

**RAPPORT
TECHNIQUE
TECHNICAL
REPORT**

**CEI
IEC**

TR 61660-3

Première édition
First edition
2000-02

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

**Partie 3:
Exemples de calculs**

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

**Part 3:
Examples of calculations**



Numéro de référence
Reference number
IEC/TR 61660-3:2000

Numéros des publications

Depuis le 1er janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000.

Publications consolidées

Les versions consolidées de certaines publications de la CEI incorporant les amendements sont disponibles. Par exemple, les numéros d'édition 1.0, 1.1 et 1.2 indiquent respectivement la publication de base, la publication de base incorporant l'amendement 1, et la publication de base incorporant les amendements 1 et 2.

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 dans le Catalogue de la CEI.

Les renseignements relatifs à des questions à l'étude et des travaux en cours entrepris par le comité technique qui a établi cette publication, ainsi que la liste des publications établies, se trouvent dans les documents ci-dessous:

- **«Site web» de la CEI***
- **Catalogue des publications de la CEI**
Publié annuellement et mis à jour régulièrement
(Catalogue en ligne)*
- **Bulletin de la CEI**
Disponible à la fois au «site web» de la CEI* et comme périodique imprimé

Terminologie, symboles graphiques et littéraux

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la CEI 60050: *Vocabulaire Electrotechnique International* (VEI).

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*, et la CEI 60617: *Symboles graphiques pour schémas*.

* Voir adresse «site web» sur la page de titre.

Numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series.

Consolidated publications

Consolidated versions of some IEC publications including amendments are available. For example, edition numbers 1.0, 1.1 and 1.2 refer, respectively, to the base publication, the base publication incorporating amendment 1 and the base publication incorporating amendments 1 and 2.

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 in the IEC catalogue.

Information on the subjects under consideration and work in progress undertaken by the technical committee which has prepared this publication, as well as the list of publications issued, is to be found at the following IEC sources:

- **IEC web site***
- **Catalogue of IEC publications**
Published yearly with regular updates
(On-line catalogue)*
- **IEC Bulletin**
Available both at the IEC web site* and as a printed periodical

Terminology, graphical and letter symbols

For general terminology, readers are referred to IEC 60050: *International Electrotechnical Vocabulary* (IEV).

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* and IEC 60617: *Graphical symbols for diagrams*.

* See web site address on title page.

**RAPPORT
TECHNIQUE
TECHNICAL
REPORT**

**CEI
IEC**

TR 61660-3

Première édition
First edition
2000-02

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

**Partie 3:
Exemples de calculs**

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

**Part 3:
Examples of calculations**

© IEC 2000 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 photo-copie 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

X

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

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS.....	4
Articles	
1 Généralités	8
1.1 Domaine d'application et objet	8
1.2 Documents de référence	8
1.3 Définitions, symboles et indices, et équations.....	8
2 Installation alimentée en courant continu et données sur le matériel.....	10
3 Calcul du courant de court-circuit	12
3.1 Emplacement du court-circuit F1	12
3.2 Emplacement du court-circuit F2	26
3.3 Emplacement du court-circuit F3	40
3.4 Emplacement du court-circuit F4	54
4 Calcul des effets mécaniques et thermiques.....	72
4.1 Effets mécaniques	72
4.2 Effets thermiques	88
Annexe A – Facteur de correction σ_j pour les courants de court-circuit partiels en F3 de la figure 1.....	92
Figure 1 – Installation alimentée en 220 V continu et emplacements des court-circuits F1 ... F4 – Données électriques concernant le matériel	10
Figure 2 – Courants de court-circuit partiels et courant de court-circuit $i_k(t)$ à l'emplacement du court-circuit F1 (voir figure 1)	24
Figure 3 – Courants de court-circuit partiels corrigés, et courant de court-circuit $i_k(t)$ à l'emplacement du court-circuit F2 (voir figure 1)	38
Figure 4 – Courants de court-circuit partiels, corrigés, et courant de court-circuit $i_k(t)$ à l'emplacement du court-circuit F3 (voir figure 1)	52
Figure 5 – Courants de court-circuit partiels corrigés, et courants de court-circuit $i_k(t)$ en L1 et à l'emplacement du court-circuit F4 (voir figure 1).....	70
Figure 6 – Disposition des conducteurs et des éléments de renfort.....	72
Figure A.1 – Schéma pour le calcul de σ_j dans le cas de F3 selon la figure 1.....	92
Tableau 1 – Courants de court-circuit en F1	22
Tableau 2 – Résistances R_{ij} et R_{resj}	34
Tableau 3 – Courants de court-circuit partiels et courant de court-circuit total en F2	36
Tableau 4 – Courants de court-circuit partiels et courant de court-circuit en F3.....	48
Tableau 5 – Résistances R_{ij} et R_{resj}	62
Tableau 6 – Courants de court-circuit partiels et courants de court-circuit total en L1 et F4.....	64

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
Clause	
1 General.....	9
1.1 Scope and object.....	9
1.2 Reference documents	9
1.3 Definitions, symbols, subscripts and equations	9
2 DC installation and data of the equipment	11
3 Short-circuit current calculation	13
3.1 Short-circuit location F1	13
3.2 Short-circuit location F2	27
3.3 Short-circuit location F3	41
3.4 Short-circuit location F4	55
4 Calculation of the mechanical and thermal effects.....	73
4.1 Mechanical effects	73
4.2 Thermal effect	89
Annex A – Correction factor σ_j for the partial short-circuit currents in F3 of figure 1	93
Figure 1 – 220 V d.c. installation and short-circuit locations F1 ... F4 – Electrical equipment data.....	11
Figure 2 – Partial short-circuit currents and short-circuit current $i_k(t)$ at the short-circuit location F1 (see figure 1)	25
Figure 3 – Partial short-circuit currents, corrected, and short-circuit current $i_k(t)$ at the short-circuit location F2 (see figure 1).....	39
Figure 4 – Partial short-circuit currents, corrected, and short-circuit current $i_k(t)$ at the short-circuit location F3 (see figure 1).....	53
Figure 5 – Partial short-circuit currents, corrected, and short-circuit currents $i_k(t)$ in L1 and at the short-circuit location F4 (see figure 1)	71
Figure 6 – Arrangement of conductors and stiffening elements.....	73
Figure A.1 – Scheme for the calculation of σ_j in the case of F3 in figure 1	93
Table 1 – Short-circuit currents in F1	23
Table 2 – R_{ij} and R_{resj} resistances	35
Table 3 – Partial short-circuit currents and total short-circuit current in F2	37
Table 4 – Partial short-circuit currents and short-circuit current in F3	49
Table 5 – R_{ij} and R_{resj} resistances	63
Table 6 – Partial short-circuit currents and total short-circuit currents in L1 and F4	65

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**COURANTS DE COURT-CIRCUIT DANS LES INSTALLATIONS
AUXILIAIRES ALIMENTÉES EN COURANT CONTINU
DANS LES CENTRALES ET LES POSTES –****Partie 3: Exemples de calculs**

AVANT-PROPOS

- 1) La CEI (Commission Électrotechnique 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, spécifications techniques, 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 du présent rapport technique 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 tâche principale des comités d'études de la CEI est l'élaboration des Normes internationales. Toutefois, un comité d'études peut proposer la publication d'un rapport technique lorsqu'il 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.

Un rapport technique ne doit pas nécessairement être révisé avant que les données qu'il contient ne soient plus jugées valables ou utiles par le groupe de maintenance.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**SHORT-CIRCUIT CURRENTS IN DC AUXILIARY INSTALLATIONS
IN POWER PLANTS AND SUBSTATIONS –****Part 3: Examples of calculations**

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 specifications, 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 technical report may be the subject of patent rights. The IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

The main task of IEC technical committees is to prepare International Standards. However, a technical committee may propose the publication of a technical report when it 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 do not necessarily have to be reviewed until the data they provide are considered to be no longer valid or useful by the maintenance team.

La CEI 61660-3 qui est un rapport technique, a été établie par le comité d'études 73 de la CEI: Courants de court-circuit.

Ce rapport technique doit être utilisé conjointement avec la CEI 61660-1 et la CEI 61660-2.

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

Projet d'enquête	Rapport de vote
73/106/CDV	73/109/RVC

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.

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/CEI, Partie 3.

Ce document, purement informatif, ne doit pas être considéré comme une Norme internationale.

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: Calcul des courants de court-circuit
- Partie 2: Calcul des effets
- Partie 3: Exemples de calculs

IEC 61660-3, which is a technical report, has been prepared by IEC technical committee 73: Short-circuit currents.

This technical report should be read in conjunction with IEC 61660-1 and IEC 61660-2.

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

Enquiry draft	Report on voting
73/106/CDV	73/109/RVC

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 publication has been drafted in accordance with ISO/IEC Directives, Part 3.

This document which is purely informative is not to be regarded as an International Standard.

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: Calculation of short-circuit currents
- Part 2: Calculation of effects
- Part 3: Examples of calculations

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

Partie 3: Exemples de calculs

1 Généralités

1.1 Domaine d'application et objet

La CEI 61660-3 qui est un rapport technique fournit une aide pour appliquer la CEI 61660-1 et la CEI 61660-2. Par conséquent, le calcul destiné aux installations alimentées en courant continu indiquées à la figure 1 sont strictement réalisées en conformité avec la CEI 61660-1 et la CEI 61660-2.

Le schéma d'installation correspondant à l'emplacement du court-circuit F3 de la figure 1 ne correspond pas à la figure 3 de la CEI 61660-1. Par conséquent, des considérations supplémentaires portant sur le facteur de correction σ_j sont nécessaires et il convient de consulter l'annexe A.

