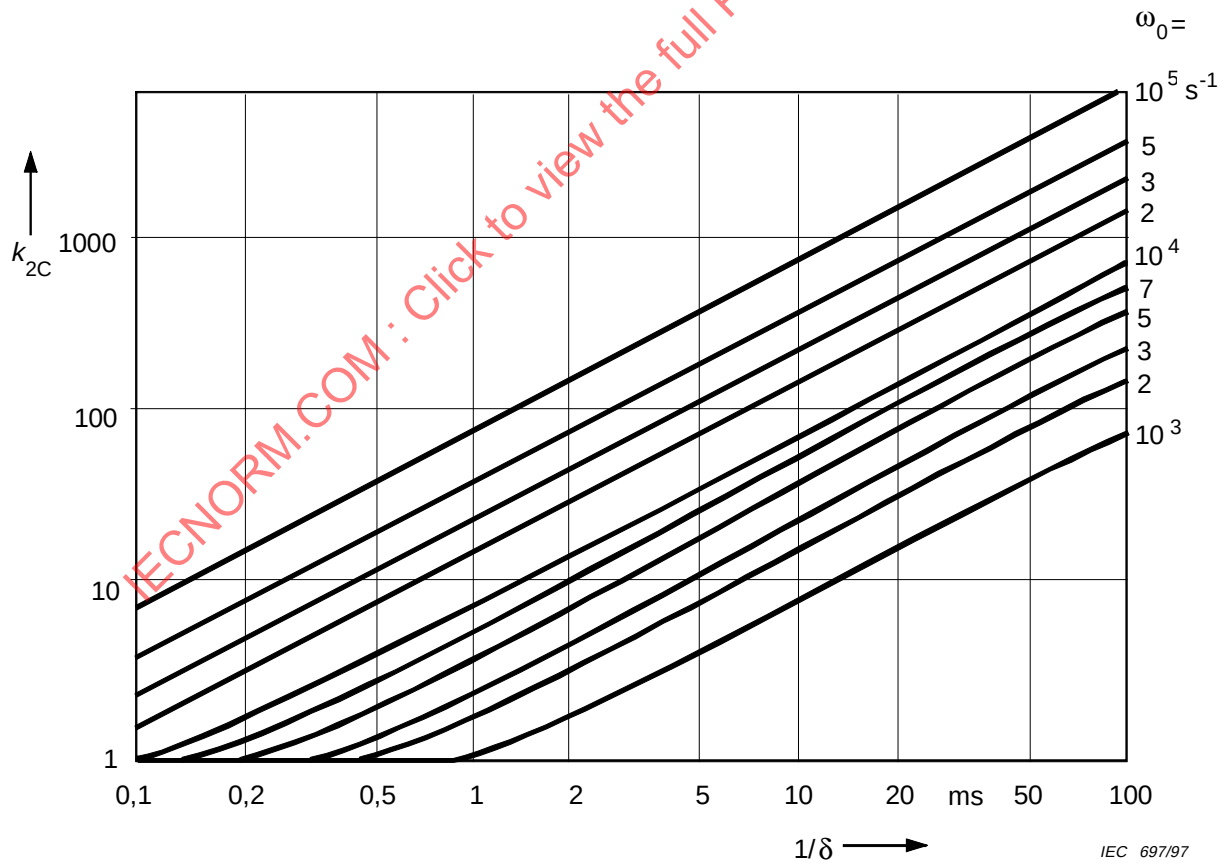


Figure 15 – Facteur k_{2C} pour déterminer la constante de temps de décroissance τ_{2C}

