

**NORME  
INTERNATIONALE  
INTERNATIONAL  
STANDARD**

**CEI  
IEC**

**61363-1**

Première édition  
First edition  
1998-02

---

---

**Installations électriques à bord des navires  
et des plates-formes mobiles et fixes en mer –**

**Partie 1:  
Evaluation des courants de court-circuit  
en c.a. triphasé**

**Electrical installations of ships and mobile  
and fixed offshore units –**

**Part 1:  
Procedures for calculating short-circuit currents  
in three-phase a.c.**



Numéro de référence  
Reference number  
CEI/IEC 61363-1:1998

## 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 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**  
Accès en ligne\*
- **Catalogue des publications de la CEI**  
Publié annuellement et mis à jour régulièrement (Accès en ligne)\*

## 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*.

## 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.

\* 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 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**  
On-line access\*
- **Catalogue of IEC publications**  
Published yearly with regular updates (On-line access)\*

## 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*.

## 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.

\* See web site address on title page.

NORME  
INTERNATIONALE  
INTERNATIONAL  
STANDARD

CEI  
IEC

**61363-1**

Première édition  
First edition  
1998-02

---

---

**Installations électriques à bord des navires  
et des plates-formes mobiles et fixes en mer –**

**Partie 1:  
Evaluation des courants de court-circuit  
en c.a. triphasé**

**Electrical installations of ships and mobile  
and fixed offshore units –**

**Part 1:  
Procedures for calculating short-circuit currents  
in three-phase a.c.**

© IEC 1998 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](mailto: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 .....                                                               | 6     |
| Articles                                                                         |       |
| 1 Domaine d'application et objet.....                                            | 8     |
| 2 Références normatives .....                                                    | 10    |
| 3 Définitions, symboles, indices et exposants .....                              | 10    |
| 3.1 Définitions.....                                                             | 10    |
| 3.2 Symboles .....                                                               | 16    |
| 3.3 Indices .....                                                                | 22    |
| 3.4 Exposants.....                                                               | 22    |
| 4 Information introductive.....                                                  | 22    |
| 4.1 Généralités .....                                                            | 22    |
| 4.2 Précision des calculs.....                                                   | 24    |
| 4.3 Hypothèses de base.....                                                      | 24    |
| 4.4 Méthodes de calcul .....                                                     | 26    |
| 5 Composants et modèles des systèmes.....                                        | 28    |
| 5.1 Composants actifs.....                                                       | 28    |
| 5.1.1 Machines synchrones.....                                                   | 28    |
| 5.1.2 Moteurs asynchrones.....                                                   | 36    |
| 5.1.3 Générateurs de lignes d'arbres .....                                       | 40    |
| 5.1.4 Moteurs alimentés par convertisseur .....                                  | 44    |
| 5.2 Composants non actifs.....                                                   | 46    |
| 5.2.1 Généralités .....                                                          | 46    |
| 5.2.2 Câbles.....                                                                | 46    |
| 5.2.3 Transformateurs.....                                                       | 46    |
| 5.2.4 Bobines de réactance .....                                                 | 48    |
| 6 Hypothèses simplificatrices .....                                              | 48    |
| 6.1 Généralités.....                                                             | 48    |
| 6.2 Machines synchrones.....                                                     | 48    |
| 6.2.1 Courants de court-circuit triphasés.....                                   | 48    |
| 6.2.2 Effet de la résistance statorique .....                                    | 50    |
| 6.2.3 Effet de la condition de charge préalable.....                             | 50    |
| 6.2.4 Omission de la décroissance transitoire de la composante alternative ..... | 50    |
| 6.2.5 Omission de la décroissance du courant de court-circuit .....              | 50    |
| 6.2.6 Constantes de temps .....                                                  | 52    |
| 6.3 Moteurs asynchrones .....                                                    | 52    |
| 6.3.1 Premières approximations.....                                              | 52    |
| 6.3.2 Omission des conditions de charge préalable des moteurs.....               | 52    |
| 6.3.3 Données générales – Gros moteurs .....                                     | 54    |
| 6.3.4 Données générales – Petits moteurs.....                                    | 54    |
| 6.3.5 Moteurs asynchrones à service limité.....                                  | 56    |

## CONTENTS

|                                                                        | Page |
|------------------------------------------------------------------------|------|
| FOREWORD .....                                                         | 7    |
| Clause                                                                 |      |
| 1 Scope and object .....                                               | 9    |
| 2 Normative references .....                                           | 11   |
| 3 Definitions, symbols, subscripts and superscripts .....              | 11   |
| 3.1 Definitions .....                                                  | 11   |
| 3.2 Symbols .....                                                      | 17   |
| 3.3 Subscripts .....                                                   | 23   |
| 3.4 Superscripts .....                                                 | 23   |
| 4 Introductory information .....                                       | 23   |
| 4.1 General .....                                                      | 23   |
| 4.2 Calculation accuracy .....                                         | 25   |
| 4.3 Basic assumptions .....                                            | 25   |
| 4.4 Calculation methods .....                                          | 27   |
| 5 System components and models .....                                   | 29   |
| 5.1 Active components .....                                            | 29   |
| 5.1.1 Synchronous machines .....                                       | 29   |
| 5.1.2 Asynchronous motors .....                                        | 37   |
| 5.1.3 Shaft generators .....                                           | 41   |
| 5.1.4 Converter fed motors .....                                       | 45   |
| 5.2 Non-active components .....                                        | 47   |
| 5.2.1 General .....                                                    | 47   |
| 5.2.2 Cables .....                                                     | 47   |
| 5.2.3 Transformers .....                                               | 47   |
| 5.2.4 Reactors .....                                                   | 49   |
| 6 Simplifying assumptions .....                                        | 49   |
| 6.1 General .....                                                      | 49   |
| 6.2 Synchronous machines .....                                         | 49   |
| 6.2.1 Three-phase short-circuit currents .....                         | 49   |
| 6.2.2 Effect of stator resistance .....                                | 51   |
| 6.2.3 Effect of preload condition .....                                | 51   |
| 6.2.4 Neglecting transient component decay of the a.c. component ..... | 51   |
| 6.2.5 Neglecting short-circuit current decay .....                     | 51   |
| 6.2.6 Time constants .....                                             | 53   |
| 6.3 Asynchronous motors .....                                          | 53   |
| 6.3.1 First approximations .....                                       | 53   |
| 6.3.2 Neglecting the motor preload conditions .....                    | 53   |
| 6.3.3 General data for large motors .....                              | 55   |
| 6.3.4 General data for small motors .....                              | 55   |
| 6.3.5 Limited service asynchronous motors .....                        | 57   |

| Articles                                                                                            | Pages |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 7 Application du générateur équivalent .....                                                        | 56    |
| 7.1 Généralités .....                                                                               | 56    |
| 7.2 Hypothèses .....                                                                                | 56    |
| 7.3 Evaluation du moteur équivalent .....                                                           | 56    |
| 7.3.1 Généralités .....                                                                             | 56    |
| 7.3.2 Détermination des paramètres du moteur équivalent .....                                       | 58    |
| 7.4 Evaluation du générateur équivalent .....                                                       | 58    |
| 7.4.1 Généralités .....                                                                             | 58    |
| 7.4.2 Composante alternative $I_{ac}(t)_*$ .....                                                    | 60    |
| 7.4.3 Constante de temps subtransitoire $T''_{d*}$ du générateur équivalent .....                   | 60    |
| 7.4.4 Constante de temps transitoire $T'_{d*}$ du générateur équivalent .....                       | 60    |
| 7.4.5 Constante de temps c.c., $T_{dc*}$ .....                                                      | 62    |
| 7.4.6 Impédances des générateurs équivalents .....                                                  | 62    |
| 8 Calcul de systèmes .....                                                                          | 64    |
| 8.1 Généralités .....                                                                               | 64    |
| 8.2 Influence des composants non actifs reliés en série aux composants actifs .....                 | 64    |
| 8.2.1 Généralités .....                                                                             | 64    |
| 8.2.2 Générateurs .....                                                                             | 64    |
| 8.2.3 Moteurs .....                                                                                 | 66    |
| 8.3 Courants de court-circuit sur les barres omnibus des générateurs .....                          | 66    |
| 8.3.1 Générateurs fonctionnant en parallèle .....                                                   | 66    |
| 8.3.2 Moteurs raccordés directement .....                                                           | 68    |
| 8.3.3 Moteurs et/ou générateurs raccordés aux autres barres-bus .....                               | 68    |
| 8.4 Courants de court-circuit sur les barrettes reliées directement aux barres de générateurs ..... | 68    |
| 8.5 Transformateurs .....                                                                           | 70    |
| 8.6 Convertisseurs statiques reliés à une machine à vitesse contrôlée .....                         | 70    |
| 8.7 Procédures de calcul .....                                                                      | 72    |
| 8.7.1 Généralités .....                                                                             | 72    |
| 8.7.2 Procédure d'étude des court-circuits .....                                                    | 72    |
| 8.7.3 Définition du système et du problème; préparation d'un schéma d'étude .....                   | 72    |
| 8.7.4 Identification des paramètres caractéristiques des composants .....                           | 72    |
| 8.7.5 Schéma des impédances du système .....                                                        | 74    |
| 8.7.6 Calcul approché .....                                                                         | 74    |
| 8.7.7 Recherche des approximations appropriées .....                                                | 74    |
| 8.7.8 Calcul du système .....                                                                       | 74    |
| 8.7.9 Résumé des calculs .....                                                                      | 74    |
| 9 Interprétation et application des résultats .....                                                 | 76    |
| 9.1 Généralités .....                                                                               | 76    |
| 9.2 Systèmes basse tension (jusqu'à 1 kV) .....                                                     | 76    |
| 9.3 Systèmes moyenne tension (au dessus de 1 kV) .....                                              | 78    |

| Clause                                                                                        | Page |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 7 Application of the equivalent generator .....                                               | 57   |
| 7.1 General .....                                                                             | 57   |
| 7.2 Assumptions .....                                                                         | 57   |
| 7.3 Evaluation of the equivalent motor.....                                                   | 57   |
| 7.3.1 General .....                                                                           | 57   |
| 7.3.2 Determination of the equivalent motor parameters .....                                  | 59   |
| 7.4 Evaluation of the equivalent generator.....                                               | 59   |
| 7.4.1 General .....                                                                           | 59   |
| 7.4.2 AC component $I_{ac}(t)_*$ .....                                                        | 61   |
| 7.4.3 Equivalent generator subtransient time constant $T''_{d*}$ .....                        | 61   |
| 7.4.4 Equivalent generator transient time constant $T'd_*$ .....                              | 61   |
| 7.4.5 DC time constant $T'_{dc*}$ .....                                                       | 63   |
| 7.4.6 Equivalent generator impedance .....                                                    | 63   |
| 8 System calculations .....                                                                   | 65   |
| 8.1 General .....                                                                             | 65   |
| 8.2 Effects of non-active components connected in series with active components ...           | 65   |
| 8.2.1 General .....                                                                           | 65   |
| 8.2.2 Generators .....                                                                        | 65   |
| 8.2.3 Motors .....                                                                            | 67   |
| 8.3 Short-circuit current at the generator busbars .....                                      | 67   |
| 8.3.1 Running parallel connected generators .....                                             | 67   |
| 8.3.2 Directly connected motors .....                                                         | 69   |
| 8.3.3 Motors and/or generators connected to other busses .....                                | 69   |
| 8.4 Short-circuit currents at secondary busses directly connected to the generator bus        | 69   |
| 8.5 Transformers .....                                                                        | 71   |
| 8.6 Semi-conductor converters used on variable speed drives .....                             | 71   |
| 8.7 Calculation procedures .....                                                              | 73   |
| 8.7.1 General .....                                                                           | 73   |
| 8.7.2 Short-circuit study procedure .....                                                     | 73   |
| 8.7.3 Definition of the system and problem and preparation of<br>a system study diagram ..... | 73   |
| 8.7.4 Component characteristic parameter identification .....                                 | 73   |
| 8.7.5 System impedance diagram .....                                                          | 75   |
| 8.7.6 Approximate calculation .....                                                           | 75   |
| 8.7.7 Estimate of suitable approximations .....                                               | 75   |
| 8.7.8 System calculation .....                                                                | 75   |
| 8.7.9 Calculation summary .....                                                               | 75   |
| 9 Interpretation and application of the results .....                                         | 77   |
| 9.1 General .....                                                                             | 77   |
| 9.2 Systems up to 1 kV .....                                                                  | 77   |
| 9.3 Systems above 1 kV .....                                                                  | 79   |

# COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

## INSTALLATIONS ÉLECTRIQUES À BORD DES NAVIRES ET DES PLATES-FORMES MOBILES ET FIXES EN MER –

### Partie 1: Evaluation des courants de court-circuit en c.a. triphasé

#### 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 présente partie de la Norme internationale CEI 61363 a été établie par le comité d'études 18 de la CEI: Installations électriques des navires et des unités mobiles et fixes en mer.