La ligne de connexion L1 de la figure 1 est constituée de barres en cuivre (voir article 4). Les lignes de connexion L2 et L3 sont des connexions par câble. Par conséquent, les effets mécaniques et thermiques sont uniquement calculés pour L1 en cas de court-circuit à l'emplacement F4.

1.2 Documents de référence

CEI 61660-1:1997, 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

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

CEI 60909-0:—, Courants de court-circuit dans les réseaux triphasés à courant alternatif – Partie 0: Calcul des courants¹⁾

1.3 Définitions, symboles et indices, et équations

Les définitions, les symboles et indices, ainsi que les équations, sont les mêmes que dans la CEI 61660-1 et dans la CEI 61660-2. Les références données à l'article 3 correspondent à la CEI 61660-1 et les références données à l'article 4 correspondent à la CEI 61660-2. Ces références sont indiquées entre crochets.

¹⁾ A publier.

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

Part 3: Examples of calculations

1 General

1.1 Scope and object

IEC 61660-3 which is a technical report gives help for the application of IEC 61660-1 and IEC 61660-2. Therefore, the calculations for the d.c. installation in figure 1 are strictly carried out in accordance with IEC 61660-1 and 61660-2.

The installation scheme with respect to the short-circuit location F3 in figure 1 does not correspond to figure 3 of IEC 61660-1. Therefore, additional considerations related to the correction factor σ_j are necessary and annex A should be consulted.

The connecting line L1 in figure 1 consists of copper bars (see clause 4). The lines L2 and L3 are cable connections. Therefore, the mechanical and thermal effects are calculated only for L1 in case of a short circuit at the location F4.

1.2 Reference documents

IEC 61660-1:1997, Short-circuit currents in d.c. auxiliary installations in power plants and substations – Part 1: Calculation of short-circuit currents

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

IEC 60909-0:—, Short-circuit currents in three-phase a.c. systems – Part 0: Calculation of currents¹⁾

1.3 Definitions, symbols, subscripts and equations

Definitions, symbols, subscripts and equations are the same as those used in IEC 61660-1 and IEC 61660-2. References in square brackets in clause 3 relate to IEC 61660-1 and references in square brackets in clause 4 relate to IEC 61660-2.

¹⁾ To be published.

2 Installation alimentée en courant continu et données sur le matériel

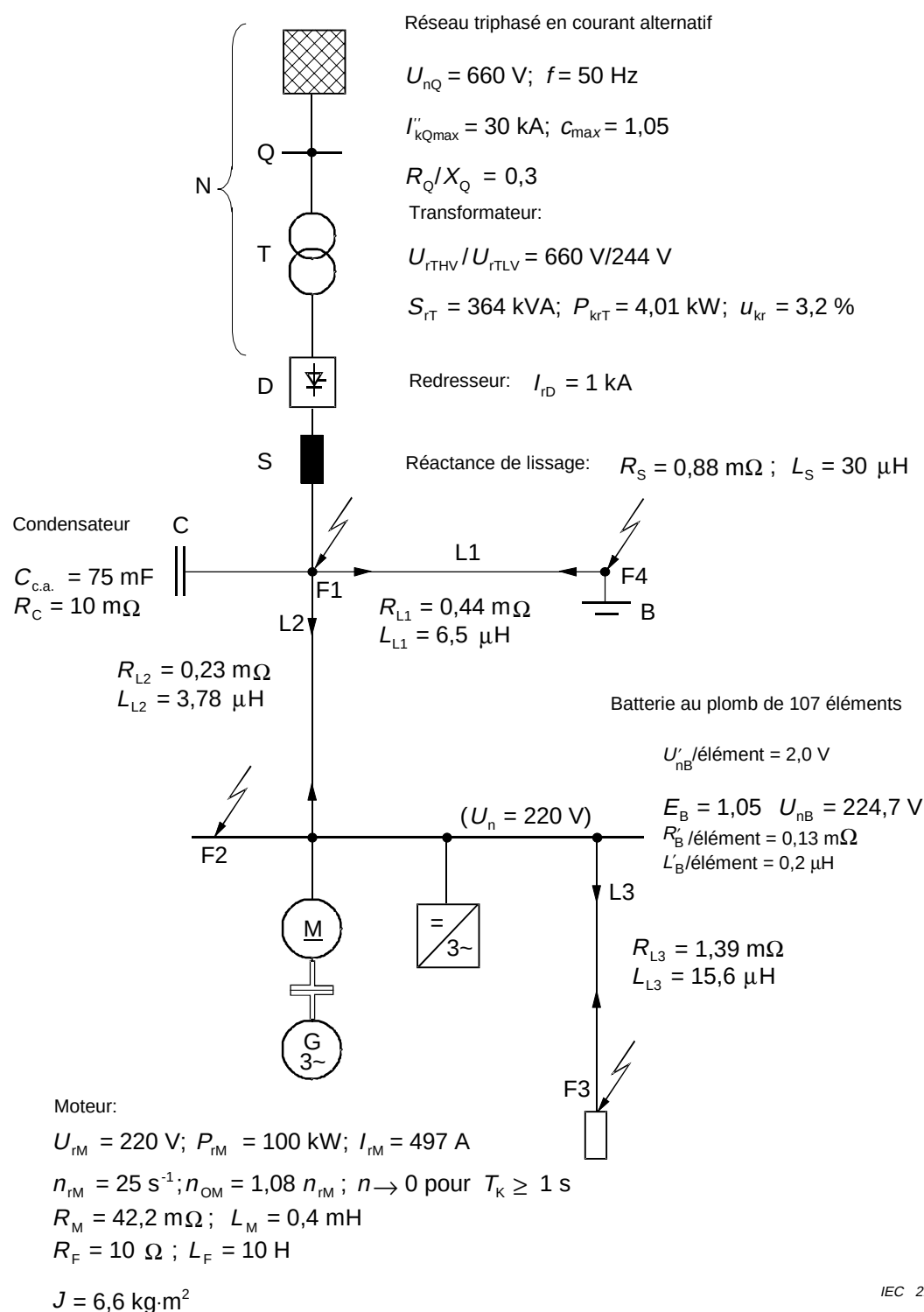


Figure 1 – Installation alimentée en 220 V continu et emplacements des court-circuits F1 ... F4 – Données électriques concernant le matériel

2 DC installation and data of the equipment

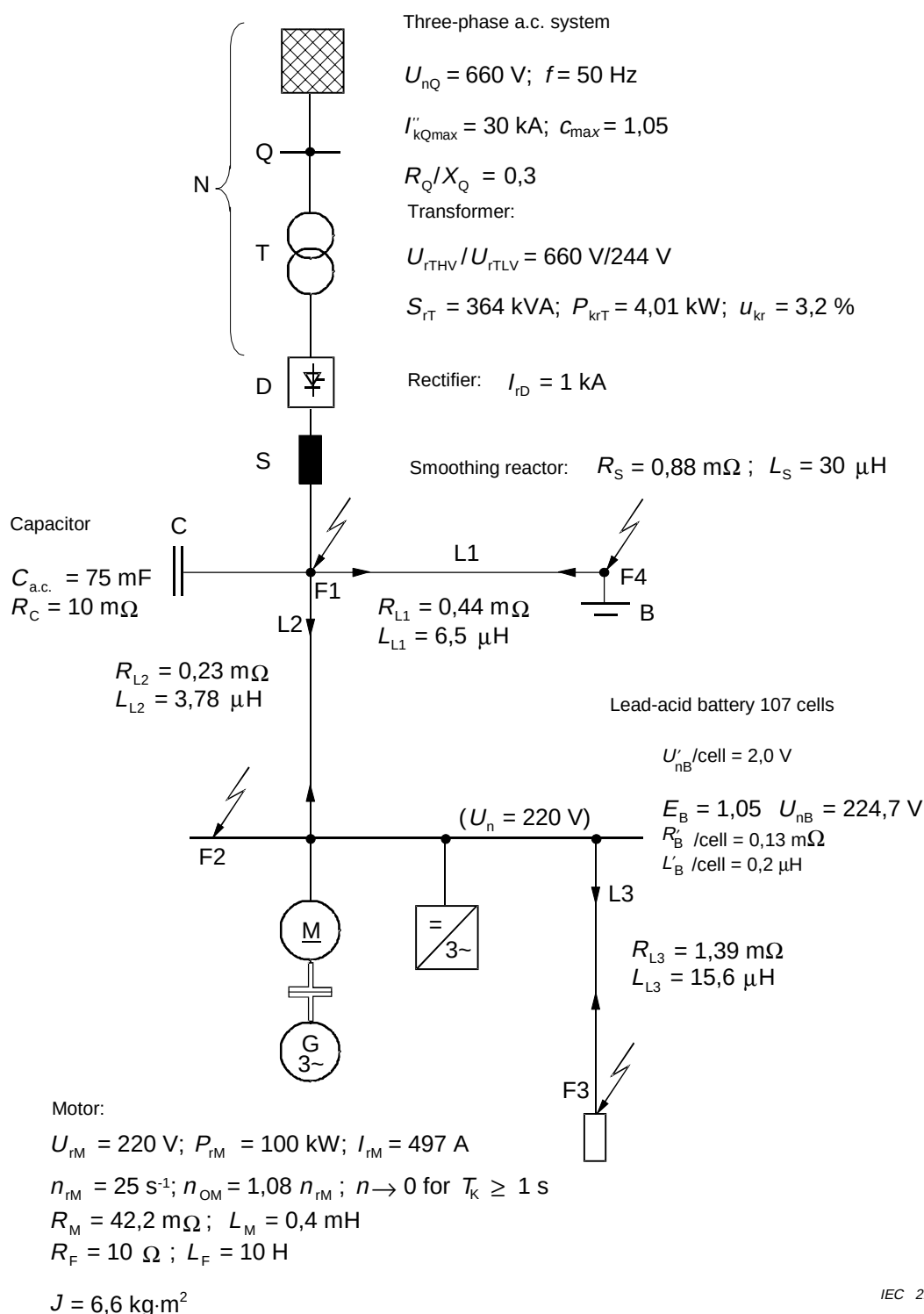


Figure 1 – 220 V d.c. installation and short-circuit locations F1 ... F4 – Electrical equipment data

3 Calcul du courant de court-circuit

Les courants de court-circuit les plus importants doivent être calculés aux emplacements de court-circuit F1 ... F4. La durée du court-circuit dans cet exemple est prise égale à $T_k = 0,1$ s. Cette valeur est utilisée pour trouver la fonction d'approximation normalisée [figure 2]. Le courant total de court-circuit en fin de court-circuit est supposé être le courant de court-circuit I_k , quasi permanent s'écartant de la définition citée en [1.3.7].