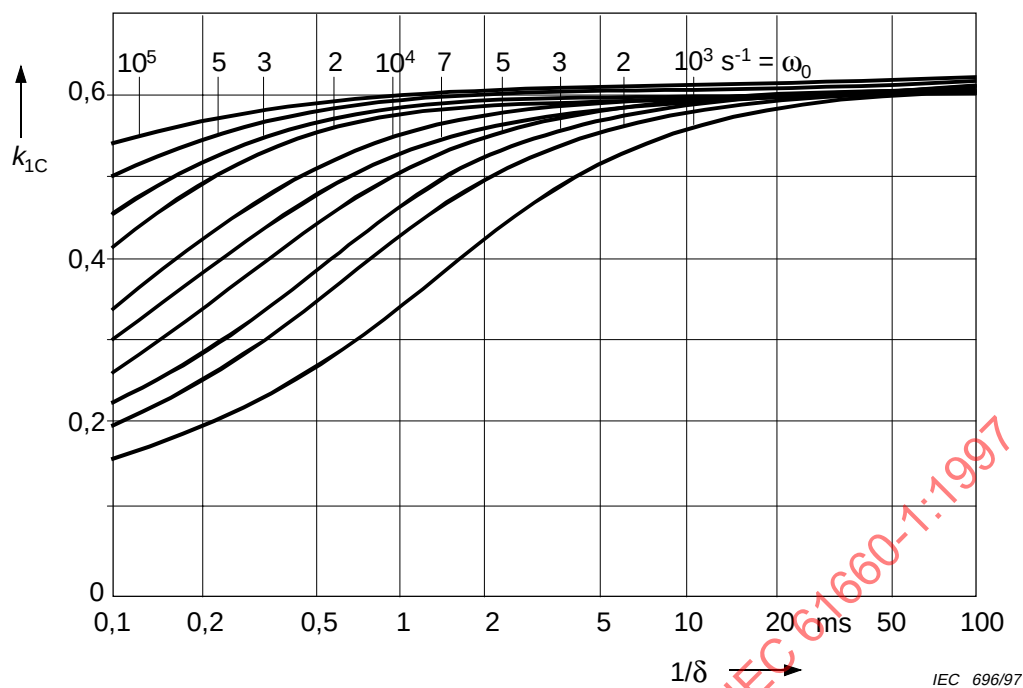


Figure 14 – Factor k_{1C} for determining the rise-time constant τ_{1C}

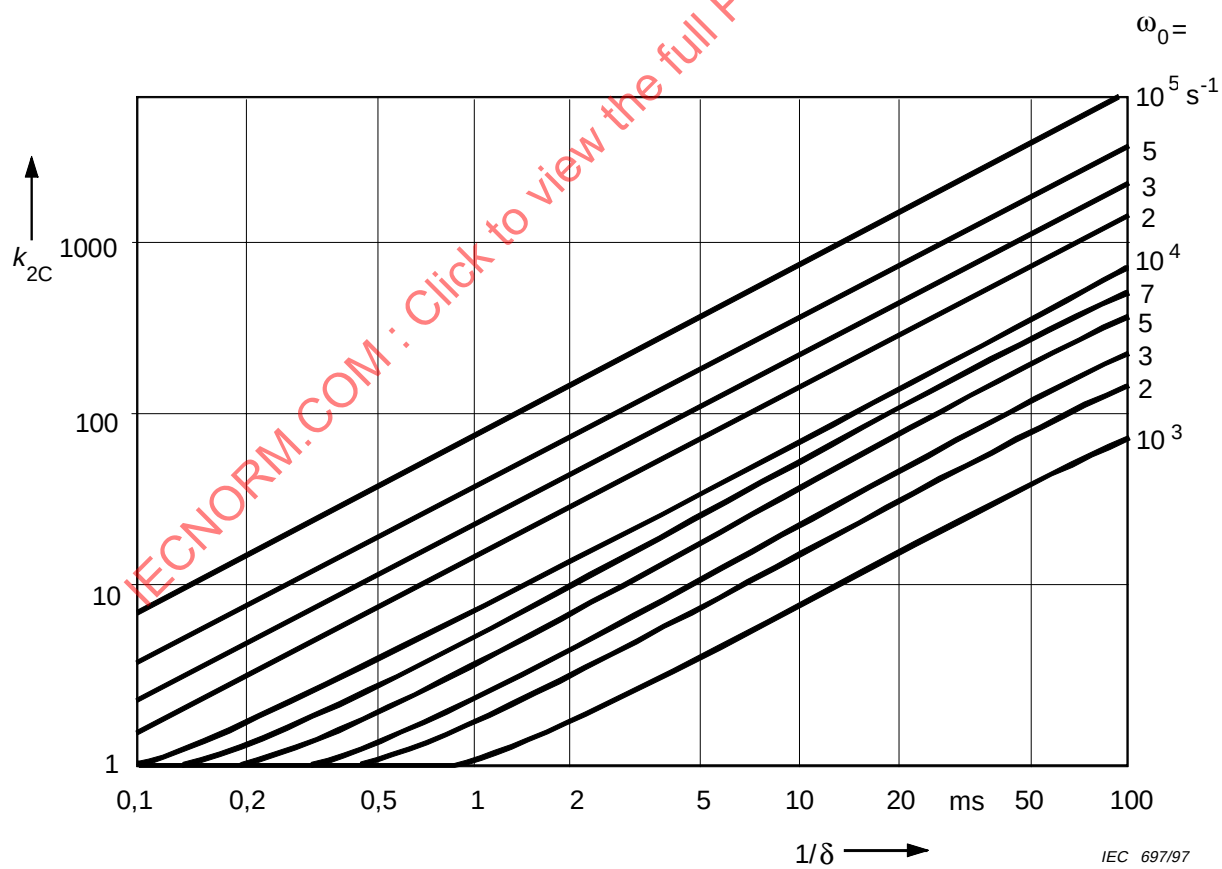


Figure 15 – Factor k_{2C} for determining the decay-time constant τ_{2C}

2.7 Moteur à courant continu à excitation indépendante

2.7.1 Diagramme du circuit équivalent et paramètres de court-circuit

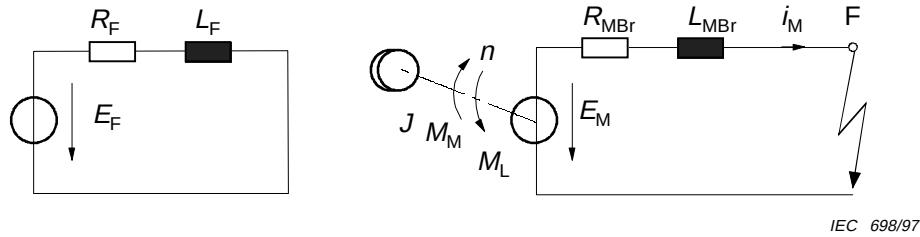


Figure 16 – Diagramme du circuit équivalent d'un moteur à courant continu excité de façon indépendante pour le calcul des courants de court-circuit