Cette norme annule et remplace la CEI 60363, parue en 1972.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

| FDIS        | Rapport de vote |
|-------------|-----------------|
| 18/831/FDIS | 18/837/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.



## INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**ELECTRICAL INSTALLATIONS OF SHIPS AND  
MOBILE AND FIXED OFFSHORE UNITS –****Part 1: Procedures for calculating short-circuit  
currents in three-phase a.c.**

## 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.

This part of International Standard IEC 61363 has been prepared by IEC technical committee 18: Electrical installations of ships and of mobile and fixed offshore units.

This standard cancels and replaces IEC 60363, published in 1972.

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

| FDIS        | Report on voting |
|-------------|------------------|
| 18/831/FDIS | 18/837/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.

## INSTALLATIONS ÉLECTRIQUES À BORD DES NAVIRES ET DES PLATES-FORMES MOBILES ET FIXES EN MER –

### Partie 1: Evaluation des courants de court-circuit en c.a. triphasé

#### 1 Domaine d'application et objet

La présente Norme internationale indique les procédures de calcul des courants de court-circuit qui peuvent survenir dans les installations électriques (c.a.) marines ou offshore.

Les méthodes de calcul peuvent être appliquées aux systèmes à courant alternatif triphasé en réseau non maillé,

- a) fonctionnant à 50 Hz ou 60 Hz;
- b) présentant l'une quelconque des tensions spécifiées dans le tableau 2 de la CEI 60092-201;
- c) ayant un ou plusieurs niveaux de tension différents;
- d) comportant des générateurs, des moteurs (synchrone et asynchrone), des transformateurs, des réactances bobinées, des câbles et des convertisseurs;
- e) dont le neutre est connecté à la coque du navire à travers une impédance (destinée à limiter le courant de court-circuit s'écoulant vers la coque du navire);
- f) dont le neutre est isolé de la coque du navire.

Seules les conditions de court-circuit des trois phases sont étudiées, c'est-à-dire avec les conducteurs des trois phases connectés ensemble, ou connectés à la coque du navire et pour lesquelles le court-circuit apparaît simultanément sur les trois pôles. Le calcul des courants de court-circuit dus à des conditions asymétriques peut conduire à des composantes apériodiques c.c. plus élevées et n'est pas pris en considération dans la présente norme.

Les formules de calcul et les méthodes donnent une précision suffisante pour déterminer le courant de court-circuit pendant les 100 premières millisecondes d'un défaut. Elles peuvent être utilisées pour le calcul de courant de court-circuit pour des périodes supérieures à 100 ms dans le cas d'un système de bus auquel les générateurs sont directement connectés. Au-delà de cette période, l'action des régulateurs de tension sur le système peut devenir prédominante et les calculs prenant en compte cette action sont considérés comme sortant du domaine de la présente norme.

La présente norme a pour objet de proposer des formules de calcul des courants de court-circuit des composants actifs d'un système électrique et d'indiquer comment ils peuvent être simplifiés pour les besoins de l'étude lors du calcul des courants de court-circuit pouvant se produire en divers endroits du système. Les calculs donnent une estimation des courants de court-circuit attendus, au moment où les composants actifs du système produisent leur contribution maximale.

Les formules de calcul sont établies à partir des théories de base de l'ingénierie électrique applicables aux composants des systèmes. Pour simplifier les méthodes de calcul, tout en maintenant un niveau de précision acceptable, les hypothèses pertinentes sont indiquées, ainsi que leurs effets sur les résultats des calculs.

La présente norme expose une méthodologie de calcul. Elle aide à l'application des formules simplifiées et à l'interprétation des résultats correspondants, au moment du choix d'un appareil de coupure. Elle n'est pas destinée à fournir d'autres informations, en plus du calcul des courants de court-circuit pouvant survenir dans le réseau.

## **ELECTRICAL INSTALLATIONS OF SHIPS AND MOBILE AND FIXED OFFSHORE UNITS –**

### **Part 1: Procedures for calculating short-circuit currents in three-phase a.c.**

#### **1 Scope and object**

This International Standard outlines procedures for calculating short-circuit currents that may occur on a marine or offshore a.c. electrical installation.

The calculation methods are for use on unmeshed three-phase alternating current systems,

- a) operating at 50 Hz or 60 Hz;
- b) having any system voltage specified in IEC 60092-201 table 2;
- c) having one or more different voltage levels;
- d) comprising generators, motors (both synchronous and asynchronous), transformers, reactor coils, cables, and converter units;
- e) having their neutral point connected to the ship's hull through an impedance (designed to limit the short-circuit current flowing to the ship's hull);
- f) having their neutral point isolated from the ship's hull.

The calculation procedures are for a three-phase symmetrical short-circuit condition i.e. three-phase conductors shorted together, or shorted to the ship's hull and for which the short-circuit occurs on all three poles simultaneously. The calculation of short-circuit currents resulting from asymmetric short-circuit conditions can lead to higher aperiodic (d.c.) components of the short-circuit current and is not considered in this standard.

The calculating formulae and methods described produce sufficiently accurate results to calculate the short-circuit current during the first 100 ms of a fault condition. They can be used to calculate the short-circuit current for periods longer than 100 ms when calculating on a bus system to which the generators are directly connected. For time periods beyond 100 ms the controlling effects of the system voltage regulators may be predominant. Calculations including the voltage regulator effects are not considered in this standard.

The object of this standard is to present formulae for calculating short-circuit currents of the active components of an electrical system and to indicate how such formulae may be simplified when calculating the short-circuit current at various locations on the electrical system. The calculations give estimates of the prospective short-circuit current when the system's active components produce their maximum contribution.

The calculating formulae are developed from basic electrical engineering theories relevant to the system components. To simplify the calculation methods yet retain an acceptable level of accuracy in the results, suitable assumptions are outlined and their effects on the calculation results indicated.

This standard provides a calculation procedure. It gives guidance on the interpretation and application of simplifying formulae and the corresponding results when applied to the selection of switchgear. The standard is not intended to provide any other information other than the calculation of the short-circuit current which may flow in the network.

Pour la compréhension des méthodes et des conséquences des résultats, il est supposé que la personne responsable de l'étude est familiarisée avec les bases utiles de l'ingénierie électrique.

## 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 Norme internationale. 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 Norme internationale 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 60034-4:1985, *Machines électriques tournantes – Partie 4: Méthodes pour la détermination à partir d'essais des grandeurs des machines synchrones*

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

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

CEI 60050(411):1996, *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) – Chapitre 411: Machines tournantes*

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

CEI 60092-201:1994, *Installations électriques à bord des navires – Partie 201: Conception des systèmes – Généralités*

CEI 60092-202:1994, *Installations électriques à bord des navires – Partie 202: Conception des systèmes – Protection*

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

## 3 Définitions, symboles, indices et exposants

### 3.1 Définitions

Pour les besoins de la présente Norme internationale, les définitions et symboles suivants sont applicables

#### 3.1.1

##### **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]

#### 3.1.2

##### **courant de court-circuit**

surintensité résultant d'un court-circuit ou due à un défaut ou à un branchement incorrect dans un circuit électrique. [VEI 441-11-07]

In order to understand the methods, and consequences of the results, it is assumed that the person responsible for initiating the short-circuit current calculations, is thoroughly familiar with valid electrical engineering fundamentals.

## 2 Normative references

The following normative documents contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this International Standard. At the time of publication, the editions indicated were valid. All normative documents are subject to revision, and parties to agreements based on this International Standard 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 60034-4:1985, *Rotating electrical machines – Part 4: Methods for determining synchronous machine quantities from tests*

IEC 60038:1983, *IEC standard voltages*

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

IEC 60050(411):1996, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 411: Rotating machinery*

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

IEC 60092-201:1994, *Electrical installations in ships – Part 201: System design – General*

IEC 60092-202:1994, *Electrical installations in ships – Part 202: System design – Protection*

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

## 3 Definitions, symbols, subscripts and superscripts

### 3.1 Definitions

For the purpose of this International Standard the following definitions and symbols apply.

#### 3.1.1

##### **short circuit**

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]

#### 3.1.2

##### **short-circuit current**

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

### 3.1.3

#### **courant présumé** (pour un dispositif de sectionnement)

courant de court-circuit qui s'écoulerait dans le circuit si chaque pôle du dispositif était remplacé par un conducteur d'impédance négligeable. [VEI 441-17-01 modifié]

### 3.1.4

#### **courant de court circuit symétrique**

valeur efficace de la composante symétrique alternative d'un courant de court-circuit présumé, la composante apériodique éventuelle du courant étant négligée. (3.4 de la CEI 60909)

### 3.1.5

#### **courant de court-circuit symétrique initial $I''_k$**

valeur efficace de la composante symétrique CA d'un courant de court-circuit présumé (disponible), applicable au moment du court-circuit si l'impédance conserve sa valeur au temps zéro (3.5 de la CEI 60909. Voir également la figure 2).

### 3.1.6

#### **courant de court-circuit subtransitoire $I''_{kd}$ en axe direct**

valeur efficace du courant de court-circuit parcourant un circuit avec machine(s) tournante(s) d'impédance (réactance) égale à l'impédance (réactance) subtransitoire du circuit.

### 3.1.7

#### **courant de court-circuit transitoire $I'_k$ en axe direct**

valeur efficace du courant de court-circuit parcourant un circuit avec machine(s) tournante(s) d'impédance (réactance), égale à l'impédance (réactance) transitoire du circuit.

### 3.1.8

#### **courant de court-circuit permanent $I_{kd}$ en axe direct**

valeur efficace du courant de court-circuit symétrique parcourant un circuit avec générateur(s) et qui demeure après l'extinction du phénomène transitoire.

### 3.1.9

#### **composante apériodique (c.c.) du courant de court-circuit $i_{dc}$**

composante du courant apparaissant dans un circuit immédiatement après un court-circuit brusque, les composantes du fondamental et aux fréquences plus élevées étant exclues

NOTE – C'est la valeur moyenne entre enveloppes supérieure et inférieure du courant de court-circuit décroissant de la valeur initiale  $A$  jusqu'à zéro (voir figure 2).

### 3.1.10

#### **courant de court-circuit crête $i_p$**

valeur instantanée maximale possible du courant de court-circuit présumé (disponible) (voir figure 2 et voir 3.8 de la CEI 60909).

NOTE – En courts-circuits triphasés, il est supposé que le court-circuit intervient simultanément sur tous les conducteurs de phase.

### 3.1.11

#### **constante de temps subtransitoire longitudinale en court-circuit $T''_d$**

temps nécessaire pour que la composante à amortissement rapide du courant longitudinal dans l'induit en court-circuit, présente dans les toutes premières périodes qui suivent une variation brusque des conditions de fonctionnement, décroisse jusqu'à  $1/e$ , c'est-à-dire 0,368 fois sa valeur initiale, la machine tournant à sa vitesse nominale. [VEI 411-48-30, modifiée]

### 3.1.12

#### **constante de temps subtransitoire longitudinale à circuit ouvert $T''_{d0}$**

temps nécessaire pour que la composante à amortissement rapide de la tension de l'induit à circuit ouvert, due au flux longitudinal, présente dans les toutes premières périodes qui suivent une variation brusque des conditions de fonctionnement, décroisse jusqu'à  $1/e$ , c'est-à-dire 0,368 fois sa valeur initiale, la machine tournant à sa vitesse nominale. [VEI 411-48-29, modifiée]

**3.1.3****prospective current** (with respect to a switching device)

short-circuit current that would flow in the circuit if each pole of the device were replaced by a conductor of negligible impedance. [IEV 441-17-01, modified]

**3.1.4****symmetrical short-circuit current**

r.m.s. value of the a.c. symmetrical component of a prospective (available) short-circuit current, the aperiodic component of current, if any, being neglected. (IEC 60909, subclause 3.4)

**3.1.5****initial symmetrical short-circuit current  $I''_k$** 

r.m.s. value of the a.c. symmetrical component of a prospective (available) short-circuit current applicable at the instant of short circuit if the impedance remains at zero-time value. (3.5 of IEC 60909, see also figure 2).

**3.1.6****subtransient short-circuit current  $I''_{kd}$  in the direct axis**

r.m.s. value of the short-circuit current flowing through a circuit with rotating machine(s) having an impedance (reactance) equal to the subtransient impedance (reactance) of the circuit.

**3.1.7****transient short-circuit current  $I'_k$  in the direct axis**

r.m.s. value of the short-circuit current flowing through a circuit with rotating machine(s) having an impedance (reactance) equal to the transient impedance (reactance) of the circuit.

**3.1.8****steady-state short-circuit current  $I_{kd}$  in the direct axis**

r.m.s. value of the short-circuit symmetrical current flowing through a circuit with generator(s) which remains after the decay of the transient phenomena.