NOTE Pour trouver les courants de court-circuit partiel $i_D(t)$, $i_B(t)$, $i_C(t)$ et $i_M(t)$, les courants de court-circuit quasi permanent $I_{kD}(t)$, $I_{kB}(t)$, $I_{kC}(t)$ et $I_{kM}(t)$ sont les valeurs envisagées des courants de court-circuit 1 s après de début du court-circuit.

3.1 Emplacement du court-circuit F1

3.1.1 Courant de court-circuit partiel du redresseur D

Impédance de court-circuit du réseau triphasé à courant alternatif au point de connexion Q, conformément à la CEI 60909-0 et avec le facteur $c = c_{\max} = 1,05$ (tableau 1 de la CEI 60909-0). Indice t pour l'impédance transposée du côté basse tension du transformateur.

$$Z_{Qt} = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3}I''_{kQ\max}} \left[\frac{U_{rTLV}}{U_{rTHV}} \right]^2 = \frac{1,05 \times 660 \text{ V}}{\sqrt{3} \times 30 \text{ kA}} \left[\frac{244 \text{ V}}{660 \text{ V}} \right]^2 = 1,823 \text{ m}\Omega$$

$$X_{Qt} = \frac{Z_{Qt}}{\sqrt{1 + (R_{Qt}/X_{Qt})^2}} = \frac{1,823 \text{ m}\Omega}{\sqrt{1 + (0,3)^2}} = 1,746 \text{ m}\Omega$$

$$R_{Qt} = 0,3 X_{Qt} = 0,524 \text{ m}\Omega$$

Impédance du transformateur T:

$$Z_{TLV} = \frac{u_{kr}}{100 \%} \frac{U_{rTLV}^2}{S_{rT}} = \frac{3,2 \%}{100 \%} \frac{(244 \text{ V})^2}{364 \text{ kVA}} = 5,234 \text{ m}\Omega$$

$$R_{TLV} = P_{krT} \frac{U_{rTLV}^2}{S_{rT}^2} = 4,01 \text{ kW} \frac{(244 \text{ V})^2}{(364 \text{ kVA})^2} = 1,802 \text{ m}\Omega$$

$$X_{TLV} = \sqrt{Z_{TLV}^2 - R_{TLV}^2} = \sqrt{5,234^2 - 1,802^2} \text{ m}\Omega = 4,914 \text{ m}\Omega$$

Résistances et réactances du côté alternatif à l'emplacement du redresseur [équations (8) et (9)]:

$$\left. \begin{aligned} R_N &= R_{Qt} + R_{TLV} = 0,524 \text{ m}\Omega + 1,802 \text{ m}\Omega = 2,326 \text{ m}\Omega \\ X_N &= X_{Qt} + X_{TLV} = 1,746 \text{ m}\Omega + 4,914 \text{ m}\Omega = 6,660 \text{ m}\Omega \end{aligned} \right\} Z_N = 7,054 \text{ m}\Omega$$

$$L_N = X_N / 2\pi f = 6,66 \text{ m}\Omega / 2\pi 50 \text{ Hz} = 21,2 \text{ }\mu\text{H}$$

3 Short-circuit current calculation

Maximum short-circuit currents shall be calculated at the short-circuit locations F1 ... F4. The short-circuit duration in this example is taken as $T_k = 0,1$ s. This value is used to find the standard approximation function [figure 2]. The total short-circuit current at the end of the short-circuit duration is assumed as quasi steady-state short-circuit current I_k , deviating from the definition in [1.3.7].

NOTE To find the partial short-circuit currents $i_D(t)$, $i_B(t)$, $i_C(t)$ and $i_M(t)$, the quasi steady-state short-circuit currents $I_{kD}(t)$, $I_{kB}(t)$, $I_{kC}(t)$ and $I_{kM}(t)$ are the prospected values of the short-circuit currents at 1 s after the beginning of the short circuit.

3.1 Short-circuit location F1

3.1.1 Partial short-circuit current of the rectifier D

Short-circuit impedance of the three-phase a.c. system at the connection point Q according to IEC 60909-0 with the factor $c = c_{\max} = 1,05$ (table 1 of IEC 60909-0). Index t for the transferred impedance to the low-voltage side of the transformer.

$$Z_{Qt} = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3}I''_{kQ\max}} \left[\frac{U_{rTLV}}{U_{rTHV}} \right]^2 = \frac{1,05 \times 660 \text{ V}}{\sqrt{3} \times 30 \text{ kA}} \left[\frac{244 \text{ V}}{660 \text{ V}} \right]^2 = 1,823 \text{ m}\Omega$$

$$X_{Qt} = \frac{Z_{Qt}}{\sqrt{1 + (R_{Qt}/X_{Qt})^2}} = \frac{1,823 \text{ m}\Omega}{\sqrt{1 + (0,3)^2}} = 1,746 \text{ m}\Omega$$

$$R_{Qt} = 0,3 X_{Qt} = 0,524 \text{ m}\Omega$$

Impedance of the transformer T:

$$Z_{TLV} = \frac{u_{kr}}{100 \%} \frac{U_{rTLV}^2}{S_{rT}} = \frac{3,2 \%}{100 \%} \frac{(244 \text{ V})^2}{364 \text{ kVA}} = 5,234 \text{ m}\Omega$$

$$R_{TLV} = P_{krT} \frac{U_{rTLV}^2}{S_{rT}^2} = 4,01 \text{ kW} \frac{(244 \text{ V})^2}{(364 \text{ kVA})^2} = 1,802 \text{ m}\Omega$$

$$X_{TLV} = \sqrt{Z_{TLV}^2 - R_{TLV}^2} = \sqrt{5,234^2 - 1,802^2} \text{ m}\Omega = 4,914 \text{ m}\Omega$$

Resistances and reactances of the a.c. side at the location of the rectifier [equations (8) and (9)]:

$$\left. \begin{aligned} R_N &= R_{Qt} + R_{TLV} = 0,524 \text{ m}\Omega + 1,802 \text{ m}\Omega = 2,326 \text{ m}\Omega \\ X_N &= X_{Qt} + X_{TLV} = 1,746 \text{ m}\Omega + 4,914 \text{ m}\Omega = 6,660 \text{ m}\Omega \end{aligned} \right\} Z_N = 7,054 \text{ m}\Omega$$

$$L_N = X_N / 2\pi f = 6,66 \text{ m}\Omega / 2\pi 50 \text{ Hz} = 21,2 \text{ }\mu\text{H}$$

Résistance et inductance du côté continu de la branche du redresseur [équations (11) et (12)]:

$$R_{\text{DBr}} = R_S = 0,88 \text{ m}\Omega$$

$$L_{\text{DBr}} = L_S = 30 \text{ }\mu\text{H}$$

Ceci conduit aux égalités suivantes:

$$\frac{R_N}{X_N} = \frac{2,326 \text{ m}\Omega}{6,660 \text{ m}\Omega} = 0,349$$

$$\frac{R_{\text{DBr}}}{R_N} = \frac{0,88 \text{ m}\Omega}{2,326 \text{ m}\Omega} = 0,378$$

$$\frac{L_{\text{DBr}}}{L_N} = \frac{30 \text{ }\mu\text{H}}{21,2 \text{ }\mu\text{H}} = 1,415$$

Courant de court-circuit quasi permanent I_{kD} [équation (13)]:

$$I_{\text{kD}} = \lambda_D \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \times \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_N} \times \frac{U_{\text{rTLV}}}{U_{\text{rTHV}}} = 0,974 \times \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \times \frac{1,05 \times 660 \text{ V}}{\sqrt{3} \times 7,054 \text{ m}\Omega} \times \frac{244 \text{ V}}{660 \text{ V}} = 27,58 \text{ kA}$$

avec $\lambda_D = 0,974$ provenant de la [figure 7 ou de l'équation (54)]

Courant de court-circuit de crête i_{pD} [équation (14)]:

$$i_{\text{pD}} = \kappa_D I_{\text{kD}} = 1,14 \times 27,58 \text{ kA} = 31,44 \text{ kA}$$

où $\kappa_D = 1,14$ [figure 8] en fonction de

$$\frac{R_N}{X_N} \left[1 + \frac{2}{3} \times \frac{R_{\text{DBr}}}{R_N} \right] = 0,349 \left(1 + \frac{2}{3} \times 0,378 \right) = 0,437 \text{ and } \frac{L_{\text{DBr}}}{L_N} = 1,415$$