R_{MBr} et L_{MBr} , dans la figure 16, sont les abréviations pour les résistances et les inductances selon la figure 3.

$$R_{MBr} = R_M + R_{ML} + R_Y \quad (33)$$

$$L_{MBr} = L_M + L_{ML} + L_Y \quad (34)$$

$$\tau_M = \frac{L_{MBr}}{R_{MBr}} \quad (35)$$

où

- R_M, L_M sont la résistance et l'inductance du circuit de l'armature y compris les balais;
- R_{ML}, L_{ML} sont la résistance et l'inductance du conducteur dans la branche du moteur;
- R_Y, L_Y sont la résistance et l'inductance de la branche commune si elle existe;
- τ_M est la constante de temps du circuit de l'armature jusqu'au point de défaut.

Lorsque plusieurs moteurs à courant continu avec excitation indépendante sont raccordés à un système en courant continu, chacun doit être traité comme une branche indépendante.

2.7.2 Courant de court-circuit partiel

La méthode est utilisée pour déterminer les grandeurs caractéristiques de la fonction d'approximation normale selon la figure 2. Les paramètres définis en 2.7.1 doivent être utilisés.

NOTE – Lorsque la somme ΣI_{rM} des courants assignés du moteur est inférieure à 1 % du courant de court-circuit du redresseur I_{KD} , la contribution des courants du moteur à courant continu au court-circuit total peut être négligée.

2.7.2.1 Courant du court-circuit quasi permanent I_{kM}

Le courant de court-circuit quasi permanent est:

$$I_{kM} = \frac{L_F}{L_{OF}} \left(\frac{U_{rM} - R_M I_{rM}}{R_{MBr}} \right) \text{ lorsque } n = n_n = \text{constante} \quad (36)$$

2.7 DC motor with independent excitation

2.7.1 Equivalent circuit diagram and short-circuit parameters

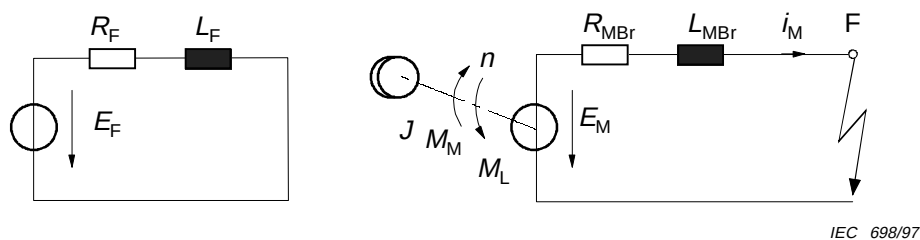


Figure 16 – Equivalent circuit diagram of an independently excited d.c. motor for the calculation of short-circuit currents

R_{MBr} and L_{MBr} in figure 16 are abbreviations for the resistances and inductances according to figure 3:

$$R_{MBr} = R_M + R_{ML} + R_Y \quad (33)$$

$$L_{MBr} = L_M + L_{ML} + L_Y \quad (34)$$

$$\tau_M = \frac{L_{MBr}}{R_{MBr}} \quad (35)$$

where

R_M, L_M is the resistance and inductance of the armature circuit including the brushes;

R_{ML}, L_{ML} is the resistance and inductance of the conductor in the motor branch;

R_Y, L_Y is the resistance and inductance of the common branch, if it exists;

τ_M is the time constant of the armature circuit up to the short-circuit location.

If several d.c. motors with independent excitation are connected to the d.c. system, then each of them has to be treated as a separate motor branch.

2.7.2 Partial short-circuit current

The method is used for determining the characteristic quantities of the standard approximation function according to figure 2. The parameters defined in 2.7.1 shall be used.

NOTE – When the sum ΣI_{rM} of the rated motor currents is less than 1 % of the rectifier short-circuit current I_{kD} , the contribution of the d.c. motor currents to the total short-circuit current may be neglected.

2.7.2.1 Quasi steady-state short-circuit current I_{kM}

The quasi steady-state short-circuit current is:

$$I_{kM} = \frac{L_F}{L_{OF}} \left(\frac{U_{rM} - R_M I_{rM}}{R_{MBr}} \right) \text{ when } n = n_n = \text{constant} \quad (36)$$

$$I_{kM} = 0 \quad \text{lorsque } n \rightarrow 0 \quad (37)$$

où

- L_F est l'inductance saturée équivalente du circuit de champ en court-circuit;
- L_{OF} est l'inductance non saturée équivalente du circuit de champ sans charge;
- U_{rM} est la tension assignée du moteur;
- I_{rM} est le courant assigné du moteur;
- n_n est la vitesse nominale du moteur.