**3.1.9****aperiodic (d.c.) component of the short-circuit current  $i_{dc}$** 

component of current in a circuit immediately after it has been suddenly short-circuited, all components of fundamental and higher frequencies being excluded.

NOTE – It is the mean value between the top and bottom envelope of a short-circuit current decaying from an initial value  $A$  to zero according to figure 2.

**3.1.10****peak short-circuit current  $i_p$** 

maximum possible instantaneous value of the prospective (available) short-circuit current (see figure 2 and 3.8 of IEC 60909).

NOTE – For three-phase short circuits it is assumed that the short circuit occurs simultaneously in all phase conductors.

**3.1.11****direct-axis subtransient short-circuit time constant  $T''_d$** 

time required for the rapidly changing component, present during the first few cycles in the direct-axis short-circuit current following a sudden change in operating conditions, to decrease to  $1/e$ , i.e. 0,368 of its initial value, the machine (or equivalent machine) running at rated speed. [IEV 411-48-30, modified]

**3.1.12****direct-axis subtransient open-circuit time constant  $T''_{do}$** 

time required for the rapidly changing component present during the first few cycles of the open-circuit primary winding voltage which is due to direct-axis flux following a sudden change in operation, to decrease to  $1/e$  i.e. 0,368 of its initial value, the machine running at rated speed. [IEV 411-48-29, modified]



### 3.1.13

#### **constante de temps transitoire longitudinale en court-circuit $T'_d$**

temps nécessaire pour que la composante à amortissement lent du courant longitudinal dans l'induit en court-circuit, à la suite d'une variation brusque des conditions de fonctionnement, décroisse jusqu'à  $1/e$ , c'est-à-dire 0,368 fois sa valeur initiale, la machine tournant à sa vitesse nominale. [VEI 411-48-28, modifiée]

### 3.1.14

#### **constante de temps transitoire longitudinale à circuit ouvert $T'_{do}$**

temps nécessaire pour que la composante à amortissement lent de la tension de l'induit à circuit ouvert, due au flux longitudinal, à la suite d'une variation brusque des conditions de fonctionnement, décroisse jusqu'à  $1/e$ , c'est-à-dire 0,368 fois sa valeur initiale, la machine tournant à sa vitesse nominale. [VEI 411-48-27, modifiée]

### 3.1.15

#### **constante de temps continue $T_{dc}$**

temps nécessaire pour que la composante continue présente dans le courant de court-circuit qui suit une variation brusque des conditions de fonctionnement décroisse jusqu'à  $1/e$ , c'est-à-dire 0,368 fois sa valeur initiale, la machine tournant à vitesse nominale (voir article 20 de la CEI 60034-4).

### 3.1.16

#### **réactance subtransitoire longitudinale $X''_d$ (valeur saturée)**

quotient de la valeur initiale d'une variation brusque du terme fondamental de la composante de la tension d'induit, produite par le flux longitudinal total, par la valeur de la variation simultanée du terme fondamental de la composante du courant d'induit longitudinal, la machine tournant à sa vitesse nominale [VEI 411-50-11, modifiée]

### 3.1.17

#### **réactance transitoire longitudinale $X'_d$ (valeur saturée)**

quotient de la valeur initiale d'une variation brusque du terme fondamental de la composante de la tension d'induit, produite par le flux longitudinal total, par la valeur de la variation simultanée du terme fondamental de la composante du courant d'induit longitudinal, la machine tournant à sa vitesse nominale et les composantes à amortissement rapide pendant les premières périodes étant négligées [VEI 411-50-09, modifiée]

### 3.1.18

#### **réactance synchrone en axe direct $X_d$**

quotient de la valeur permanente de la composante fondamentale c.a. de la tension primaire produite par le flux primaire total en axe direct, par le courant primaire en axe direct après décroissance du phénomène transitoire.

### 3.1.19

#### **résistance statorique d'un générateur $R_a$**

résistance du stator d'une machine synchrone mesurée en courant continu

### 3.1.20

#### **impédance de court-circuit $Z$**

quotient de la tension sinusoïdale par phase d'un système équilibré c.a. par la composante à la même fréquence du courant de court-circuit de ce système

### 3.1.21

#### **sources de tension**

élément actif qui peut être représenté par une source idéale de tension indépendante de tout courant ou tension du circuit, associée à un élément passif en série. [VEI 131-01-37]



**3.1.13****direct-axis transient short-circuit time constant  $T'_d$** 

time required for the slowly changing component of the direct-axis short-circuit primary current following a sudden change in operating conditions, to decrease to  $1/e$  i.e. 0,368 of its initial value, the machine running at rated speed. [IEC 411-48-28, modified]

**3.1.14****direct-axis transient open-circuit time constant  $T'_{do}$** 

time required for a slowly changing component of the open-circuit primary voltage, which is due to the direct-axis flux, following a sudden change in operating conditions, to decrease to  $1/e$  i.e. 0,368 of its initial value, the machine running at rated speed. [IEV 411-48-27, modified]

**3.1.15****DC time constant  $T_{dc}$** 

time required for the d.c. component present in the short-circuit current, following a sudden change in operating conditions, to decrease to  $1/e$  i.e. 0,368 of its initial value, the machine running at rated speed (see clause 20 of IEC 60034-4).

**3.1.16****direct-axis subtransient reactance  $X''_d$  (saturated value)**

quotient of the initial value of a sudden change in that fundamental a.c. component of primary voltage, which is produced by the total direct-axis primary flux, and the value of the simultaneous change in fundamental a.c. component of direct-axis primary current, the machine running at rated speed. [IEV 411-50-11, modified].

**3.1.17****direct-axis transient reactance  $X'_d$  (saturated value)**

quotient of the initial value of a sudden change in that fundamental a.c. component of primary voltage which is produced by the total direct-axis primary flux, and the value of the simultaneous change in fundamental a.c. component of direct-axis primary current, the machine running at rated speed and the high decrement components during the first cycles being excluded. [IEV 411-50-09, modified]

**3.1.18****direct-axis synchronous reactance  $X_d$** 

quotient of the steady-state value of that fundamental a.c. component of primary voltage which is produced by the total direct-axis primary flux, and direct-axis primary current after the decay of the transient phenomena.

**3.1.19****stator resistance of a generator  $R_a$** 

resistance of the stator of a synchronous machine, measured at d.c. current.

**3.1.20****short-circuit impedance  $Z$** 

quotient of the sinusoidal voltage per phase on a balanced a.c. system and the same frequency component of the short-circuit current in that system.

**3.1.21****voltage source**

active element which can be represented by an ideal voltage source independent of all currents and voltages in the circuit, in series with a passive circuit element. [IEV 131-01-37]

### 3.1.22

#### **tension nominale du système $U_n$**

tension (entre phases) par laquelle un système est désigné et à laquelle se réfèrent certaines caractéristiques de fonctionnement (voir la CEI 60038).

### 3.1.23

#### **tension subtransitoire d'une machine tournante $E''$**

valeur efficace de la tension interne symétrique d'une machine qui est active à travers l'impédance subtransitoire  $Z''$  au moment du court-circuit.

### 3.1.24

#### **tension transitoire d'une machine tournante $E'$**

valeur efficace de la tension interne symétrique d'une machine qui est active à travers l'indépendance transitoire  $Z'$  pendant le court-circuit.

### 3.1.25

#### **valeur nominale ( $n$ )**

valeur approchée appropriée d'une grandeur, utilisée pour dénommer ou identifier un composant, un dispositif ou un matériel. [VEI 151-04-01]

### 3.1.26

#### **valeur assignée ( $r$ )**

valeur d'une grandeur fixée, généralement par le constructeur, pour le fonctionnement spécifié d'un composant, d'un dispositif ou d'un matériel. [VEI 151-04-03]

### 3.1.27

#### **générateur équivalent (moteur équivalent)**

générateur (moteur) fictif dont les caractéristiques produiraient, en tout point d'une installation électrique, le même courant de court-circuit que celui que produit un ensemble de générateurs (moteurs) connectés au système et présentant différentes caractéristiques et caractéristiques assignées. (Voir article 7).

## 3.2 Symboles

Les équations sont écrites sans unités spécifiées. Les symboles représentent des quantités possédant à la fois des valeurs numériques et des dimensions indépendantes des unités, pourvu qu'un système d'unités cohérent soit retenu, c'est-à-dire le système international d'unités (SI).

Pour les impédances, réactances, résistances, chutes de tension, une lettre majuscule indique une valeur absolue, une minuscule une valeur relative (par unité ou en pourcentage).

Pour les valeurs évoluant dans le temps (courant, tension), une majuscule indique la valeur efficace, une minuscule la valeur instantanée.

|                |                                                                                                        |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\phi$         | angle de déphasage                                                                                     |
| $E''_q$ $E'_q$ | tensions subtransitoire et transitoire en axe quadrature d'un générateur (valeur efficace)             |
| $E''_M$        | tension subtransitoire d'un moteur (valeur efficace)                                                   |
| $f$            | fréquence                                                                                              |
| $f_e$          | fréquence la plus basse d'un générateur de ligne d'arbres                                              |
| $f_r$          | fréquence assignée d'un réseau                                                                         |
| $I''_*$ $I'_*$ | courants de courts-circuits subtransitoire et transitoire d'un générateur équivalent (valeur efficace) |
| $I_*$          | courant du générateur équivalent (valeur efficace)                                                     |

**3.1.22****nominal system voltage  $U_n$** 

voltage (line-to-line) by which a system is designated and to which certain operating characteristics are referred (see IEC 60038).

**3.1.23****subtransient voltage of a rotating machine  $E''$** 

r.m.s. value of the symmetrical internal voltage of a machine which is active behind the subtransient impedance  $Z''$  at the moment of short circuit.

**3.1.24****transient voltage of a rotating machine  $E'$** 

r.m.s. value of the symmetrical internal voltage of a machine which is active behind the transient impedance  $Z'$  at the moment of short circuit.

**3.1.25****nominal value ( $n$ )**

suitable approximate quantity value used to designate or identify a component, device or equipment. [IEV 151-04-01]

**3.1.26****rated value ( $r$ )**

quantity value assigned, generally by a manufacturer, for a specified operating condition of a component, device or equipment. [IEV 151-04-03]

**3.1.27****equivalent generator (motor)**

fictitious generator (motor) having characteristics which will produce the same short-circuit current at any point on an electrical installation, as would be produced by a combination of generators (motors) having different ratings and different characteristics, which are connected to the system (see clause 7).

**3.2 Symbols**

All equations are written without units specified. The symbols represent quantities possessing both numerical values and dimensions that are independent of units provided a coherent unit system is chosen, i.e. "système international d'unités (SI)".

In case of impedance, reactance, resistance and voltage drops, capital letters denote absolute values and lower-case letters denote relative values (per unit or per cent).

For time-dependent values (current, voltage), capital letters denote r.m.s. values and lower, case letters denote momentary (instantaneous) values.

|                |                                                                                       |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| $\phi$         | phase angle                                                                           |
| $E''_q$ $E'_q$ | subtransient and transient q-axis voltage of a generator (r.m.s.)                     |
| $E''_M$        | subtransient voltage of a motor (r.m.s.)                                              |
| $f$            | frequency                                                                             |
| $f_e$          | lowest frequency of a shaft generator                                                 |
| $f_r$          | rated frequency of a network                                                          |
| $I''_*$ $I'_*$ | subtransient and transient short-circuit current of the equivalent generator (r.m.s.) |
| $I_*$          | current of an equivalent generator (r.m.s.)                                           |