Temps pour atteindre la crête t_{pD} [équation (16)] pour $L_{\text{DBr}}/L_N > 1$:

$$t_{\text{pD}} = \left[(3\kappa_D + 6) + 4 \left(\frac{L_{\text{DBr}}}{L_N} - 1 \right) \right] \text{ ms} = [(3 \times 1,14 + 6) + 4(1,415 - 1)] \text{ ms} = 11,08 \text{ ms} \approx 11,1 \text{ ms}$$

Constante de temps de croissance τ_{1D} [équation (17)] pour $\kappa_D \geq 1,05$:

$$\tau_{1D} = \left[2 + (\kappa_D - 0,9) \left(2,5 + 9 \frac{L_{\text{DBr}}}{L_N} \right) \right] \text{ ms} = [2 + (1,14 - 0,9) (2,5 + 9 \times 1,415)] \text{ ms} = 5,66 \text{ ms} \approx 5,7 \text{ ms}$$

Constante de temps de décroissance τ_{2D} [équation (19)]:

$$\tau_{2D} = \frac{2 \text{ ms}}{\frac{R_N}{X_N} \left[0,6 + 0,9 \frac{R_{\text{DBr}}}{R_N} \right]} = \frac{2 \text{ ms}}{0,349 (0,6 + 0,9 \times 0,378)} = 6,095 \text{ ms} \approx 6,1 \text{ ms}$$

Resistance and inductance of the d.c. side of the rectifier branch [equations (11) and (12)]:

$$R_{\text{DBr}} = R_S = 0,88 \text{ m}\Omega$$

$$L_{\text{DBr}} = L_S = 30 \text{ }\mu\text{H}$$

This leads to the following relations:

$$\frac{R_N}{X_N} = \frac{2,326 \text{ m}\Omega}{6,660 \text{ m}\Omega} = 0,349$$

$$\frac{R_{\text{DBr}}}{R_N} = \frac{0,88 \text{ m}\Omega}{2,326 \text{ m}\Omega} = 0,378$$

$$\frac{L_{\text{DBr}}}{L_N} = \frac{30 \text{ }\mu\text{H}}{21,2 \text{ }\mu\text{H}} = 1,415$$

Quasi steady-state short-circuit current I_{kD} [equation (13)]:

$$I_{\text{kD}} = \lambda_D \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \times \frac{cU_n}{\sqrt{3} Z_N} \times \frac{U_{\text{rTLV}}}{U_{\text{rTHV}}} = 0,974 \times \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \times \frac{1,05 \times 660 \text{ V}}{\sqrt{3} \times 7,054 \text{ m}\Omega} \times \frac{244 \text{ V}}{660 \text{ V}} = 27,58 \text{ kA}$$

with $\lambda_D = 0,974$ from [figure 7 or equation (54)]

Peak short-circuit current i_{pD} [equation (14)]:

$$i_{\text{pD}} = \kappa_D I_{\text{kD}} = 1,14 \times 27,58 \text{ kA} = 31,44 \text{ kA}$$

with $\kappa_D = 1,14$ [figure 8] depending on

$$\frac{R_N}{X_N} \left[1 + \frac{2}{3} \times \frac{R_{\text{DBr}}}{R_N} \right] = 0,349 \left(1 + \frac{2}{3} \times 0,378 \right) = 0,437 \text{ and } \frac{L_{\text{DBr}}}{L_N} = 1,415$$

Time to peak t_{pD} [equation (16)] for $L_{\text{DBr}}/L_N > 1$:

$$t_{\text{pD}} = \left[(3\kappa_D + 6) + 4 \left(\frac{L_{\text{DBr}}}{L_N} - 1 \right) \right] \text{ ms} = [(3 \times 1,14 + 6) + 4(1,415 - 1)] \text{ ms} = 11,08 \text{ ms} \approx 11,1 \text{ ms}$$

Rise time constant τ_{1D} [equation (17)] for $\kappa_D \geq 1,05$:

$$\tau_{1D} = \left[2 + (\kappa_D - 0,9) \left(2,5 + 9 \frac{L_{\text{DBr}}}{L_N} \right) \right] \text{ ms} = [2 + (1,14 - 0,9) (2,5 + 9 \times 1,415)] \text{ ms} = 5,66 \text{ ms} \approx 5,7 \text{ ms}$$

Decay time constant τ_{2D} [equation (19)]:

$$\tau_{2D} = \frac{2 \text{ ms}}{\frac{R_N}{X_N} \left[0,6 + 0,9 \frac{R_{\text{DBr}}}{R_N} \right]} = \frac{2 \text{ ms}}{0,349 (0,6 + 0,9 \times 0,378)} = 6,095 \text{ ms} \approx 6,1 \text{ ms}$$

3.1.2 Courant de court-circuit partiel de la batterie B

Conformément à [2.5]

$$E_B = 1,05 U_{nB} \text{ pour les batteries chargées: } E_B = 1,05 \times 107 \times 2,0 \text{ V} = 224,7 \text{ V}$$

$$R_B = 107 \times 0,13 \text{ m}\Omega = 13,91 \text{ m}\Omega$$

$$L_B = 107 \times 0,2 \text{ }\mu\text{H} = 21,40 \text{ }\mu\text{H}$$

Résistances et inductances de la branche batteries [équations (20) et (21)]:

$$R_{BBr} = 0,9 R_B + R_{L1} = 0,9 \times 13,91 \text{ m}\Omega + 0,44 \text{ m}\Omega = 12,959 \text{ m}\Omega$$

$$L_{BBr} = L_B + L_{L1} = 21,40 \text{ }\mu\text{H} + 6,5 \text{ }\mu\text{H} = 27,9 \text{ }\mu\text{H}$$

Courant de court-circuit quasi permanent I_{kB} [équation (22)]:

$$I_{kB} = \frac{0,95 E_B}{R_{BBr} + 0,1 R_B} = \frac{0,95 \times 224,7 \text{ V}}{(12,959 + 0,1 \times 13,91) \text{ m}\Omega} = 14,88 \text{ kA}$$

Courant de court-circuit de crête i_{pB} [équation (23)]:

$$i_{pB} = \frac{E_B}{R_{BBr}} = \frac{224,7 \text{ V}}{12,959 \text{ m}\Omega} = 17,34 \text{ kA}$$

Constante de temps pour atteindre la crête t_{pB} et constante de temps de croissance τ_{1B} avec $1/\delta$ [équation (24)]:

$$\frac{1}{\delta} = \frac{2}{\frac{R_{BBr}}{L_{BBr}} + \frac{1}{T_B}} = \frac{2}{\frac{12,959 \text{ m}\Omega}{27,9 \text{ }\mu\text{H}} + \frac{1}{30 \text{ ms}}} = \frac{2 \text{ ms}}{0,464 + 0,033} = 4,02 \text{ ms}$$

$$\left. \begin{array}{l} t_{pB} = 12 \text{ ms} \\ \tau_{1B} = 2 \text{ ms} \end{array} \right\} \text{ [figure 10]}$$

Constante de temps de décroissance τ_{2B} [équation (25)]:

$$\tau_{2B} = 100 \text{ ms}$$

3.1.3 Courant de court-circuit partiel du condensateur C

Résistances, inductances et capacitance de la branche condensateur [équations (26) et (27)].

$$R_{CBr} = R_C = 10 \text{ m}\Omega$$

$$L_{CBr} = 0$$

$$C = 1,2 C_{c.a.} = 1,2 \times 75 \text{ mF} = 90 \text{ mF}$$

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

$$I_{kC} = 0$$

3.1.2 Partial short-circuit current of the battery B

According to [2.5]

$$E_B = 1,05 U_{nB} \text{ for charged batteries: } E_B = 1,05 \times 107 \times 2,0 \text{ V} = 224,7 \text{ V}$$

$$R_B = 107 \times 0,13 \text{ m}\Omega = 13,91 \text{ m}\Omega$$

$$L_B = 107 \times 0,2 \text{ }\mu\text{H} = 21,40 \text{ }\mu\text{H}$$

Resistances and inductances of battery branch [equations (20) and (21)]:

$$R_{BBr} = 0,9 R_B + R_{L1} = 0,9 \times 13,91 \text{ m}\Omega + 0,44 \text{ m}\Omega = 12,959 \text{ m}\Omega$$

$$L_{BBr} = L_B + L_{L1} = 21,40 \text{ }\mu\text{H} + 6,5 \text{ }\mu\text{H} = 27,9 \text{ }\mu\text{H}$$

Quasi steady-state short-circuit current I_{kB} [equation (22)]:

$$I_{kB} = \frac{0,95 E_B}{R_{BBr} + 0,1 R_B} = \frac{0,95 \times 224,7 \text{ V}}{(12,959 + 0,1 \times 13,91) \text{ m}\Omega} = 14,88 \text{ kA}$$

Peak short-circuit current i_{pB} [equation (23)]:

$$i_{pB} = \frac{E_B}{R_{BBr}} = \frac{224,7 \text{ V}}{12,959 \text{ m}\Omega} = 17,34 \text{ kA}$$

Time to peak t_{pB} and rise time constant τ_{1B} with $1/\delta$ [equation (24)]:

$$\frac{1}{\delta} = \frac{2}{\frac{R_{BBr}}{L_{BBr}} + \frac{1}{T_B}} = \frac{2}{\frac{12,959 \text{ m}\Omega}{27,9 \text{ }\mu\text{H}} + \frac{1}{30 \text{ ms}}} = \frac{2 \text{ ms}}{0,464 + 0,033} = 4,02 \text{ ms}$$

$$\left. \begin{array}{l} t_{pB} = 12 \text{ ms} \\ \tau_{1B} = 2 \text{ ms} \end{array} \right\} \text{ [figure 10]}$$