2.7.2.2 Courant du court-circuit de crête i_{pM}

Le courant de court-circuit de crête est:

$$i_{pM} = \kappa_M \frac{U_{rM} - I_{rM} R_M}{R_{MBr}} \quad (38)$$

Pour la vitesse nominale ou la vitesse décroissante avec $\tau_{mec} \geq 10 \tau_F$, le facteur $\kappa_M = 1$.

$$\tau_{mec} = \frac{2\pi n_o J R_{MBr} I_{rM}}{M_r U_{rM}} \quad (39)$$

$$\tau_F = \frac{L_F}{R_F} \quad (40)$$

où

- τ_{mec} est la constante de temps mécanique;
- τ_F est la constante de temps du circuit de champ;
- J est le moment d'inertie des pièces tournantes;
- n_o est la vitesse à vide;
- M_r est le couple assigné du moteur.

Pour la vitesse décroissante avec $\tau_{mec} < 10 \tau_F$, le facteur κ_M , dépendant de $\frac{1}{\delta}$ et de ω_o , est donné par la figure 17, où

$$\frac{1}{\delta} = 2\tau_M \quad (41)$$

$$\omega_o = \sqrt{\frac{1}{\tau_{mec} \tau_M} \left(1 - \frac{R_M I_{rM}}{U_{rM}} \right)} \quad (42)$$

$$I_{kM} = 0 \quad \text{when } n \rightarrow 0 \quad (37)$$

where

- L_F is the equivalent saturated inductance of the field circuit at short circuit;
- L_{OF} is the equivalent unsaturated inductance of the field circuit at no load;
- U_{rM} is the rated voltage of motor;
- I_{rM} is the rated current of motor;
- n_n is the nominal speed of motor.

2.7.2.2 Peak short-circuit current i_{pM}

The peak short-circuit current is:

$$i_{pM} = \kappa_M \frac{U_{rM} - I_{rM} R_{MBr}}{R_{MBr}} \quad (38)$$

For nominal speed or decreasing speed with $\tau_{mec} \geq 10 \tau_F$, the factor $\kappa_M = 1$.

$$\tau_{mec} = \frac{2\pi n_o J R_{MBr} I_{rM}}{M_r U_{rM}} \quad (39)$$

$$\tau_F = \frac{L_F}{R_F} \quad (40)$$

where:

- τ_{mec} is the mechanical time constant;
- τ_F is the field circuit time constant;
- J is the moment of inertia of the whole rotating part;
- n_o is the no-load speed;
- M_r is the rated torque of the motor.

For decreasing speed with $\tau_{mec} < 10 \tau_F$ the factor κ_M , dependent on $\frac{1}{\delta}$ and ω_o , can be taken from figure 17, where:

$$\frac{1}{\delta} = 2\tau_M \quad (41)$$

$$\omega_o = \sqrt{\frac{1}{\tau_{mec} \tau_M} \left(1 - \frac{R_M I_{rM}}{U_{rM}} \right)} \quad (42)$$