|                    |                                                                                                                       |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $I''_M I''_{M*}$   | courant de court-circuit subtransitoire d'un moteur asynchrone et d'un moteur équivalent (valeur efficace)            |
| $I''_{kd} I'_{kd}$ | courants de courts-circuits initiaux subtransitoire et transitoire d'une machine synchrone (valeur efficace)          |
| $I$                | courant (valeur efficace)                                                                                             |
| $I_{ac}$           | composante alternative du courant de court-circuit d'une machine synchrone (valeur efficace)                          |
| $I_{acM}$          | courant symétrique de court-circuit d'un moteur asynchrone (valeur efficace)                                          |
| $I_{LR}$           | courant rotorique de moteur calé asynchrone                                                                           |
| $i_{dc}$           | composante continue du courant de court-circuit d'une machine synchrone (valeur instantanée)                          |
| $i_{dcM}$          | composante continue du courant de court-circuit d'un moteur asynchrone et d'un moteur équivalent (valeur instantanée) |
| $i_k$              | enveloppe supérieure du courant de court-circuit                                                                      |
| $I_*$              | courant de court-circuit permanent d'un générateur équivalent (valeur efficace)                                       |
| $I_{kd}$           | courant de court-circuit permanent d'une machine synchrone (valeur efficace)                                          |
| $i_M$              | enveloppe supérieure du courant de court-circuit d'un moteur asynchrone                                               |
| $i_p i_{pM}$       | valeur crête des courants de court-circuit d'une machine synchrone et d'un moteur asynchrone                          |
| $I_r$              | courant assigné (valeur efficace)                                                                                     |
| $L''_{SC}$         | inductance subtransitoire d'un condensateur synchrone d'un système à générateur de ligne d'arbres (machine synchrone) |
| $L''_{SG}$         | inductance subtransitoire d'un système de générateur de ligne d'arbres synchrone à convertisseur                      |
| $L_C$              | inductance de câble                                                                                                   |
| $L_{com}$          | inductance des bobines de commutation d'un système de générateur de ligne d'arbres synchrone à convertisseur          |
| $L_{dc}$           | inductance du circuit c.c. d'un système de générateur de ligne d'arbres synchrone à convertisseur                     |
| $P_{Cu}$           | pertes cuivre d'un transformateur à fréquence assignée                                                                |
| $R$                | résistance                                                                                                            |
| $R_*$              | résistance d'une machine synchrone équivalente                                                                        |
| $R_a$              | résistance statorique d'une machine synchrone                                                                         |
| $R_C$              | résistance de câble                                                                                                   |
| $R_{dc}$           | résistance c.c.                                                                                                       |
| $R_M$              | résistance d'un moteur asynchrone                                                                                     |
| $R_R$              | résistance rotorique d'un moteur asynchrone                                                                           |
| $R_{R*}$           | résistance rotorique d'un moteur asynchrone équivalent                                                                |
| $R_S$              | résistance statorique d'un moteur asynchrone                                                                          |
| $R_{S*}$           | résistance statorique d'un moteur asynchrone équivalent                                                               |
| $R_T$              | résistance d'un transformateur                                                                                        |
| $S_{rT}$           | puissance assignée d'un transformateur                                                                                |
| $t$                | temps écoulé depuis le début du court-circuit                                                                         |
| $t_r$              | rapport de la tension haute assignée à la tension basse assignée d'un transformateur                                  |
| $t_x$              | durée de temps déterminée après le début d'un court-circuit                                                           |

|                    |                                                                                                              |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $I''_M I''_{M*}$   | subtransient short-circuit current of an asynchronous motor and an equivalent motor (r.m.s.)                 |
| $I''_{kd} I'_{kd}$ | subtransient and transient initial short-circuit current of a synchronous machine (r.m.s.)                   |
| $I$                | current (r.m.s.)                                                                                             |
| $I_{ac}$           | a.c. component of the short-circuit current of a synchronous machine (r.m.s.)                                |
| $I_{acM}$          | symmetrical short-circuit current of an asynchronous motor (r.m.s.)                                          |
| $I_{LR}$           | asynchronous motor locked rotor current                                                                      |
| $i_{dc}$           | d.c. component of the short-circuit current of a synchronous machine (instantaneous)                         |
| $i_{dcM}$          | d.c. component of the short-circuit current of an asynchronous motor and an equivalent motor (instantaneous) |
| $i_k$              | upper envelope of the short-circuit current                                                                  |
| $I_*$              | steady-state short-circuit current of an equivalent generator (r.m.s.)                                       |
| $I_{kd}$           | steady-state short-circuit current of a synchronous machine (r.m.s.)                                         |
| $i_M$              | upper envelope of the short-circuit current of an asynchronous motor                                         |
| $i_p i_{pM}$       | peak value of the short-circuit current of a synchronous machine and an asynchronous motor                   |
| $I_r$              | rated current (r.m.s.)                                                                                       |
| $L''_{SC}$         | subtransient inductance of a synchronous condenser of a shaft generator system (synchronous machine)         |
| $L''_{SG}$         | subtransient inductance of a synchronous shaft generator system with converter                               |
| $L_C$              | cable inductance                                                                                             |
| $L_{com}$          | inductance of the commutation coils of a synchronous shaft generator system with converter                   |
| $L_{dc}$           | inductance of the d.c. circuit of a synchronous shaft generator system with converter                        |
| $P_{Cu}$           | copper losses of a transformer at rated frequency                                                            |
| $R$                | resistance                                                                                                   |
| $R_*$              | resistance of an equivalent generator                                                                        |
| $R_a$              | stator resistance of a synchronous machine                                                                   |
| $R_C$              | cable resistance                                                                                             |
| $R_{dc}$           | d.c. resistance                                                                                              |
| $R_M$              | resistance of an asynchronous motor                                                                          |
| $R_R$              | rotor resistance of an asynchronous motor                                                                    |
| $R_{R*}$           | rotor resistance of an equivalent asynchronous motor                                                         |
| $R_S$              | stator resistance of an asynchronous motor                                                                   |
| $R_{S*}$           | stator resistance of an equivalent asynchronous motor                                                        |
| $R_T$              | resistance of a transformer                                                                                  |
| $S_{rT}$           | rated power of a transformer                                                                                 |
| $t$                | time duration from the beginning of a short circuit                                                          |
| $t_r$              | the quotient of the rated high voltage and the rated low voltage of a transformer                            |
| $t_x$              | defined time duration from the beginning of a short circuit                                                  |

|                      |                                                                                                                |
|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $T''_d$ $T'_d$       | constantes de temps subtransitoire et transitoire d'une machine synchrone                                      |
| $T''_{d*}$ $T'_{d*}$ | constantes de temps subtransitoire et transitoire d'un générateur équivalent                                   |
| $T''_{do}$ $T'_{do}$ | constantes de temps en circuit ouvert d'une machine synchrone                                                  |
| $T''_e$ $T'_e$       | constantes de temps subtransitoire et transitoire d'une machine synchrone comportant des composants non actifs |
| $T''_M$ $T'_{M*}$    | constantes de temps subtransitoire d'un moteur asynchrone et d'un moteur asynchrone équivalent                 |
| $T''_{Me}$           | constante de temps subtransitoire d'un moteur asynchrone équivalent avec ses câbles de raccordement            |
| $T_{dc}$ $T_{dc*}$   | constantes de temps c.c. d'une machine synchrone et d'une machine synchrone équivalente                        |
| $T_{dce}$            | constante de temps c.c. d'une machine synchrone comprenant des composants non actifs                           |
| $T_{dcM}$ $T_{dcM*}$ | constantes de temps c.c. d'un moteur asynchrone et d'un moteur asynchrone équivalent                           |
| $T_{dcMe}$           | constante de temps c.c. d'un moteur asynchrone avec ses câbles de raccordement                                 |
| $U_0$                | tension avant défaut (entre phases)                                                                            |
| $U_n$                | tension nominale (entre phases)                                                                                |
| $U_r$                | tension assignée (entre phases)                                                                                |
| $u_{rk}$             | tension de court-circuit assignée d'un transformateur                                                          |
| $u_{rL}$             | tension de court-circuit assignée d'une bobine de réaction                                                     |
| $U_{rM}$             | tension assignée d'un moteur                                                                                   |
| $u_{rR}$             | tension résistive assignée d'un transformateur                                                                 |
| $\omega_r$           | $2\pi f_r$                                                                                                     |
| $X''_*$              | réactance subtransitoire d'un générateur équivalent                                                            |
| $X$                  | réactance                                                                                                      |
| $X''_d$ $X'_d$       | réactances subtransitoire et transitoire d'une machine synchrone en axe direct                                 |
| $X''_M$              | réactance subtransitoire d'un moteur asynchrone                                                                |
| $X''_{M*}$           | réactance subtransitoire d'un moteur asynchrone équivalent                                                     |
| $X''_{Me}$           | réactance subtransitoire d'un moteur asynchrone avec ses câbles de raccordement                                |
| $X_d$                | réactance d'une machine synchrone en axe direct                                                                |
| $X_R$ $X_S$          | réactances rotorique et statorique d'un moteur asynchrone                                                      |
| $X_L$                | réactance d'une bobine                                                                                         |
| $X_T$                | réactance d'un transformateur                                                                                  |
| $Z$ $Z_*$            | impédance et impédance équivalente                                                                             |
| $Z''_*$              | impédance subtransitoire d'un générateur équivalent                                                            |
| $Z''_d$ $Z'_d$       | impédances subtransitoire et transitoire d'une machine synchrone                                               |
| $Z''_e$ $Z'_e$       | impédances subtransitoire et transitoire d'une machine synchrone comportant des composants non actifs          |
| $Z''_M$              | impédance subtransitoire d'un moteur asynchrone                                                                |
| $Z''_{M*}$           | impédance subtransitoire d'un moteur asynchrone équivalent                                                     |
| $Z_T$                | impédance d'un transformateur                                                                                  |

|                      |                                                                                                       |
|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $T''_d \ T'_d$       | subtransient and transient time constant of a synchronous machine                                     |
| $T''_{d*} \ T'_{d*}$ | subtransient and transient time constant of an equivalent generator                                   |
| $T''_{do} \ T'_{do}$ | subtransient and transient open-circuit time constant of a synchronous machine                        |
| $T''_e \ T'_e$       | subtransient and transient time constant of a synchronous machine including the non-active components |
| $T''_M \ T'_M$       | subtransient time constant of an asynchronous motor and an equivalent asynchronous motor              |
| $T''_{Me}$           | subtransient time constant of an equivalent asynchronous motor including the connecting cables        |
| $T_{dc} \ T_{dc*}$   | d.c. time constant of a synchronous machine and an equivalent generator                               |
| $T_{dce}$            | d.c. time constant of a synchronous machine including the non-active components                       |
| $T_{dcM} \ T_{dcM*}$ | d.c. time constant of an asynchronous motor and an equivalent asynchronous motor                      |
| $T_{dcMe}$           | d.c. time constant of an asynchronous motor including the connecting cables                           |
| $U_0$                | prefault voltage (line-to-line)                                                                       |
| $U_n$                | nominal voltage (line-to-line)                                                                        |
| $U_r$                | rated voltage (line-to-line)                                                                          |
| $u_{rk}$             | rated short-circuit voltage of a transformer                                                          |
| $u_{rL}$             | rated short-circuit voltage of a reactor coil                                                         |
| $U_{rM}$             | rated voltage of a motor                                                                              |
| $u_{rR}$             | rated ohmic voltage of a transformer                                                                  |
| $\omega_r$           | $2\pi f_r$                                                                                            |
| $X''_*$              | subtransient reactance of an equivalent generator                                                     |
| $X$                  | reactance                                                                                             |
| $X''_d \ X'_d$       | subtransient and transient reactance of a synchronous machine in the d-axis                           |
| $X''_M$              | subtransient reactance of an asynchronous motor                                                       |
| $X''_{M*}$           | subtransient reactance of an equivalent asynchronous motor                                            |
| $X''_{Me}$           | subtransient reactance of an asynchronous motor including the connecting cables                       |
| $X_d$                | reactance of a synchronous machine in the d-axis                                                      |
| $X_R \ X_S$          | rotor and stator reactance of an asynchronous motor                                                   |
| $X_L$                | reactance of a coil                                                                                   |
| $X_T$                | reactance of a transformer                                                                            |
| $Z \ Z_*$            | impedance and equivalent impedance                                                                    |
| $Z''_*$              | subtransient impedance of an equivalent generator                                                     |
| $Z''_d \ Z'_d$       | subtransient and transient impedance of a synchronous machine                                         |
| $Z''_e \ Z'_e$       | subtransient and transient impedance of a synchronous machine including the non-active components     |
| $Z''_M$              | subtransient impedance of an asynchronous motor                                                       |
| $Z''_{M*}$           | subtransient impedance of an equivalent asynchronous motor                                            |
| $Z_T$                | impedance of a transformer                                                                            |

### 3.3 Indices

|                                               |                                                                  |
|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| *                                             | générateur ou moteur asynchrone équivalent                       |
| 0                                             | conditions avant défaut                                          |
| ac                                            | courant alternatif                                               |
| C                                             | câble                                                            |
| com                                           | bobine de communication d'un générateur de ligne d'arbres        |
| d                                             | axe direct                                                       |
| dc                                            | courant continu                                                  |
| e                                             | valeur comprenant des composants non actifs (externes)           |
| $\underline{E}, \underline{I}, \underline{U}$ | valeurs complexes de E, I, U                                     |
| G                                             | générateur synchrone                                             |
| HV                                            | côté haute tension d'un transformateur                           |
| i                                             | nombre de générateurs                                            |
| j                                             | nombre de moteurs                                                |
| k                                             | court-circuit                                                    |
| L                                             | inductance                                                       |
| LV                                            | côté basse tension d'un transformateur                           |
| M                                             | moteur ou groupe de moteurs asynchrones                          |
| n                                             | valeur nominale                                                  |
| q                                             | axe en quadrature                                                |
| R                                             | rotor d'un moteur asynchrone                                     |
| r                                             | valeur assignée                                                  |
| S                                             | stator d'un moteur asynchrone                                    |
| SC                                            | machine condensateur synchrone d'un générateur de ligne d'arbres |
| SG                                            | générateur de ligne d'arbres                                     |
| To                                            | total                                                            |
| T                                             | transformateur                                                   |
| $\underline{Z}$                               | valeur complexe d'une impédance                                  |

### 3.4 Exposants

|   |                       |
|---|-----------------------|
| " | valeur subtransitoire |
| ' | valeur transitoire    |

## 4 Information introductive

### 4.1 Généralités

Le projet, la conception et la conduite d'une installation électrique marine ou offshore peut nécessiter plusieurs études visant à évaluer la performance, la fiabilité, la sûreté et le fonctionnement du système en conditions normales et en cas de court-circuit. De telles études peuvent intéresser le débit en charge, la stabilité, le démarrage des moteurs, les conditions transitoires, la mise à la masse ou les harmoniques. L'ingénieur concepteur doit décider des études requises par le niveau de complexité d'un système particulier. L'étude des courants de court-circuit est considérée comme indispensable pour les systèmes d'installations marines ou offshore, quelle que soit leur étendue ou leur complexité.