Decay time constant τ_{2B} [equation (25)]:

$$\tau_{2B} = 100 \text{ ms}$$

3.1.3 Partial short-circuit current of the capacitor C

Resistance, inductance and capacitance of the capacitor branch [equations (26) and (27)].

$$R_{CBr} = R_C = 10 \text{ m}\Omega$$

$$L_{CBr} = 0$$

$$C = 1,2 C_{a.c.} = 1,2 \times 75 \text{ mF} = 90 \text{ mF}$$

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

$$I_{kC} = 0$$

Courant de court-circuit de crête i_{pC} [équation (28)] avec $E_C = 1,05 U_{nB}$:

$$i_{pC} = \kappa_C \frac{E_C}{R_{CB r}} = 1,0 \times \frac{224,7 \text{ V}}{10 \text{ m}\Omega} = 22,47 \text{ kA}$$

avec $\kappa_C = 1,0$ [2.6.2.2] avec $L_{CB r} = 0$

Temps pour atteindre la crête t_{pC} avec $L_{CB r} = 0$

$$t_{pC} = 0$$

Constante de temps de croissance τ_{1C} [équation (31)] avec $t_{pC} = 0$:

$$\tau_{1C} = k_{1C} t_{pC} = 0$$

Constante de temps de décroissance τ_{2C} [équation (32)] avec $k_{2C} = 1,0$:

$$\tau_{2C} = k_{2C} R_{CB r} C = 1,0 \times 10 \text{ m}\Omega \times 90 \text{ mF} = 0,9 \text{ ms}$$

3.1.4 Courant de court-circuit partiel du moteur M

Résistances et inductances de la branche moteur [équations (33) et (34)] et τ_M [équation (35)]:

$$R_{MB r} = R_M + R_{L2} = 42,2 \text{ m}\Omega + 0,23 \text{ m}\Omega = 42,43 \text{ m}\Omega$$

$$L_{MB r} = L_M + L_{L2} = 0,4 \text{ mH} + 3,78 \text{ }\mu\text{H} = 403,78 \text{ }\mu\text{H}$$

$$\tau_M = L_{MB r} / R_{MB r} = 403,78 \text{ }\mu\text{H} / 42,43 \text{ m}\Omega = 9,52 \text{ ms}$$

Courant de court-circuit quasi permanent I_{kM} [équation (37)]:

$$I_{kM} = 0 \quad \text{pour } n \rightarrow 0$$

Courant de court-circuit de crête i_{pM} [équation (38)]:

$$i_{pM} = \kappa_M \frac{U_{rM} - I_{rM} R_M}{R_{MB r}} = 0,86 \times \frac{220 \text{ V} - 497 \text{ A} \times 0,0422 \text{ }\Omega}{42,43 \text{ m}\Omega} = 4,03 \text{ kA}$$

avec κ_M provenant de la [figure 17] en fonction de $1/\delta$ et ω_0 :

$$\tau_{mec} = \frac{2 \pi n_{0M} J R_{MB r} I_{rM}}{M_r U_{rM}} = \frac{2 \pi n_{0M} J R_{MB r} I_{rM}}{\frac{P_{rM}}{2 \pi n_{rM}} \times U_{rM}} = \frac{2 \pi \times 1,08 \times 25 \text{ s}^{-1} \times 6,6 \text{ kgm}^2 \times 42,43 \text{ m}\Omega \times 497 \text{ A}}{\frac{100 \text{ kW}}{2 \pi \times 25 \text{ s}^{-1}} \times 220 \text{ V}}$$

où P_{rM} est la puissance mécanique du moteur.

$$\tau_{mec} = 169 \text{ ms}$$

$$\tau_F = L_F / R_F = 10 \text{ H} / 10 \text{ }\Omega = 1 \text{ s}$$

Peak short-circuit current i_{pC} [equation (28)] with $E_C = 1,05 U_{nB}$:

$$i_{pC} = \kappa_C \frac{E_C}{R_{CBF}} = 1,0 \times \frac{224,7 \text{ V}}{10 \text{ m}\Omega} = 22,47 \text{ kA}$$

with $\kappa_C = 1,0$ [2.6.2.2] with $L_{CBF} = 0$

Time to peak t_{pC} with $L_{CBF} = 0$

$$t_{pC} = 0$$

Rise time constant τ_{1C} [equation (31)] with $t_{pC} = 0$:

$$\tau_{1C} = k_{1C} t_{pC} = 0$$

Decay time constant τ_{2C} [equation (32)] with $k_{2C} = 1,0$:

$$\tau_{2C} = k_{2C} R_{CBF} C = 1,0 \times 10 \text{ m}\Omega \times 90 \text{ mF} = 0,9 \text{ ms}$$

3.1.4 Partial short-circuit current of the motor M

Resistances and inductances of the motor branch [equation (33) and (34)] and τ_M [equation (35)]:

$$R_{MBF} = R_M + R_{L2} = 42,2 \text{ m}\Omega + 0,23 \text{ m}\Omega = 42,43 \text{ m}\Omega$$

$$L_{MBF} = L_M + L_{L2} = 0,4 \text{ mH} + 3,78 \text{ }\mu\text{H} = 403,78 \text{ }\mu\text{H}$$

$$\tau_M = L_{MBF}/R_{MBF} = 403,78 \text{ }\mu\text{H}/42,43 \text{ m}\Omega = 9,52 \text{ ms}$$

Quasi steady-state short-circuit current I_{kM} [equation (37)]:

$$I_{kM} = 0 \quad \text{for } n \rightarrow 0$$

Peak short-circuit current i_{pM} [equation (38)]:

$$i_{pM} = \kappa_M \frac{U_{rM} - I_{rM} R_M}{R_{MBF}} = 0,86 \times \frac{220 \text{ V} - 497 \text{ A} \times 0,0422 \text{ }\Omega}{42,43 \text{ m}\Omega} = 4,03 \text{ kA}$$

with κ_M from [figure 17] depending on $1/\delta$ and ω_0 :

$$\tau_{mec} = \frac{2 \pi n_{0M} J R_{MBF} I_{rM}}{M_r U_{rM}} = \frac{2 \pi n_{0M} J R_{MBF} I_{rM}}{\frac{P_{rM}}{2 \pi n_{rM}} \times U_{rM}} = \frac{2 \pi \times 1,08 \times 25 \text{ s}^{-1} \times 6,6 \text{ kgm}^2 \times 42,43 \text{ m}\Omega \times 497 \text{ A}}{\frac{100 \text{ kW}}{2 \pi \times 25 \text{ s}^{-1}} \times 220 \text{ V}}$$

where P_{rM} is the mechanical power of the motor.

$$\tau_{mec} = 169 \text{ ms}$$

$$\tau_F = L_F/R_F = 10 \text{ H}/10 \text{ }\Omega = 1 \text{ s}$$

$\tau_{mec} = 169 \text{ ms} < 10 \tau_F = 10 \times 1 \text{ s} = 10 \text{ s}$ conduit à $\kappa_M = 0,86$ provenant de la [figure 17] en fonction de $1/\delta = 2\tau_M = 19,04 \text{ ms}$ tiré de l'équation (41)] et de

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{\tau_{mec} \tau_M} \left[1 - \frac{R_M I_{rM}}{U_{rM}} \right]} = \sqrt{\frac{1}{169 \text{ ms} \times 9,52 \text{ ms} \left[1 - \frac{0,0422 \Omega \times 497 \text{ A}}{220 \text{ V}} \right]}}$$

$$= 23,74 \text{ s}^{-1} \text{ de [l'équation (19)]}.$$

Temps pour atteindre la crête t_{pM} et constante de temps de croissance pour la vitesse de décroissance avec $\tau_{mec} < 10 \tau_F$ [2.7.2.3b] et [équation (45)]:

$$t_{pM} = 30 \text{ ms}$$

provenant de la [figure 19] et de l'équation (46)].

Pour la vitesse de décroissance $\tau_{mec} < 10 \tau_F$ [figure 19]:

$$\tau_{1M} = k_{3M} \tau_M = 0,85 \times 9,52 \text{ ms} = 8,1 \text{ ms}$$

avec $k_{3M} = 0,85$ [figure 20]

Constante de temps de décroissance τ_{2M} [équation (48)]:

$$\tau_{2M} = k_{4M} \tau_{mec} = 1,0 \times 169 \text{ ms} = 169 \text{ ms}$$

avec $k_{4M} = 1,0$ [figure 21] pour la vitesse de décroissance et $\tau_{mec} < 10 \tau_F$

3.1.5 Courant de court-circuit à l'emplacement du court-circuit F1

Le courant de court-circuit en F1 est déterminé par la figure 2 à partir de la superposition des courants de court-circuit partiels $i_D(t)$, $i_B(t)$, $i_C(t)$ et $i_M(t)$ conformément à l'équation (51)].