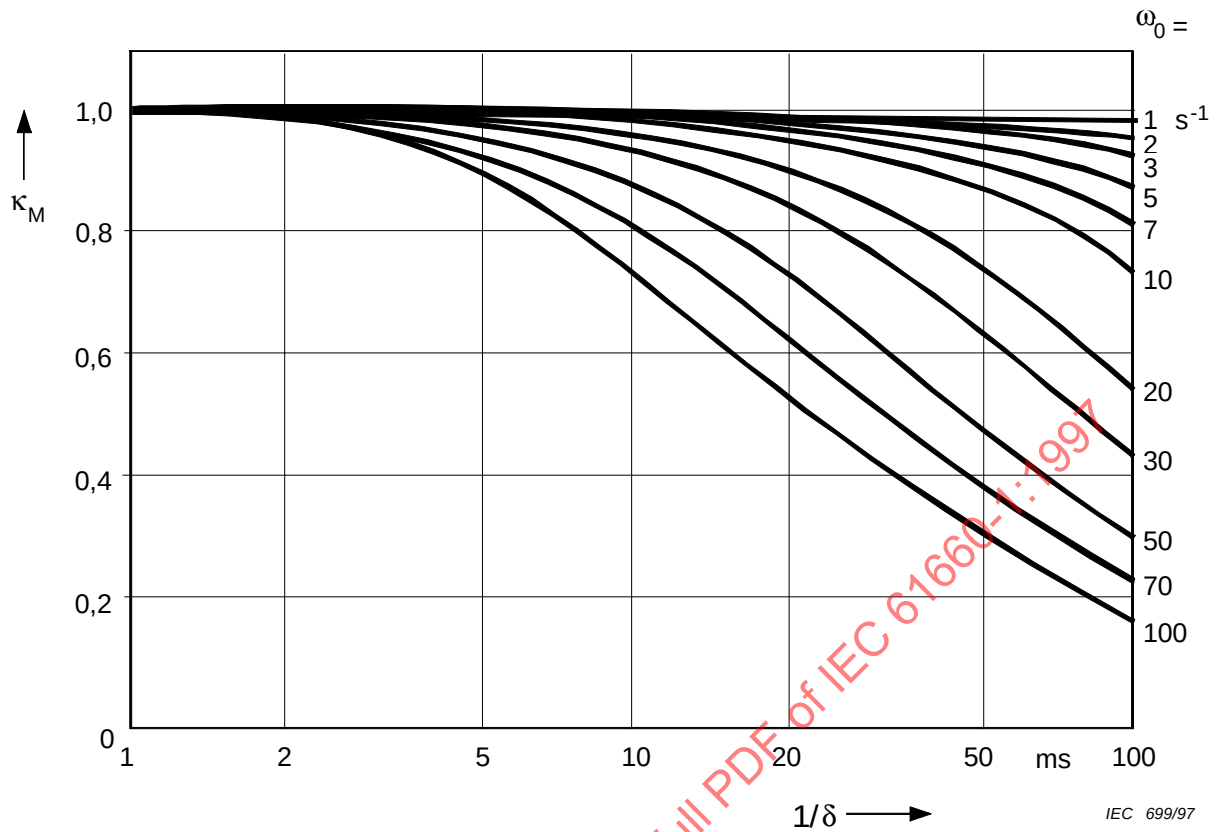


Figure 17 – Facteur κ_M pour déterminer le courant de court-circuit de crête i_{pM} avec $\tau_{mec} < 10 \tau_F$

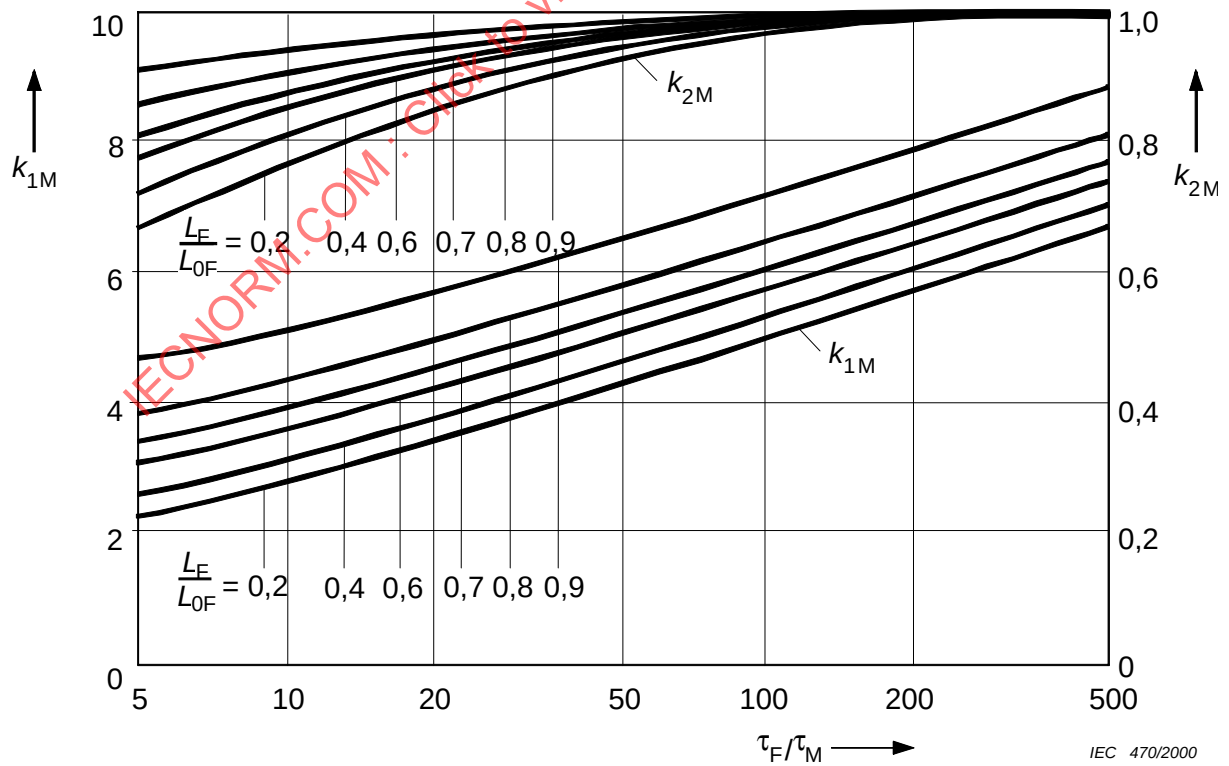


Figure 18 – Facteurs k_{1M} et k_{2M} pour déterminer le temps t_{pM} et la constante de temps de croissance τ_{1M} pour une vitesse constante et décroissante avec $\tau_{mec} \geq 10 \tau_F$