### 3.3 Subscripts

|                                                     |                                                  |
|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| *                                                   | equivalent generator or asynchronous motor       |
| 0                                                   | prefault conditions                              |
| ac                                                  | alternating current                              |
| C                                                   | cable                                            |
| com                                                 | commutation coil of a shaft generator            |
| d                                                   | direct axis                                      |
| dc                                                  | direct current                                   |
| e                                                   | value including non-active components (external) |
| $\underline{E}$ , $\underline{I}$ , $\underline{U}$ | phasors of E, I, U                               |
| G                                                   | synchronous generator                            |
| HV                                                  | high-voltage side of a transformer               |
| i                                                   | number of generators                             |
| j                                                   | number of motors                                 |
| k                                                   | short circuit                                    |
| L                                                   | inductance                                       |
| LV                                                  | low-voltage side of a transformer                |
| M                                                   | asynchronous motor or group of motors            |
| n                                                   | nominal value                                    |
| q                                                   | quadrature-axis                                  |
| R                                                   | rotor of an asynchronous motor                   |
| r                                                   | rated value                                      |
| S                                                   | stator of an asynchronous motor                  |
| SC                                                  | shaft generator synchronous condenser machine    |
| SG                                                  | shaft generator                                  |
| To                                                  | total                                            |
| T                                                   | transformer                                      |
| $\underline{Z}$                                     | complex impedance                                |

### 3.4 Superscripts

|   |                    |
|---|--------------------|
| " | subtransient value |
| ' | transient value    |

## 4 Introductory information

### 4.1 General

The planning, design and operation of a marine or offshore electrical installation may require several studies to assist in the evaluation of system performance, reliability, safety and operation under both normal and short-circuit conditions. Such studies may be for load flow, stability, motor starting, transient conditions, earthing or harmonics. The system design engineer decides which studies are required for any particular installation. Short-circuit current studies are considered to be the most likely required for marine and offshore systems, regardless of their size and complication.

Dans un système réel, l'action des régulateurs automatiques et les non-linéarités des machines couplées en parallèle influent sur les courants résultants. Le calcul précis des courants résultant de ces effets se situe au-delà du domaine de la présente norme et devrait faire appel aux techniques informatiques de simulation.

Il convient que les systèmes électriques des structures marines et offshore soient conçus de sorte que toutes les précautions possibles soient prises pour empêcher les courts-circuits. Le principal objectif est d'assurer que le système et ses composants sont capables de résister aux effets des courts-circuits et ainsi limitent les dommages entraînés à leur minimum. La protection des systèmes contre les courants de court-circuit est normalement réalisée par des fusibles et des disjoncteurs. Le principal objet de ces calculs est de fournir les informations suffisantes pour permettre le choix de ces appareils en s'assurant qu'ils pourront procurer la protection nécessaire. En outre, les calculs peuvent aider à sélectionner des équipements capables de limiter les courants de court-circuit aux possibilités des appareils de protection.

Lorsque l'on calcule des courants de court-circuit, il importe de distinguer ceux générés par un seul équipement de ceux résultant de la connexion de plusieurs équipements en un système. Lorsque l'on considère une machine isolée, seuls les paramètres électriques de cette machine affectent le courant généré par le court-circuit. Alors que dans un système, ce courant est limité par l'impédance des composants non actifs, tels que câbles, transformateurs, etc., constituants du système, modifiant à la fois les valeurs transitoires et permanentes du courant de court-circuit résultant.

La plupart des systèmes électriques des installations marines ou offshore fonctionnent avec le neutre isolé de la coque, ou bien relié à la coque à travers une impédance. Dans de tels systèmes, le courant de court-circuit le plus important est celui du court-circuit des trois phases. Si le neutre est relié directement à la coque, alors le court-circuit entre les phases et la masse, ou entre une phase et la masse, peut produire un courant plus fort.

#### 4.2 Précision des calculs

L'article 5 présente des équations pour le calcul des courants de court-circuit des divers composants actifs d'un système.

Lors de l'analyse des résultats des calculs, il faut avoir conscience de la précision résultant de la détermination des paramètres caractéristiques des composants actifs qui déterminent l'amplitude du courant de court-circuit. Les tolérances acceptées pour les impédances subtransitoire et transitoire peuvent modifier le courant de court-circuit calculé dans une mesure qui dépasse les tolérances acceptées pour les constantes de temps. Les équations des composants actifs avancées dans la présente norme sont considérées décrire les conditions de court-circuit triphasé avec une précision suffisante pour des applications pratiques.

Lorsque le calcul s'applique à un système, la précision du résultat dépend non seulement de la précision propre aux paramètres caractéristiques des composants, mais aussi de la méthode de calcul utilisée, de la formule de calcul et de l'importance relative d'un composant particulier dans le système, eu égard à sa propension à favoriser ou à atténuer le courant de court-circuit. Des hypothèses peuvent être faites pour simplifier les procédures de calcul, (voir article 6) mais elles auront pour résultat de diminuer la précision. Des simplifications judicieuses produiront des résultats conservatoires, conduisant à des valeurs du courant de court-circuit supérieures à ce qui se produirait réellement dans le système physique.

#### 4.3 Hypothèses de base

Il convient que le calcul complet d'un courant de court-circuit fournisse la valeur du courant à chaque moment, depuis son début jusqu'à sa fin. Il devrait prendre en considération les conditions avant charge, les caractéristiques propres des composants actifs, les effets d'amortissement des composants non actifs et la tension instantanée en divers points du système au départ du court-circuit.

In a practical system, the controlling effects of the automatic regulators and non-linearity of the parallel connected machines will affect the resulting currents. To calculate precisely the currents resulting from these effects is beyond the scope of this standard, and should be done using computer simulation techniques.

A marine and offshore structure electrical system should be designed to ensure that all possible precautions have been taken to prevent short-circuit currents occurring. The principal objective of calculating the short-circuit current is to ensure that the system and its components are capable of withstanding the effects of the short-circuit conditions, and thereby limit any resulting damage to a minimum. System short-circuit current protection is normally provided by fuses and circuit-breakers. The principle intent of these calculations is to provide sufficient information to enable such devices to be selected with confidence that they are capable of providing the necessary protection. In addition, the calculations may be used to help select devices capable of limiting the short-circuit current to within the capabilities of the protective devices.

When calculating short-circuit currents, it is important to understand the difference between the short-circuit current generated by an individual piece of equipment, and the short-circuit current which results when several pieces of equipment are connected in a system. When an isolated machine is being considered, only the electrical parameters of the machine affect the short-circuit current generated. In a system, however, this current is limited by the impedance of the non-active components, for example, cables, transformers, etc., forming the system, changing both the transient and steady-state values of the resulting short-circuit current.

The majority of marine/offshore electrical systems are operated with the neutral point insulated from the hull or connected to it through an impedance. In such systems, the highest value of short-circuit current is the three-phase short circuit. If the neutral point is directly connected to the hull, then the line-to-line to ship's hull, or line-to-ship's hull short circuit may produce a higher current.

## 4.2 Calculation accuracy

Clause 5 outlines equations for calculating the short-circuit current of various system active components.

When analyzing the calculation results, cognizance should be given to the inherent accuracy involved in determining the characteristic parameters of the active components which determine the magnitude of the short-circuit current. The tolerances accepted for the subtransient and transient impedance may change the calculated short-circuit current to a greater extent than the tolerances accepted for the time constants. The active component equations developed in this standard are considered to describe the three-phase short-circuit conditions within sufficient accuracy for practical applications.

When applied to system calculations, the accuracy of the final result depends not only on the inherent accuracy of the component characteristic parameters but also on the method of calculation used, the calculating formulae and the relative importance of a particular component in the system with regard to its ability to produce or attenuate short-circuit current. Assumptions can be made in order to simplify the calculating procedures (see clause 6), but simplifications will result in a loss of accuracy. Good simplifications will produce conservative results leading to higher values of short-circuit current than would actually flow in the physical system.

## 4.3 Basic assumptions

A complete short-circuit current calculation should give the value of the current at each point in time, from its initiation until its finish. The calculation should give cognizance to the preload conditions, the inherent characteristics of the active components, the damping effects of the non-active components, and the instantaneous voltage at the different points of the system at the start of the short circuit.

Un tel calcul n'est pas considéré comme indispensable dans la plupart des applications pratiques de l'industrie et, par conséquent, se situe hors du domaine de la présente norme.

Les formules décrites ici calculent l'enveloppe supérieure des valeurs maximales des courants de court-circuit variables dans le temps (voir figure 2). L'enveloppe est calculée en utilisant les paramètres caractéristiques des machines, disponibles auprès des fabricants d'équipement qui pratiquent des méthodes d'essai reconnues et qui adoptent les hypothèses suivantes:

- a) les capacités du système sont négligées;
- b) au début du court-circuit, la valeur instantanée de la tension dans une phase à l'endroit du défaut est nulle;
- c) pendant la durée du court-circuit, il n'y a pas de modification du trajet du courant de court-circuit;
- d) l'impédance des arcs de court-circuit est négligée;
- e) les transformateurs sont disposés sur l'alimentation principale;
- f) le court-circuit intervient simultanément sur les trois phases;
- g) des générateurs en parallèle se partagent proportionnellement leurs charges active et réactive au début et pendant la durée du court-circuit;
- h) pendant chaque intervalle élémentaire de temps, les composants réagissent de façon linéaire.

Avec les hypothèses ci-avant, les résultats de calcul sont considérés comme satisfaisants pour les objectifs retenus dans la présente norme.

L'enveloppe du courant de court-circuit représente en principe les premières quelques millisecondes du début de défaut (période subtransitoire), suivies par les millisecondes de la période transitoire et les secondes de la période de l'état constant par défaut. Le courant de court-circuit produit par un générateur synchrone est fortement affecté par son régulateur de tension. Calculer les effets exacts du régulateur requiert une information précise sur sa conception et les équations qui en résultent ne peuvent pas facilement être évaluées. Néanmoins, la valeur constante du courant de court-circuit permanent produit en tenant compte du régulateur peut généralement être obtenue du fabricant du générateur.

Pour les conditions de défaut en triphasé il est suffisant de prendre en considération les composantes en séquence positive des éléments du système équivalent.

#### 4.4 Méthodes de calcul

Les formules de l'article 5 sont considérées comme les plus appropriées au calcul des courants de court-circuit. Lorsque les informations ne sont pas toutes disponibles, ces formules ne peuvent être utilisées sans simplification. Toute simplification implique une approximation ou néglige certains paramètres, entraînant ainsi des imprécisions dans les résultats des calculs. L'article 6 décrit diverses simplifications et les imprécisions qui en résultent. L'article 8 montre l'application des formules au calcul de systèmes.

Deux approches de principe peuvent être adoptées pour le calcul des systèmes: temporelle ou intemporelle. Dans certains cas, la nature évolutive dans le temps du courant de court-circuit peut être négligée. Cependant, lorsqu'une analyse précise est exigée, par exemple pour déterminer le calibre de disjoncteurs du type non limiteur (tel que dans les systèmes basse-tension) ou lorsque la composante c.c. est importante (cas des systèmes moyenne-tension), un calcul temporel est nécessaire.

Dans les deux méthodes, le système est divisé en composants actifs et non actifs. Les composants actifs sont les sources de courants de court-circuit, les non actifs les transforment ou les conduisent depuis leur source jusqu'à l'emplacement du défaut. Chaque composant est représenté par un modèle mathématique formulé à partir de ses paramètres caractéristiques.

Such a calculation is considered unnecessary for most practical engineering purposes, and accordingly beyond the scope of this standard.

The formulae described herein, calculate the upper envelope of the maximum values of the time dependent short-circuit current (see figure 2). The envelope is calculated using particular machine characteristic parameters obtainable from equipment manufacturers using recognized testing methods, and applying the following assumptions:

- a) all system capacitances are neglected;
- b) at the start of the short circuit, the instantaneous value of voltage in one phase at the fault point is zero;
- c) during the short-circuit, there is no change in the short-circuit current path;
- d) the short-circuit arc impedance is neglected;
- e) transformers are set at the main tap position;
- f) the short circuit occurs simultaneously in all three phases;
- g) for generators connected in parallel, all generators share their active and reactive load proportionally at the start of and during the short circuit;
- h) during each discrete time interval, all circuit components react linearly.