Courants de court-circuit partiels $i(t)$:

Branche redresseur D:

$$i_{1D}(t) = i_{pD} \frac{1 - e^{-t/\tau_{1D}}}{1 - e^{-t_{pD}/\tau_{1D}}} = 31,44 \text{ kA} \times \frac{1 - e^{-t/5,70 \text{ ms}}}{1 - e^{-11,1 \text{ ms}/5,7 \text{ ms}}}$$

$$= 36,7 \text{ kA} (1 - e^{-t/5,70 \text{ ms}})$$

$$p_D = I_{kD}/i_{pD} = 27,6 \text{ kA}/31,44 \text{ kA} = 0,877$$

$$i_{2D}(t) = i_{pD} \left[(1 - p_D) e^{-(t-t_{pD})/\tau_{2D}} + p_D \right]$$

$$= 31,4 \text{ kA} \left[0,877 + 0,12 e^{-(t-11,1 \text{ ms})/6,1 \text{ ms}} \right]$$

$\tau_{mec} = 169 \text{ ms} < 10 \tau_F = 10 \times 1 \text{ s} = 10 \text{ s}$ leads to $\kappa_M = 0,86$ from [figure 17] depending on $1/\delta = 2\tau_M = 19,04 \text{ ms}$ from [equation (41)] and

$$\begin{aligned}\omega_0 &= \sqrt{\frac{1}{\tau_{mec} \tau_M} \left[1 - \frac{R_M I_{rM}}{U_{rM}} \right]} = \sqrt{\frac{1}{169 \text{ ms} \times 9,52 \text{ ms} \left[1 - \frac{0,0422 \Omega \times 497 \text{ A}}{220 \text{ V}} \right]}} \\ &= 23,74 \text{ s}^{-1} \text{ from [equation (19)].}\end{aligned}$$

Time to peak t_{pM} and rise time constant τ_{1M} for the decreasing speed with $\tau_{mec} < 10 \tau_F$ [2.7.2.3b] and [equation (45)]:

$$t_{pM} = 30 \text{ ms}$$

from [figure 19] and from [equation (46)].

For decreasing speed with $\tau_{mec} < 10 \tau_F$ [figure 19]:

$$\tau_{1M} = k_{3M} \tau_M = 0,85 \times 9,52 \text{ ms} = 8,1 \text{ ms}$$

with $k_{3M} = 0,85$ [figure 20]

Decay time constant τ_{2M} [equation (48)]:

$$\tau_{2M} = k_{4M} \tau_{mec} = 1,0 \times 169 \text{ ms} = 169 \text{ ms}$$

with $k_{4M} = 1,0$ [figure 21] for decreasing speed and $\tau_{mec} < 10 \tau_F$

3.1.5 Short-circuit current at the short-circuit location F1

The short-circuit current in F1 is determined with figure 2 from the super-position of the partial short-circuit currents $i_D(t)$, $i_B(t)$, $i_C(t)$ and $i_M(t)$ according to [equation (51)].

The partial short-circuit currents $i(t)$:

Rectifier branch D:

$$\begin{aligned}i_{1D}(t) &= i_{pD} \frac{1 - e^{-t/\tau_{1D}}}{1 - e^{-t_{pD}/\tau_{1D}}} = 31,44 \text{ kA} \times \frac{1 - e^{-t/5,70 \text{ ms}}}{1 - e^{-11,1 \text{ ms}/5,7 \text{ ms}}} \\ &= 36,7 \text{ kA} (1 - e^{-t/5,70 \text{ ms}}) \\ p_D &= I_{kD}/i_{pD} = 27,6 \text{ kA}/31,44 \text{ kA} = 0,877\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}i_{2D}(t) &= i_{pD} \left[(1 - p_D) e^{-(t-t_{pD})/\tau_{2D}} + p_D \right] \\ &= 31,4 \text{ kA} \left[0,877 + 0,12 e^{-(t-11,1 \text{ ms})/6,1 \text{ ms}} \right]\end{aligned}$$

Branche batterie B:

$$i_{1B}(t) = i_{pB} \frac{1 - e^{-t/\tau_{1B}}}{1 - e^{-t_{pB}/\tau_{1B}}} = 17,34 \text{ kA} \frac{1 - e^{-t/2 \text{ ms}}}{1 - e^{-12 \text{ ms}/2 \text{ ms}}} = 17,38 \text{ kA} [1 - e^{-t/2 \text{ ms}}]$$

$$p_B = I_{kB}/i_{pB} = 14,88 \text{ kA}/17,34 \text{ kA} = 0,858$$

$$i_{2B}(t) = i_{pB} \left[(1 - p_B) e^{-(t-t_{pB})/\tau_{2B}} + p_B \right]$$

$$= 17,34 \text{ kA} [0,858 + 0,142 e^{-(t-12 \text{ ms})/100 \text{ ms}}]$$

Branche condensateur C:

$$i_{1C}(t) = i_{pC} \frac{1 - e^{-t/\tau_{1C}}}{1 - e^{-t_{pC}/\tau_{1C}}} = 22,47 \text{ kA}$$

$$p_C = I_{kC}/i_{pC} = 0$$

$$i_{2C}(t) = i_{pC} e^{-(t-t_{pC})/\tau_{2C}} = 22,47 \text{ kA} e^{-t/0,9 \text{ ms}}$$

Branche moteur M:

$$i_{1M}(t) = i_{pM} \frac{1 - e^{-t/\tau_{1M}}}{1 - e^{-t_{pM}/\tau_{1M}}} = 4,03 \text{ kA} \times \frac{1 - e^{-t/8,1 \text{ ms}}}{1 - e^{-30 \text{ ms}/8,1 \text{ ms}}}$$

$$= 4,13 \text{ kA} [1 - e^{-t/8,1 \text{ ms}}]$$

$$p_M = I_{kM}/i_{pM} = 0$$

$$i_{2M}(t) = i_{pM} e^{-(t-t_{pM})/\tau_{2M}} = 4,03 \text{ kA} e^{-(t-30 \text{ ms})/169 \text{ ms}}$$

3.1.6 Relevé des résultats

Le tableau 1 donne les principaux résultats pour les courants de court-circuit en F1.

Tableau 1 – Courants de court-circuit en F1

Branche	i_p kA	I_k kA	t_p ms	τ_1 ms	τ_2 ms
Redresseur D	31,4	27,6	11,1	5,7	6,1
Batterie B	17,3	14,9	12,0	2,0	100
Condensateur C	22,5	0	0	0	0,9
Moteur M	4,03	0	30,0	8,1	169
Total des courants de court-circuit ¹⁾	52,1	46,1	11,1	3,7	34,5
¹⁾ Obtenu à partir de la figure 2 pour la fonction d'approximation et pour le courant de court-circuit total $i_k(t)$.					

Battery branch B:

$$i_{1B}(t) = i_{pB} \frac{1 - e^{-t/\tau_{1B}}}{1 - e^{-t_{pB}/\tau_{1B}}} = 17,34 \text{ kA} \frac{1 - e^{-t/2 \text{ ms}}}{1 - e^{-12 \text{ ms}/2 \text{ ms}}} = 17,38 \text{ kA} [1 - e^{-t/2 \text{ ms}}]$$

$$p_B = I_{kB}/i_{pB} = 14,88 \text{ kA}/17,34 \text{ kA} = 0,858$$

$$i_{2B}(t) = i_{pB} \left[(1 - p_B) e^{-(t-t_{pB})/\tau_{2B}} + p_B \right]$$

$$= 17,34 \text{ kA} [0,858 + 0,142 e^{-(t-12 \text{ ms})/100 \text{ ms}}]$$

Capacitor branch C:

$$i_{1C}(t) = i_{pC} \frac{1 - e^{-t/\tau_{1C}}}{1 - e^{-t_{pC}/\tau_{1C}}} = 22,47 \text{ kA}$$

$$p_C = I_{kC}/i_{pC} = 0$$

$$i_{2C}(t) = i_{pC} e^{-(t-t_{pC})/\tau_{2C}} = 22,47 \text{ kA} e^{-t/0,9 \text{ ms}}$$

Motor branch M:

$$i_{1M}(t) = i_{pM} \frac{1 - e^{-t/\tau_{1M}}}{1 - e^{-t_{pM}/\tau_{1M}}} = 4,03 \text{ kA} \times \frac{1 - e^{-t/8,1 \text{ ms}}}{1 - e^{-30 \text{ ms}/8,1 \text{ ms}}}$$