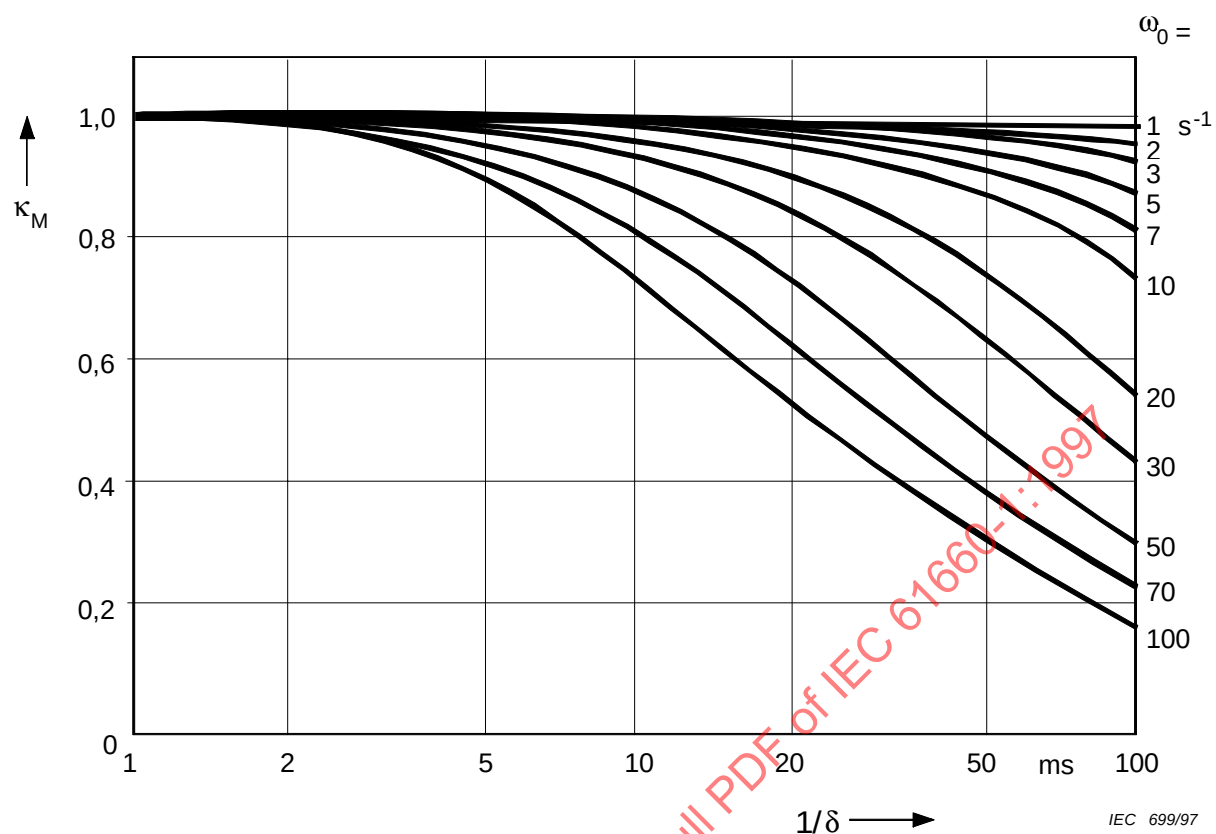


Figure 17 – Factor κ_M for determining the peak short-circuit current i_{pM} with $\tau_{mec} < 10 \tau_F$