With the above assumptions, the calculation results are considered to be acceptable to achieve the objectives of this standard.

The short-circuit current envelope is normally described during the first few milliseconds of fault initiation (the subtransient period), in addition to the following milliseconds (the transient period) and seconds (the steady-state period) of the fault. The short-circuit current produced by a synchronous generator is greatly affected by the characteristics of its voltage regulator. To calculate the exact effects of the regulator requires precise regulator design information, and the resulting equations cannot easily be evaluated. The steady-state value of the short-circuit current produced taking account of the regulator can, however, generally be obtained from the generator manufacturer.

For the symmetrical three-phase fault condition, only the positive-sequence components of the system components need be considered.

#### 4.4 Calculation methods

The formulae developed in clause 5 are considered to be the most suitable for calculating the short-circuit currents. When full information is not available, such formulae cannot be used unless simplified. Any simplification generally infers an approximation or neglect of certain parameters and hence causes inaccuracies in the calculated results. Clause 6 outlines various simplifications and gives an indication of the resulting inaccuracies. Clause 8 outlines the application of these formulae to system calculations.

Two basic system calculation approaches can be taken, time-dependent and non-time dependent. In some cases, the time-dependent nature of the short-circuit current can be neglected. However, when an accurate analysis is required, for example to determine the ratings of non-current-limiting, type circuit-breakers (as in low-voltage systems) or the d.c. component is important (as for medium-voltage systems), a time dependent calculation is required.

For both methods of calculation, the system is divided into its active and non-active components. The active components are sources of short-circuit current, the non-active components transmit or transform the short-circuit current to distribute it from the source to the fault point. Each component is represented by a mathematical model formulated from its characteristic parameters.

Les composants reliés en parallèle et de dimensions égales, tels que les moteurs et les générateurs, peuvent être considérés comme une seule machine. Pour exécuter le calcul temporel d'un système comprenant un certain nombre de composants actifs dissemblables, une méthode de générateur équivalent telle que décrite à l'article 7 doit être appliquée.

Pour les moteurs, il est nécessaire de distinguer les «petits» des «gros moteurs». Un groupe de petits moteurs connectés à un point de distribution commun peut être considéré comme un seul moteur équivalent au point de distribution. Il convient de considérer les gros moteurs comme des sources de courants de court-circuit séparées.

NOTE – Le terme «gros» est défini en 6.3.3.

Les équations précises décrivant le comportement des générateurs de ligne d'arbres utilisant des convertisseurs de fréquence dépendent de plusieurs facteurs, y compris la conception du système par le fabricant. En conséquence, décrire de tels systèmes avec la précision voulue demanderait une équation complexe qui ne pourrait aisément être évaluée. La méthode proposée par la présente norme divise le système en composants individuels pour lesquels le courant de court-circuit peut être évalué. Il est néanmoins recommandé qu'à chaque fois qu'il est possible l'avis du constructeur soit obtenu.

## 5 Composants et modèles des systèmes

### 5.1 Composants actifs

#### 5.1.1 Machines synchrones

##### 5.1.1.1 Généralités

Les machines synchrones utilisées dans les systèmes des installations électriques marines ou offshore comprennent des générateurs, des moteurs et des condensateurs synchrones. Les courants de court-circuit produits par ces machines sont fondamentaux pour le calcul du courant de court-circuit d'un système électrique.

Au cours des tous premiers cycles d'un court-circuit, les machines synchrones réagissent toutes d'une façon similaire. En conséquence, les courants de court-circuit produits possèdent les mêmes caractéristiques de base.

Les générateurs synchrones peuvent être à excitation *shunt* ou *compound*. Le courant d'excitation des machines *shunt* peut voisiner le zéro pendant le court-circuit, avec une baisse en conséquence du courant de court-circuit. Sur les machines à excitation *compound*, le courant de court-circuit participe au contrôle et au maintien du courant d'excitation. En conséquence, pour des générateurs *shunt* et *compound* ayant des caractéristiques assignées comparables, la machine à excitation *compound* produira des courants de court-circuit plus élevés, une fois atténués les effets subtransitoires.

Equally rated, parallel connected components such as motors and generators may be considered as a single “lumped” machine. To complete a time-dependent calculation for a system involving a number of dissimilar active components, the equivalent generator method as described in clause 7 shall be used.

For motors, it is necessary to distinguish between “small” and “large” motors. A group of small motors connected to a common distribution point may be considered as a single equivalent motor at the distribution point. Large motors should be considered as separate short-circuit current sources.

NOTE – The term “large” is defined in 6.3.3.

Precise equations to describe the behaviour of shaft generators using frequency converters depend on several factors including individual manufacturers' system design. Accordingly, to describe such systems to the required accuracy would require a complex equation which cannot easily be evaluated. The method proposed by this standard divides a typical system into discrete components for which the short-circuit current can be evaluated. However, it is recommended that, whenever possible, a particular manufacturer's advice should be obtained.

## **5 System components and models**

### **5.1 Active components**

#### **5.1.1 Synchronous machines**

##### **5.1.1.1 General**

The synchronous machines used on marine/offshore electrical installations comprise synchronous generators, motors and condensers. Knowledge of the short-circuit current produced by these machines is fundamental to the calculation of the short-circuit current of an electrical system.

During the first few cycles of a short circuit all synchronous machines respond in a similar way and accordingly the short-circuit current produced has the same basic characteristics.

Synchronous generators may be either compound or shunt-excited. For shunt-excited machines, the excitation current may fall to near zero during the short-circuit condition, with consequent loss of short-circuit current. On compound excited machines, the short-circuit current is used to control and maintain the excitation current. Accordingly, for similarly rated shunt and compound excited generators, the compound excited machine will produce higher values of short-circuit current after the subtransient effects have decayed.



### 5.1.1.2 Circuit électrique équivalent

En vue du calcul du courant de court-circuit triphasé d'une machine synchrone, les paramètres caractéristiques sont rassemblés en un réseau équivalent tel qu'indiqué à la figure 1.

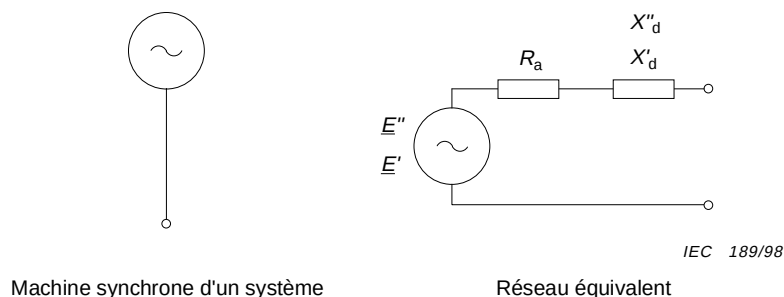


Figure 1 – Réseau équivalent d'une machine synchrone

### 5.1.1.3 Calcul de base

Le calcul du courant de court-circuit d'une machine synchrone se fonde sur l'évaluation de l'enveloppe des valeurs maximales du courant de court-circuit temporel réel de la machine. L'enveloppe résultante est fonction des paramètres de base de la machine (puissance, impédances, etc.) et des tensions actives ( $E''$ ,  $E'$ ,  $E$ ) créées par les impédances subtransitoire, transitoire et permanente de la machine. Les impédances dépendent des conditions de fonctionnement de la machine précédant immédiatement l'apparition du court-circuit.

#### a) Tensions actives

Pour un calcul précis, les tensions actives doivent être considérées dans les deux axes: direct et en quadrature, au cours des périodes subtransitoire et transitoire ( $E''_d$ ,  $E'_d$ ,  $E''_q$ ,  $E'_q$ ) et évaluées en prenant en compte les tensions engendrées par le courant débité avant défaut et agissant sur les impédances en axes direct et quadrature pendant les périodes subtransitoire et transitoire.

#### b) Impédance de la machine

L'impédance de la machine comprend sa résistance et sa réactance agissant en axes direct et quadrature.

Bien que la réactance de la machine soit supposée constante pour les besoins du calcul, elle ne l'est que pour les périodes respectives subtransitoire, transitoire et d'état permanent du courant de court-circuit.

#### c) Constante de temps du court-circuit subtransitoire et transitoire

La décroissance de la composante alternative du courant de court-circuit est caractérisée par les constantes de temps subtransitoire et transitoire de la machine.

La constante de temps subtransitoire,  $T''_d$  reflète la décroissance initiale de la composante alternative du courant de court-circuit et dépend des effets d'amortissement du circuit du rotor (principalement l'enroulement amortisseur).

La constante de temps transitoire,  $T'_d$  correspond à la décroissance de la composante alternative du courant de court-circuit. Elle dépend principalement des caractéristiques d'amortissement des circuits d'excitation.

La constante de temps c.c.,  $T_{dc}$ , correspond à la décroissance de la composante apériodique du courant de court-circuit et dépend des caractéristiques d'amortissement du circuit du stator.



### 5.1.1.2 Equivalent electrical circuit

To calculate the three-phase terminal short-circuit current of a synchronous machine, the characteristic parameters are connected together in the positive-sequence component network as shown in figure 1.

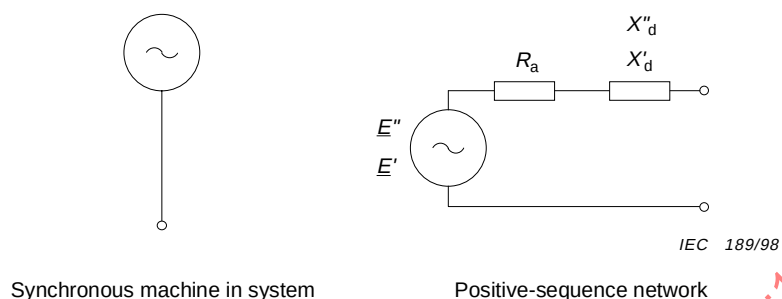


Figure 1 – Synchronous machine positive-sequence component network

### 5.1.1.3 Basic calculation

The calculation of the short-circuit current for a synchronous machine is based on evaluating the envelope of the maximum values of the machine's actual time-dependent short-circuit current. The resulting envelope is a function of the basic machine parameters (power, impedance, etc.) and the active voltages ( $E''$ ,  $E'$ ,  $E$ ) behind the machine's subtransient, transient and steady-state impedance. The impedances are dependent upon the machine operating conditions immediately prior to the occurrence of the short-circuit condition.

#### a) Active voltages

For an accurate calculation, the active voltages shall be considered in both the direct and quadrature axis during the subtransient and transient periods ( $E''_d$ ,  $E'_d$ ,  $E''_q$ ,  $E'_q$ ) and evaluated taking into account the voltages due to the prefault load currents acting upon the direct and quadrature axis impedance during the subtransient and transient periods.

#### b) Machine impedance

The machine impedance includes both the resistance and reactance acting in the direct and quadrature axis.

Although, for calculation purposes, the machine reactance is assumed to be constant, it is only constant for the respective subtransient, transient and steady-state periods of the short-circuit current.

#### c) Subtransient and transient short-circuit time constants

The decay of the a.c. component of the short-circuit current is characterized by the machine subtransient and transient time constants.

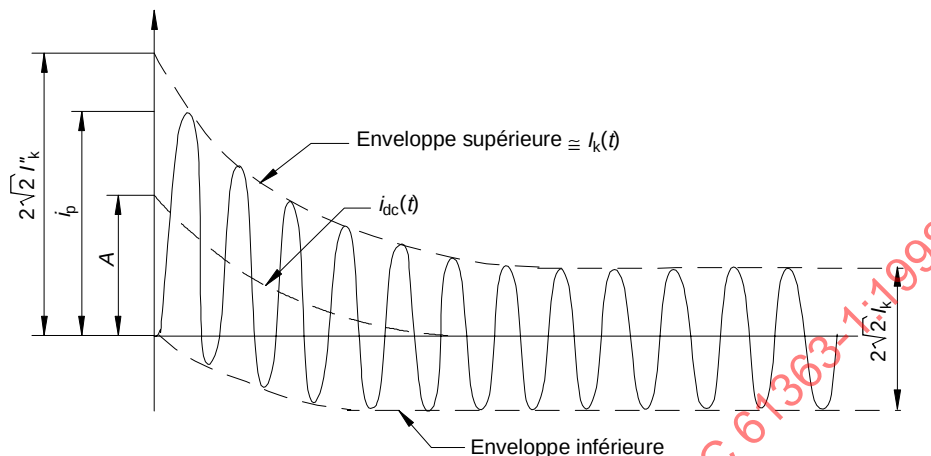
The subtransient time constant  $T''_d$  relates to the initial decay of the a.c. component of the short-circuit current, and is dependent on the damping effects of the rotor circuit (mainly the damper winding).