$$= 4,13 \text{ kA} [1 - e^{-t/8,1 \text{ ms}}]$$

$$p_M = I_{kM}/i_{pM} = 0$$

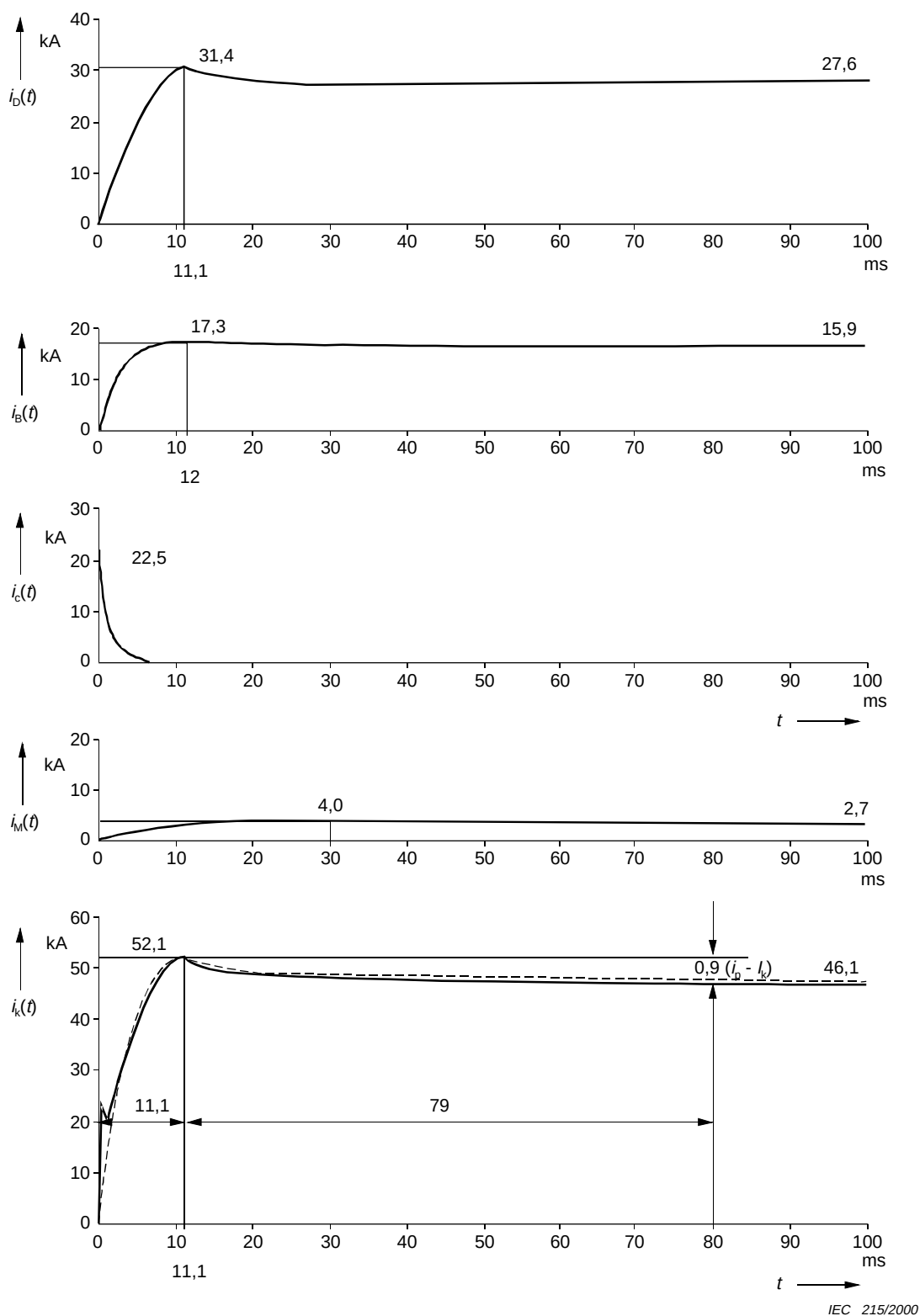
$$i_{2M}(t) = i_{pM} e^{-(t-t_{pM})/\tau_{2M}} = 4,03 \text{ kA} e^{-(t-30 \text{ ms})/169 \text{ ms}}$$

3.1.6 Collection of results

Table 1 gives the main results for the short-circuit currents in F1.

Table 1 – Short-circuit currents in F1

Branch	i_p kA	I_k kA	t_p ms	τ_1 ms	τ_2 ms
Rectifier D	31,4	27,6	11,1	5,7	6,1
Battery B	17,3	14,9	12,0	2,0	100
Capacitor C	22,5	0	0	0	0,9
Motor M	4,03	0	30,0	8,1	169
Total short-circuit current ¹⁾	52,1	46,1	11,1	3,7	34,5
¹⁾ Found from figure 2 for the approximation function for the total short-circuit current $i_k(t)$.					



—— courant de court-circuit

----- fonction d'approximation normalisée pour le courant de court-circuit $i_k(t)$ [figure 22a];
 $i_p = 52,1$ kA; $I_k = 46,1$ kA; $t_p = 11,1$ ms; $\tau_1 = 3,7$ ms;
 $\tau_2 = 34,5$ ms

Figure 2 – Courants de court-circuit partiels et courant de court-circuit $i_k(t)$ à l'emplacement du court-circuit F1 (voir figure 1)

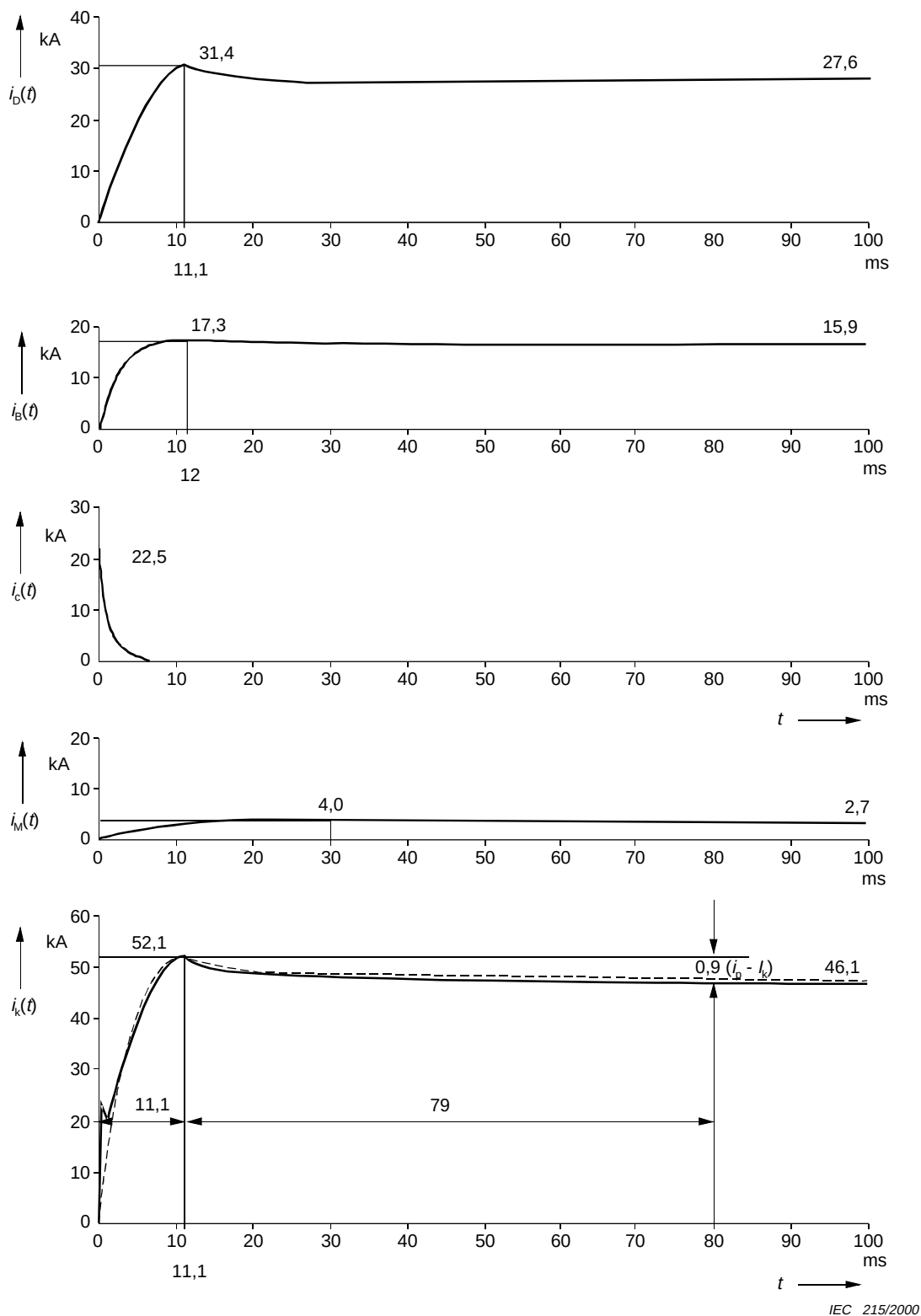


Figure 2 – Partial short-circuit currents and short-circuit current $i_k(t)$ at the short-circuit location F1 (see figure 1)

3.2 Emplacement du court-circuit F2

3.2.1 Courant de court-circuit partiel du redresseur D

R_N , L_N , X_N et Z_N comme précisé en 3.1.1.

Résistances et inductances du côté continu de la branche redresseur [équations (11) et (12)]:

$$R_{DBr} = R_s + R_{L2} = 0,88 \text{ m}\Omega + 0,23 \text{ m}\Omega = 1,11 \text{ m}\Omega$$

$$L_{DBr} = L_s + L_{L2} = 30 \text{ }\mu\text{H} + 3,78 \text{ }\mu\text{H} = 33,78 \text{ }\mu\text{H}$$

Ceci conduit aux relations suivantes:

$$\frac{R_N}{X_N} = \frac{2,326 \text{ m}\Omega}{6,660 \text{ m}\Omega} = 0,349$$

$$\frac{R_{DBr}}{R_N} = \frac{1,11 \text{ m}\Omega}{2,326 \text{ m}\Omega} = 0,477$$

$$\frac{L_{DBr}}{L_N} = \frac{33,78 \text{ }\mu\text{H}}{21,2 \text{ }\mu\text{H}} = 1,593$$

Courant de court-circuit quasi permanent I_{kD} [équation (13)]:

$$I_{kD} = \lambda_d \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \times \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_N} \frac{U_{rTLV}}{U_{rTHV}} = 0,963 \times \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \times \frac{1,05 \times 660 \text{ V}}{\sqrt{3} \times 7,054 \text{ m}\Omega} \times \frac{244 \text{ V}}{660 \text{ V}} = 27,28 \text{ kA}$$

avec $\lambda_D = 0,963$ [figure 7 ou équation (54)]

Courant de court-circuit de crête i_{pD} [équation (14)]:

$$i_{pD} = \kappa_D I_{kD} = 1,12 \times 27,28 \text{ kA} = 30,56 \text{ kA}$$

avec $\kappa_D = 1,12$ [figure 8] en fonction de

$$\frac{R_N}{X_N} \left[1 + \frac{2}{3} \frac{R_{DBr}}{R_N} \right] = 0,349 \left[1 + \frac{2}{3} \times 0,477 \right] = 0,46 \quad \text{and} \quad \frac{L_{DBr}}{L_N} = 1,593$$

Temps pour atteindre la crête t_{pD} [équation (16)] pour $L_{DBr}/L_N > 1$:

$$t_{pD} = \left[(3\kappa_D + 6) + 4 \left(\frac{L_{DBr}}{L_N} - 1 \right) \right] \text{ ms} = \left[(3 \times 1,12 + 6) + 4 (1,593 - 1) \right] \text{ ms} = 11,73 \text{ ms}$$

Constante de temps de croissance τ_{1D} [équation (17)] pour $\kappa_D \geq 1,05$:

$$\tau_{1D} = \left[2 + (\kappa_D - 0,9) \left(2,5 + 9 \frac{L_{DBr}}{L_N} \right) \right] \text{ ms} = \left[2 + (1,12 - 0,9) (2,5 + 9 \times 1,593) \right] \text{ ms} = 5,70 \text{ ms}$$

3.2 Short-circuit location F2

3.2.1 Partial short-circuit current of the rectifier D

R_N , L_N , X_N and Z_N as given in 3.1.1.