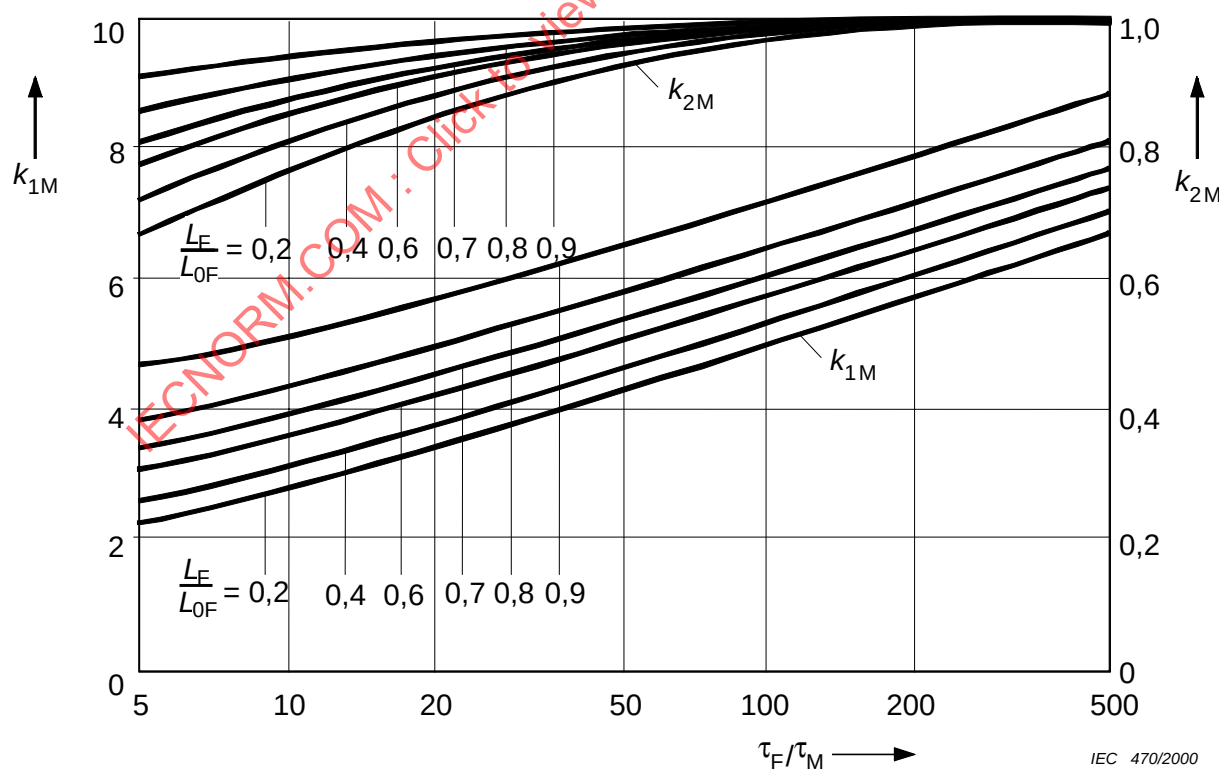


Figure 18 – Factors k_{1M} and k_{2M} for determining the time t_{pM} and the rise-time constant τ_{1M} for nominal and decreasing speed with $\tau_{mec} \geq 10 \tau_F$

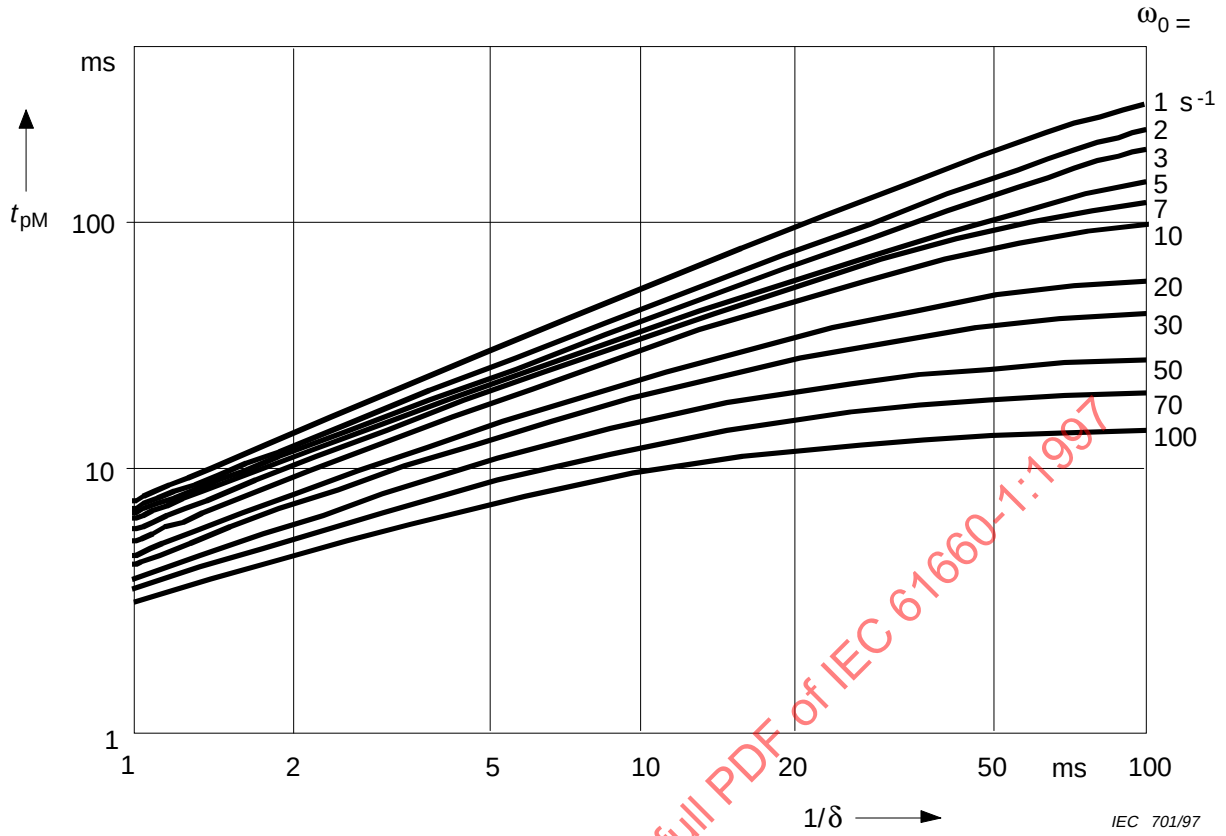


Figure 19 – Temps jusqu'à la crête t_{pM} pour la vitesse décroissante avec $\tau_{mec} < 10 \tau_F$

2.7.2.3 Temps t_{pM} jusqu'à la crête et constante de temps de croissance τ_{1M}

a) Pour la vitesse nominale et la vitesse décroissante avec $\tau_{mec} \geq 10 \tau_F$:

$$t_{pM} = k_{1M} \tau_M \quad (43)$$

et

$$\tau_{1M} = k_{2M} \tau_M \quad (44)$$

Les facteurs k_{1M} et k_{2M} dépendent de τ_F/τ_M et L_F/L_{OF} et sont donnés par la figure 18.

b) Pour la vitesse décroissante avec $\tau_{mec} < 10 \tau_F$, le temps t_{pM} , dépendant de $\frac{1}{\delta}$ et de ω_0 , est donné par la figure 19. Les grandeurs $\frac{1}{\delta}$ et ω_0 sont obtenues par les équations (41) et (42).