The transient time constant  $T'_d$ , relates to the decay of the a.c. component of the short-circuit current. It depends mainly on the damping effects of the excitation circuits.

The d.c. time constant  $T_{dc}$  relates to the decay of the aperiodic component of the short-circuit current and depends on the damping characteristics of the stator circuit.

#### 5.1.1.4 Courant de court-circuit triphasé

Les conditions du courant de court-circuit triphasé sont établies lorsque les trois phases sont reliées en même temps. Le courant qui en résulte est une fonction complexe variable dans le temps se retrouvant dans chaque phase. Le courant contient des composantes c.a. et c.c. typiquement représentées par la figure 2.



$I''_k$  courant de court-circuit symétrique initial

$i_p$  valeur crête du courant de court-circuit

$I_k$  courant de court-circuit permanent

$i_{dc}$  composante décroissante (apériodique) du courant de court-circuit

$A$  valeur initiale de la composante apériodique

IEC 190/98

**Figure 2 – Courant de court-circuit aux bornes d'un générateur synchrone en fonction du temps**

Le courant dépend à chaque instant de la valeur instantanée des caractéristiques de la machine, comme indiqué en 5.1.1.3. En court-circuit triphasé, le réseau équivalent seul (figure 1) est à considérer.

#### 5.1.1.5 Calcul du courant de court-circuit triphasé

Comme indiqué en 5.1.1.3, pour évaluer de façon précise le courant de court-circuit, les caractéristiques de la machine sont à considérer dans les deux axes, direct et en quadrature. Le calcul est extrêmement complexe et le surcroît de précision apporté par rapport aux autres méthodes de calcul ne justifie pas le travail entraîné.

Si le courant d'axe en quadrature est négligé, les résultats seront à 10 % près ceux obtenus en incluant les composantes en quadrature.

Les valeurs maximales du courant de court-circuit interviennent lorsque la machine, avant le défaut, fonctionne à ses valeurs nominales de charge, tension, fréquence et facteur de puissance.

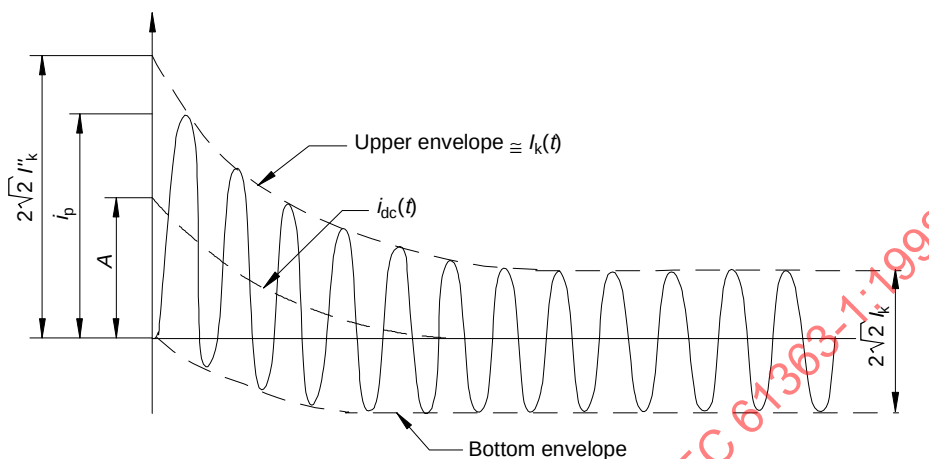
NOTE 1 – Si la machine, avant défaut, fonctionne en dessous de sa puissance active nominale mais au-dessus de sa puissance réactive nominale (kvar), le niveau de surexcitation conduit à des valeurs plus élevées du courant de court-circuit que dans le cas ci-dessus.

Lorsque l'on calcule le courant de court-circuit, il est d'usage de ne considérer que les valeurs maximales du courant. La figure 2 montre que les valeurs maximales varient en fonction du temps le long de l'enveloppe supérieure d'une fonction complexe du temps. Le courant délimité par cette enveloppe supérieure se calcule d'après l'équation:

$$i_k(t) = \sqrt{2} I_{ac}(t) + i_{dc}(t) \quad (1)$$

#### 5.1.1.4 Three-phase short-circuit current

The three-phase short-circuit current condition occurs when all three phases are simultaneously shorted together. The resulting current is a complex time-dependent function occurring in each phase. The current contains both a.c. and d.c. components typically as shown in figure 2.



$I''_k$  initial symmetrical short-circuit current

$i_p$  peak short-circuit current

$I_k$  steady-state short-circuit current

$i_{dc}$  decaying (aperiodic) component of short-circuit current

$A$  initial value of the aperiodic component

Figure 2 – Synchronous generator terminal short-circuit current time function

The current at any one point in time depends upon the instantaneous values of the machine characteristics as outlined in 5.1.1.3. For a three-phase short-circuit condition, only the positive-sequence network (figure 1) is of consequence.

#### 5.1.1.5 Calculation of the three-phase short-circuit current

As indicated in 5.1.1.3, to evaluate the short-circuit current accurately, the machine characteristics are to be considered in both the direct and quadrature axis. Such a calculation is extremely complex, and the additional accuracy obtained over other calculation methods does not warrant the work involved.

If the quadrature axis current components are neglected, the results will be within +10 % of the results when the quadrature components are included.

The maximum values of short-circuit current will occur when the prefault machine is operated at its rated values of load, voltage, frequency, and power factor.

NOTE 1 – If the prefault machine is operated below its rated active power but above its rated reactive power (kvar), the overrated excitation level will cause short-circuit currents in excess of the upper limit of the short-circuit current referred to above.

When calculating the short-circuit current, only the highest values of the current are considered. Figure 2 shows that the highest values vary as a function of time along the upper envelope of the complex time-dependent function. The current defined by this upper envelope is calculated from the equation:

$$i_k(t) = \sqrt{2} I_{ac}(t) + i_{dc}(t) \quad (1)$$

Dans une application normale, on calcule habituellement trois fonctions à partir de cette enveloppe: la composante alternative  $I_{ac}(t)$ , la composante c.c.  $i_{dc}(t)$  et la valeur de crête maximale possible  $i_p$ .

a) La composante alternative  $I_{ac}(t)$

La composante alternative en fonction du temps  $I_{ac}(t)$  est caractérisée par les courants subtransitoire, transitoire et permanent pendant les périodes subtransitoire et transitoire. Ces périodes sont définies par les constantes de temps subtransitoire et transitoire  $T''_d$  et  $T'_d$  sur l'axe direct.

$$I_{ac}(t) = (I''_{kd} - I'_{kd}) e^{-t/T''_d} + (I'_{kd} - I_{kd}) e^{-t/T'_d} + I_{kd} \quad (2)$$

Les valeurs initiales subtransitoire et transitoire des courants de court-circuit triphasé,  $I''_{kd}$  et  $I'_{kd}$  peuvent s'évaluer en utilisant les tensions actives à travers les impédances respectives, à l'aide des équations (3) et (4).

$$I''_{kd} = E''_{q0} / Z''_d = E''_{q0} / (R_a^2 + X''_d)^{1/2} \quad (3)$$

$$I'_{kd} = E'_{q0} / Z'_d = E'_{q0} / (R_a^2 + X'_d)^{1/2} \quad (4)$$

$I_{kd} = I_k$ , le courant de court-circuit permanent, s'obtient généralement auprès du constructeur.

Les tensions actives  $E''_{q0}$ ,  $E'_{q0}$  dépendent du courant de pré-charge et peuvent être évaluées avec les équations (5) et (6), qui sont dérivées des équations (7) et (8).

$$E''_{q0} = \left[ \left( \frac{U_0}{\sqrt{3}} \cos \phi_0 + R_a I_0 \right)^2 + \left( \frac{U_0}{\sqrt{3}} \sin \phi_0 + X''_d I_0 \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

$$E'_{q0} = \left[ \left( \frac{U_0}{\sqrt{3}} \cos \phi_0 + R_a I_0 \right)^2 + \left( \frac{U_0}{\sqrt{3}} \sin \phi_0 + X'_d I_0 \right)^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

$$E''_{q0} = \underline{U}_0 / \sqrt{3} + I_0 Z''_d \quad (7)$$

$$E'_{q0} = \underline{U}_0 / \sqrt{3} + I_0 Z'_d \quad (8)$$

où

$$Z''_d = (R_a + jX''_d) \text{ et}$$

$$Z'_d = (R_a + jX'_d)$$

NOTE 2 – Si la machine synchrone fonctionne avant le court-circuit à la tension nominale et au courant nominal, alors  $U_0 = U_n$  et  $I_0 = I_n$ .

b) La composante c.c.  $i_{dc}(t)$

La composante c.c.  $i_{dc}(t)$  peut s'évaluer à partir de l'équation (9).

$$i_{dc}(t) = \sqrt{2} (I''_{kd} - I_0 \sin \phi_0) e^{-t/T_{dc}} \quad (9)$$

c) La valeur de crête  $i_p$

La valeur de crête du courant de court-circuit intervient entre les temps  $t = 0$  et  $t = T/2$  du court-circuit. L'instant exact dépend des conditions de pré-charge, de l'impédance du générateur et des constantes de temps. Il est cependant acceptable de calculer  $i_p$  à l'instant  $T/2$  c'est-à-dire à la moitié de la première période du court-circuit, à l'aide de l'équation (10).

$$i_p = \sqrt{2} I_{ac}(t) + i_{dc}(t) \quad (10)$$

For normal application purposes it is usual to calculate three functions from this envelope, the a.c. component  $I_{ac}(t)$ , the d.c. component  $i_{dc}(t)$  and the maximum possible peak value  $i_p$ .

a) The a.c. component  $I_{ac}(t)$

The a.c. component time function  $I_{ac}(t)$  is characterized by the subtransient, transient and steady-state currents during the subtransient and transient time periods. These time periods are defined by the direct-axis subtransient and transient time constants  $T''_d$  and  $T'_d$ .

$$I_{ac}(t) = (I''_{kd} - I'_{kd}) e^{-t/T''_d} + (I'_{kd} - I_{kd}) e^{-t/T'_d} + I_{kd} \quad (2)$$

The subtransient and transient initial values of the three-phase short-circuit currents,  $I''_{kd}$  and  $I'_{kd}$  can be evaluated using the active voltages behind the respective impedance, using equations (3) and (4).

$$I''_{kd} = E''_{q0}/Z''_d = E''_{q0}/(R_a^2 + X''_d^2)^{1/2} \quad (3)$$

$$I'_{kd} = E'_{q0}/Z'_d = E'_{q0}/(R_a^2 + X'_d^2)^{1/2} \quad (4)$$

$I_{kd} = I_k$  which is the steady-state short-circuit current, should generally be obtained from the manufacturer.

The active voltages  $E''_{q0}$ ,  $E'_{q0}$  depend upon the preload current and can be evaluated using equations (5) and (6) which are derived from the vectorial equations (7) and (8).

$$E''_{q0} = \left[ \left( \frac{U_0}{\sqrt{3}} \cos \phi_0 + R_a I_0 \right)^2 + \left( \frac{U_0}{\sqrt{3}} \sin \phi_0 + X''_d I_0 \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

$$E'_{q0} = \left[ \left( \frac{U_0}{\sqrt{3}} \cos \phi_0 + R_a I_0 \right)^2 + \left( \frac{U_0}{\sqrt{3}} \sin \phi_0 + X'_d I_0 \right)^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

$$E''_{q0} = \frac{U_0}{\sqrt{3}} + I_0 Z''_d \quad (7)$$

$$E'_{q0} = \frac{U_0}{\sqrt{3}} + I_0 Z'_d \quad (8)$$

where

$Z''_d = (R_a + jX''_d)$  and

$Z'_d = (R_a + jX'_d)$

NOTE 2 – If the synchronous machine is operating at the nominal voltage of the network and at rated current before the short circuit, then  $U_0 = U_n$  and  $I_0 = I_r$ .

b) The d.c. component  $i_{dc}(t)$

The d.c. component  $i_{dc}(t)$  can be evaluated from equation (9).

$$i_{dc}(t) = \sqrt{2} (I''_{kd} - I_0 \sin \phi_0) e^{-t/T_{dc}} \quad (9)$$

c) The peak value  $i_p$

The peak value of the short-circuit current occurs between time  $t = 0$  and  $t = T/2$  of the short-circuit condition. The exact time depends on the preload conditions, the generator impedance and time constants. However, it is acceptable to calculate  $i_p$  at time  $T/2$ , i.e. at the first half-cycle of the short-circuit condition, using equation (10).

$$i_p = \sqrt{2} I_{ac}(t) + i_{dc}(t) \quad (10)$$

## 5.1.2 Moteurs asynchrones

### 5.1.2.1 Généralités

Les moteurs asynchrones peuvent se diviser en deux grands groupes:

- gros moteurs;
- petits moteurs.