Resistances and inductances of the d.c. side of the rectifier branch [equations (11) and (12)]:

$$R_{DBr} = R_s + R_{L2} = 0,88 \text{ m}\Omega + 0,23 \text{ m}\Omega = 1,11 \text{ m}\Omega$$

$$L_{DBr} = L_s + L_{L2} = 30 \text{ }\mu\text{H} + 3,78 \text{ }\mu\text{H} = 33,78 \text{ }\mu\text{H}$$

This leads to the following relations:

$$\frac{R_N}{X_N} = \frac{2,326 \text{ m}\Omega}{6,660 \text{ m}\Omega} = 0,349$$

$$\frac{R_{DBr}}{R_N} = \frac{1,11 \text{ m}\Omega}{2,326 \text{ m}\Omega} = 0,477$$

$$\frac{L_{DBr}}{L_N} = \frac{33,78 \text{ }\mu\text{H}}{21,2 \text{ }\mu\text{H}} = 1,593$$

Quasi steady-state short-circuit current I_{kD} [equation (13)]:

$$I_{kD} = \lambda_d \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \times \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_N} \frac{U_{rTLV}}{U_{rTHV}} = 0,963 \times \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \times \frac{1,05 \times 660 \text{ V}}{\sqrt{3} \times 7,054 \text{ m}\Omega} \times \frac{244 \text{ V}}{660 \text{ V}} = 27,28 \text{ kA}$$

with $\lambda_d = 0,963$ [figure 7 or equation (54)]

Peak short-circuit current i_{pD} [equation (14)]:

$$i_{pD} = \kappa_D I_{kD} = 1,12 \times 27,28 \text{ kA} = 30,56 \text{ kA}$$

with $\kappa_D = 1,12$ [figure 8] depending on

$$\frac{R_N}{X_N} \left[1 + \frac{2}{3} \frac{R_{DBr}}{R_N} \right] = 0,349 \left[1 + \frac{2}{3} \times 0,477 \right] = 0,46 \quad \text{and} \quad \frac{L_{DBr}}{L_N} = 1,593$$

Time to peak t_{pD} [equation (16)] for $L_{DBr}/L_N > 1$:

$$t_{pD} = \left[(3\kappa_D + 6) + 4 \left(\frac{L_{DBr}}{L_N} - 1 \right) \right] \text{ ms} = [(3 \times 1,12 + 6) + 4 (1,593 - 1)] \text{ ms} = 11,73 \text{ ms}$$

Rise time constant τ_{1D} [equation (17)] for $\kappa_D \geq 1,05$:

$$\tau_{1D} = \left[2 + (\kappa_D - 0,9) \left(2,5 + 9 \frac{L_{DBr}}{L_N} \right) \right] \text{ ms} = [2 + (1,12 - 0,9) (2,5 + 9 \times 1,593)] \text{ ms} = 5,70 \text{ ms}$$

Constante de temps de décroissance τ_{2D} [équation (19)]:

$$\tau_{2D} = \frac{2 \text{ ms}}{\frac{R_N}{X_N} \left[0,6 + 0,9 \frac{R_{DBr}}{R_N} \right]} = \frac{2 \text{ ms}}{0,349 (0,6 + 0,9 \times 0,477)} = 5,57 \text{ ms}$$

3.2.2 Courant de court-circuit partiel de la batterie B

E_B , R_B , L_B comme indiqués en 3.1.2.

Résistances et inductances de la branche batterie [équations (20) et (21)]:

$$R_{BBr} = 0,9R_B + R_{L1} + R_{L2} = 0,9 \times 13,91 \text{ m}\Omega + 0,44 \text{ m}\Omega + 0,23 \text{ m}\Omega = 13,189 \text{ m}\Omega$$

$$L_{BBr} = L_B + L_{L1} + L_{L2} = 21,4 \text{ }\mu\text{H} + 6,5 \text{ }\mu\text{H} + 3,78 \text{ }\mu\text{H} = 31,68 \text{ }\mu\text{H}$$

Courant de court-circuit quasi permanent I_{kB} [équation (22)]:

$$I_{kB} = \frac{0,95 E_B}{R_{BBr} + 0,1 R_B} = \frac{0,95 \times 224,7 \text{ V}}{(13,189 + 0,1 \times 13,91) \text{ m}\Omega} = 14,64 \text{ kA}$$

Courant de court-circuit de crête i_{pB} [équation (23)]:

$$i_{pB} = \frac{E_B}{R_{BBr}} = \frac{224,7 \text{ V}}{13,189 \text{ m}\Omega} = 17,04 \text{ kA}$$

Temps pour atteindre la crête t_{pB} et constante de temps de croissance τ_{1B} avec $1/\delta$ [équation (24)]:

$$\frac{1}{\delta} = \frac{2}{\frac{R_{BBr}}{L_{BBr}} + \frac{1}{T_B}} = \frac{2}{\frac{13,189 \text{ m}\Omega}{31,68 \text{ m}\Omega} + \frac{1}{30 \text{ ms}}} = \frac{2 \text{ ms}}{0,416 + 0,033} = 4,45 \text{ ms}$$

$$\left. \begin{array}{l} t_{pB} = 13 \text{ ms} \\ \tau_{1B} = 2,5 \text{ ms} \end{array} \right\} \quad [\text{figure 10}]$$

Constante de temps de décroissance τ_{2B} [équation (25)]:

$$\tau_{2B} = 100 \text{ ms}$$

3.2.3 Courant de court-circuit partiel du condensateur C

Résistances, inductances et capacitance de la branche condensateur [équations (26) et (27)]:

$$R_{CBr} = R_C + R_{L2} = 10 \text{ m}\Omega + 0,23 \text{ m}\Omega = 10,23 \text{ m}\Omega$$

$$L_{CBr} = L_{L2} = 3,78 \text{ }\mu\text{H}$$

$$C = 1,2 C_{c.a.} = 1,2 \times 75 \text{ mF} = 90 \text{ mF}$$

Decay time constant τ_{2D} [equation (19)]:

$$\tau_{2D} = \frac{2 \text{ ms}}{\frac{R_N}{X_N} \left[0,6 + 0,9 \frac{R_{DBr}}{R_N} \right]} = \frac{2 \text{ ms}}{0,349 (0,6 + 0,9 \times 0,477)} = 5,57 \text{ ms}$$

3.2.2 Partial short-circuit current of the battery B

E_B , R_B , L_B as given in subclause 3.1.2.

Resistances and inductances of the battery branch [equations (20) and (21)]:

$$R_{BBr} = 0,9R_B + R_{L1} + R_{L2} = 0,9 \times 13,91 \text{ m}\Omega + 0,44 \text{ m}\Omega + 0,23 \text{ m}\Omega = 13,189 \text{ m}\Omega$$

$$L_{BBr} = L_B + L_{L1} + L_{L2} = 21,4 \text{ }\mu\text{H} + 6,5 \text{ }\mu\text{H} + 3,78 \text{ }\mu\text{H} = 31,68 \text{ }\mu\text{H}$$

Quasi steady-state short-circuit current I_{kB} [equation (22)]:

$$I_{kB} = \frac{0,95 E_B}{R_{BBr} + 0,1 R_B} = \frac{0,95 \times 224,7 \text{ V}}{(13,189 + 0,1 \times 13,91) \text{ m}\Omega} = 14,64 \text{ kA}$$

Peak short-circuit current i_{pB} [equation (23)]:

$$i_{pB} = \frac{E_B}{R_{BBr}} = \frac{224,7 \text{ V}}{13,189 \text{ m}\Omega} = 17,04 \text{ kA}$$

Time to peak t_{pB} and rise time constant τ_{1B} with $1/\delta$ [equation (24)]:

$$\frac{1}{\delta} = \frac{2}{\frac{R_{BBr}}{L_{BBr}} + \frac{1}{T_B}} = \frac{2}{\frac{13,189 \text{ m}\Omega}{31,68 \text{ m}\Omega} + \frac{1}{30 \text{ ms}}} = \frac{2 \text{ ms}}{0,416 + 0,033} = 4,45 \text{ ms}$$

$$\left. \begin{array}{l} t_{pB} = 13 \text{ ms} \\ \tau_{1B} = 2,5 \text{ ms} \end{array} \right\} \quad [\text{figure 10}]$$

Decay time constant τ_{2B} [equation (25)]:

$$\tau_{2B} = 100 \text{ ms}$$

3.2.3 Partial short-circuit current of the capacitor C

Resistances, inductance and capacitance of the capacitor branch [equations (26) and (27)]:

$$R_{CBr} = R_C + R_{L2} = 10 \text{ m}\Omega + 0,23 \text{ m}\Omega = 10,23 \text{ m}\Omega$$

$$L_{CBr} = L_{L2} = 3,78 \text{ }\mu\text{H}$$

$$C = 1,2 C_{a.c.} = 1,2 \times 75 \text{ mF} = 90 \text{ mF}$$