La constante de temps de croissance est:

$$\tau_{1M} = k_{3M} \tau_M \quad (45)$$

où k_{3M} , dépendant de $\frac{1}{\delta}$ et de ω_0 , est donné par la figure 20.

2.7.2.4 Constante de temps de décroissance τ_{2M}

a) Pour la vitesse nominale et la vitesse décroissante avec $\tau_{mec} \geq 10 \tau_F$:

$$\tau_{2M} = \tau_F \text{ quand } n = n_n = \text{constante} \quad (46)$$

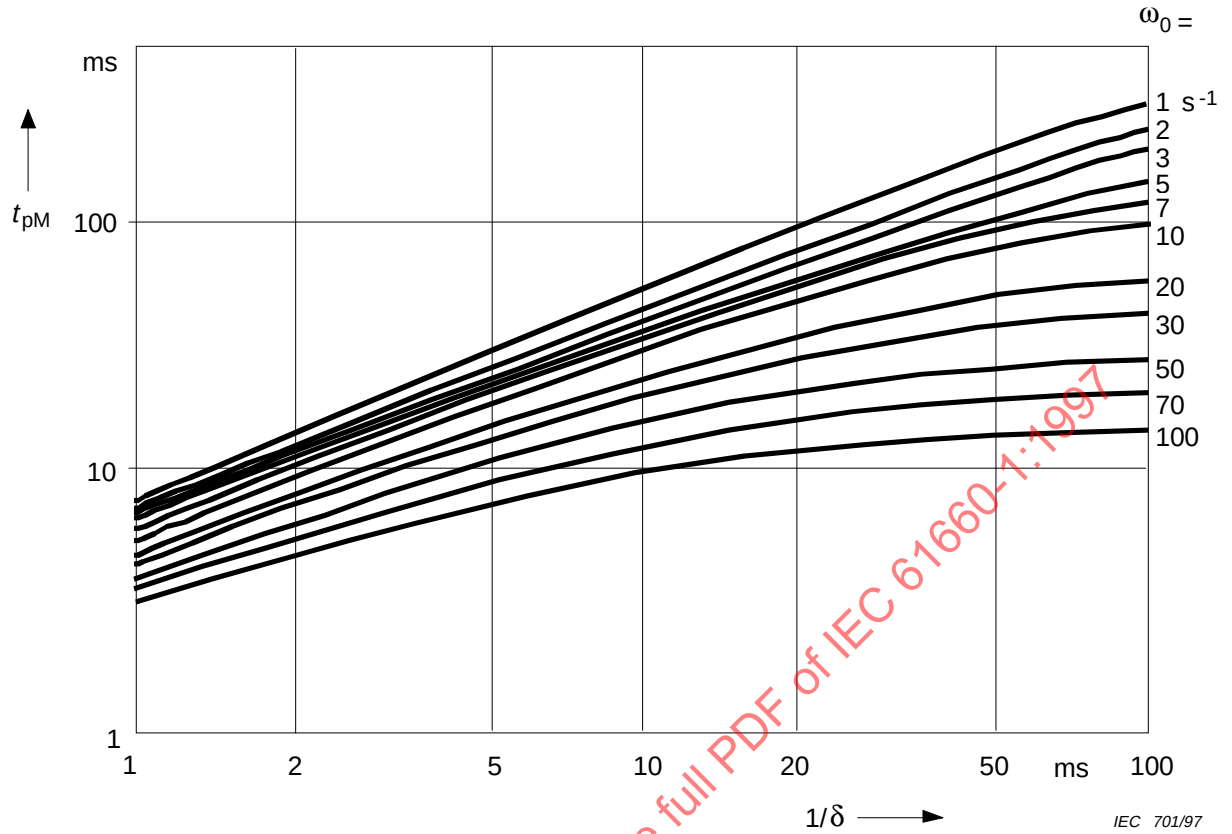


Figure 19 – Time to peak t_{pM} for decreasing speed with $\tau_{mec} < 10 \tau_F$

2.7.2.3 Time to peak t_{pM} and rise-time constant τ_{1M}

a) For nominal speed or decreasing speed with $\tau_{mec} \geq 10 \tau_F$:

$$t_{pM} = k_{1M} \tau_M \quad (43)$$

and

$$\tau_{1M} = k_{2M} \tau_M \quad (44)$$

The factors k_{1M} and k_{2M} , dependent on τ_F/τ_M and L_F/L_{OF} , are taken from figure 18.

b) For decreasing speed with $\tau_{mec} < 10 \tau_F$, the time t_{pM} , dependent on $\frac{1}{\delta}$ and ω_0 , is taken from figure 19. The quantities $\frac{1}{\delta}$ and ω_0 are obtained from equations (41) and (42).

The rise-time constant is:

$$\tau_{1M} = k_{3M} \tau_M \quad (45)$$

where k_{3M} , dependent on $\frac{1}{\delta}$ and ω_0 , is taken from figure 20.

2.7.2.4 Decay-time constant τ_{2M}

a) For nominal speed or decreasing speed with $\tau_{mec} \geq 10 \tau_F$:

$$\tau_{2M} = \tau_F \text{ when } n = n_h = \text{constant} \quad (46)$$