Le classement dépend de la puissance dont est capable le générateur et de celle qui lui est réellement assignée. Les moteurs entraînant des propulseurs transversaux, des pompes de cargaison, des grues et des appareils de pont importants sont normalement classés «gros moteurs», tandis que ceux qui entraînent des auxiliaires (transfert de combustible, purificateurs, etc.) sont «petits».

Quand un court-circuit se produit dans un système, tous les moteurs connectés au moment du court-circuit contribuent au courant de court-circuit. Les gros moteurs sont à évaluer individuellement. Les petits peuvent être regroupés et traités en source équivalente unique.

Un gros moteur isolé est considéré de la même façon qu'un générateur, en utilisant ses paramètres caractéristiques pour calculer l'enveloppe supérieure du courant maximal produit pendant le court-circuit.

### 5.1.2.2 Circuit électrique équivalent

Dans les courts-circuits triphasés, seul le réseau équivalent est étudié (figure 3).

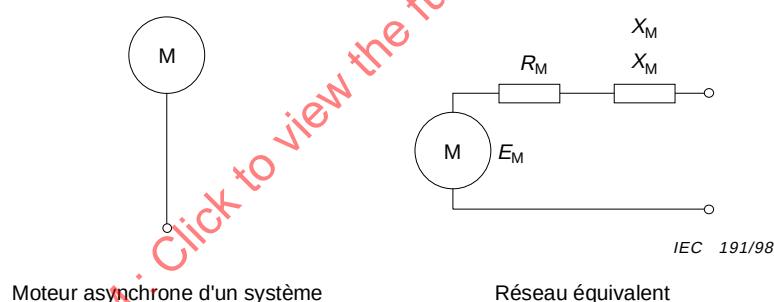


Figure 3 – Réseau équivalent d'un moteur asynchrone

### 5.1.2.3 Calcul de base

Lors d'un court-circuit triphasé, les moteurs asynchrones contribuent pendant une courte période au courant de court-circuit. Celui-ci est fonction de la f.é.m. subtransitoire interne, des impédances et des constantes de temps et comporte une composante alternative ainsi qu'une composante continue qui décroît selon la constante de temps subtransitoire et celle de courant continu.

## 5.1.2 Asynchronous motors

### 5.1.2.1 General

Asynchronous motors can be considered in two broad groups:

- large motors;
- small motors.

The grouping depends upon both the system generator capacity and the actual motor rating. Motors driving thrusters, cargo pumps, cranes and heavy deck machinery, are normally “large”, whereas the motors powering the ships auxiliary systems (fuel transfer, purifiers, etc.) are “small”.

When a short circuit occurs on a system, all motors connected at the instant of short circuit, contribute to the short-circuit current. Large motors must be evaluated individually. Small motors may be grouped together and treated as an equivalent single source.

A single large motor is considered in the same manner as a generator, using its characteristic parameters to calculate the upper envelope of the maximum current produced under the short-circuit condition.

### 5.1.2.2 Equivalent electrical circuit

For three-phase short-circuit fault conditions, only the positive-sequence component network is considered (figure 3).

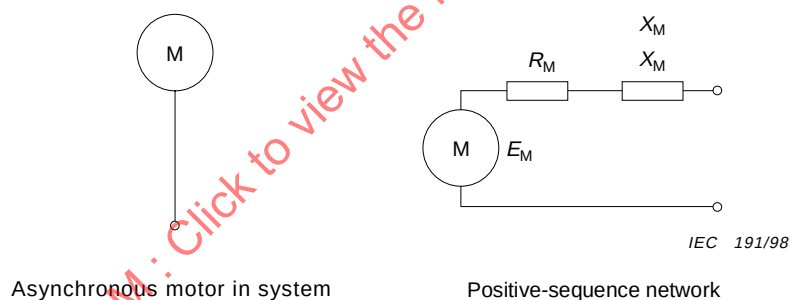


Figure 3 – Asynchronous motor positive-sequence component network

### 5.1.2.3 Basic calculation

For three-phase short circuits, asynchronous motors contribute short-circuit current for a short period of time. The short-circuit current depends on the internal subtransient active voltage, the impedance and time constants, and comprises both an a.c. and a d.c. component, which decay under the appropriate subtransient and d.c. time constants.

#### 5.1.2.4 Impédances des moteurs

Les résistance et réactance du moteur indiquées sur le réseau équivalent (figure 3) sont les résistance et réactance du stator et du rotor, rapportées à la tension du stator, c'est-à-dire au glissement  $s = 1$ .

$$R_M = R_R + R_S \quad (11)$$

$$X''_M = X_R + X_S \quad (12)$$

#### 5.1.2.5 Constantes de temps

La constante de temps subtransitoire  $T''_M$  correspond à la décroissance rapide de la composante alternative. Elle dépend principalement de l'effet d'amortissement du circuit du rotor et peut être déduite de l'équation (13).

$$T''_M = \frac{(X_R + X_S)}{\omega_r R_R} \quad (13)$$

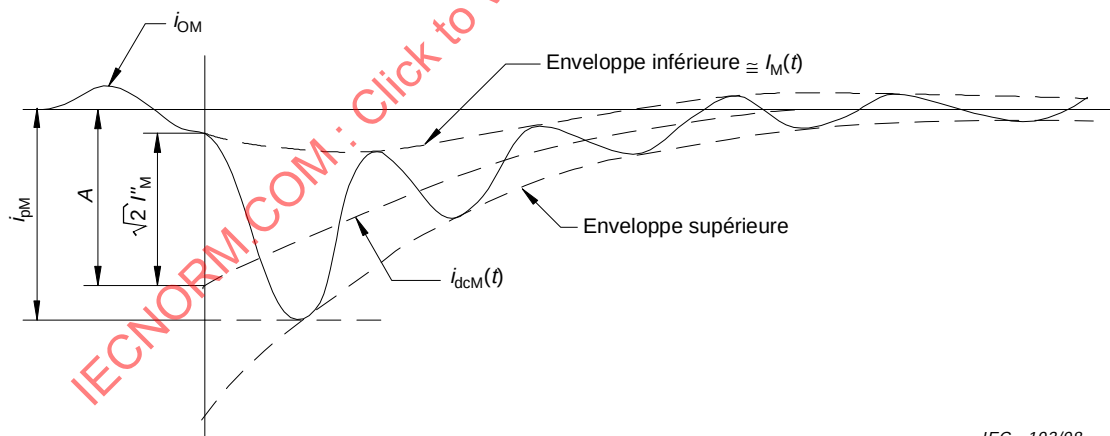
La constante de temps c.c. correspond à la décroissance de la composante apériodique du courant de court-circuit. Elle dépend principalement de l'amortissement dû au circuit du stator et peut se déduire de l'équation (14).

$$T_{dcM} = \frac{(X_R + X_S)}{\omega_r R_S} \quad (14)$$

#### 5.1.2.6 Calcul du courant de court-circuit triphasé

L'enveloppe supérieure des valeurs maximales du courant de court-circuit triphasé d'un moteur asynchrone est décrite à la figure 4. Elle peut se calculer à l'aide de l'équation (15).

$$i_M(t) = \sqrt{2} i_{acM}(t) + i_{dcM}(t) \quad (15)$$



IEC 192/98

$i_{0M}$  courant à vide

$I''_M$  courant de court-circuit symétrique initial

$i_{pM}$  valeur crête du courant de court-circuit

$i_{dcM}$  composante décroissante (apériodique) du courant de court-circuit

$A$  valeur initiale de la composante apériodique  $i_{dc}$

Figure 4 – Courant de court-circuit aux bornes d'un moteur asynchrone en fonction du temps



#### 5.1.2.4 Motor impedance

The motor resistance and reactance indicated on the positive-sequence network (see figure 3) are the motor stator and rotor resistance and reactance, referred to the stator voltage, i.e. at slip  $s = 1$ .

$$R_M = R_R + R_S \quad (11)$$

$$X''_M = X_R + X_S \quad (12)$$

#### 5.1.2.5 Time constants

The subtransient time constant  $T''_M$  relates to the rapid decay of the a.c. component. It depends mainly on the damping effect of the rotor circuit and can be evaluated from equation (13).

$$T''_M = \frac{(X_R + X_S)}{\omega_r R_R} \quad (13)$$

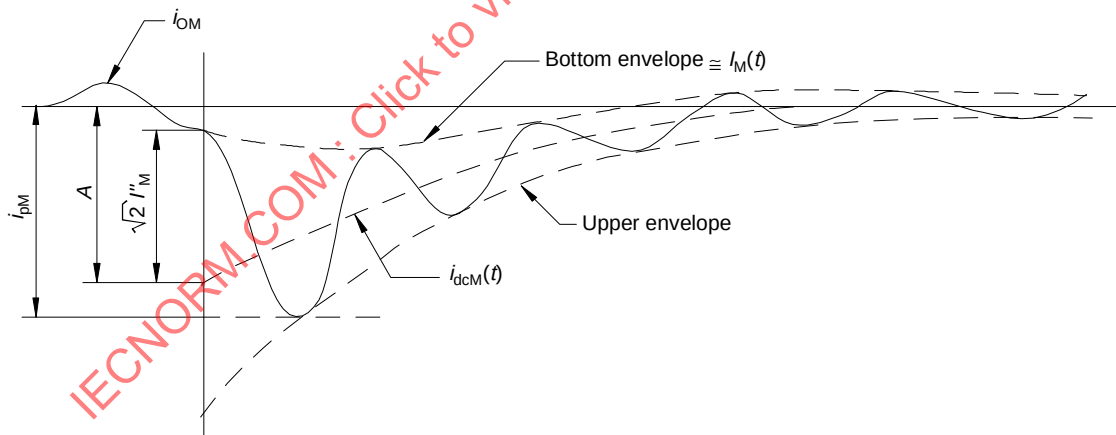
The d.c. time constant relates to the decay of the aperiodic component of the short-circuit current. It depends mainly on the damping effect of the stator circuit and can be evaluated from equation (14).

$$T_{dcM} = \frac{(X_R + X_S)}{\omega_r R_S} \quad (14)$$

#### 5.1.2.6 Three-phase short-circuit current calculation

The upper envelope of the maximum values of the three-phase short-circuit current of an asynchronous motor is shown in figure 4. It can be calculated from equation (15).

$$i_M(t) = \sqrt{2} i_{acM}(t) + i_{dcM}(t) \quad (15)$$



IEC 192/98

|           |                                                             |
|-----------|-------------------------------------------------------------|
| $i_{0M}$  | no-load current                                             |
| $I''_M$   | initial symmetrical short-circuit current                   |
| $i_{pM}$  | peak short-circuit current                                  |
| $i_{dcM}$ | decaying (aperiodic) component of the short-circuit current |
| $A$       | initial value of the aperiodic component $i_{dc}$           |

Figure 4 – Time function of the terminal short-circuit current of an asynchronous motor

a) Composante alternative  $I_{acM}(t)$ 

La composante alternative dépend des effets subtransitoires de la machine et peut se calculer à partir de l'équation (16):

$$I_{acM}(t) = I''_M e^{-t/T''_M} \quad (16)$$

où  $I''_M$  peut être tiré de l'équation (17):

$$I''_M = E''_M / [(R_R + R_S)^2 + (X_R + X_S)^2]^{1/2} \quad (17)$$

La tension  $E''_M$  est fonction de la tension aux bornes du moteur, de son courant de charge et de son facteur de puissance au moment du court-circuit. Il se calcule à partir de l'équation (18).

$$E''_M = (U_{rM} / \sqrt{3}) - I_{rM} Z''_M \quad (18)$$

où  $Z''_M = R_M + jX''_M$

L'équation (18), exprimée en valeur scalaire devient l'équation (19):

$$E''_M = \left[ \left( \frac{U_{rM}}{\sqrt{3}} \cos \phi_M - R_M I_{rM} \right)^2 + \left( \frac{U_{rM}}{\sqrt{3}} \sin \phi_M - X''_M I_{rM} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (19)$$

b) Composante c.c.  $i_{dcM}(t)$ 

La composante c.c. se déduit de l'équation (20).

$$i_{dcM}(t) = \sqrt{2} (I''_M + I_{rM} \sin \phi_M) e^{-t/T_{dcM}} \quad (20)$$

où  $\cos \phi_M$  est le facteur de puissance du moteur.

c) Valeur de crête  $i_{pM}$ 

La valeur crête se calcule selon l'équation (21).

$$i_{pM} = \sqrt{2} I_{acM}(t) + i_{dcM}(t) \quad (21)$$

évaluée au temps  $t = T/2$ .

### 5.1.3 Générateurs de lignes d'arbres

#### 5.1.3.1 Généralités

Un générateur de ligne d'arbres est un générateur dont la puissance mécanique provient de la ligne d'arbres de l'appareil propulsif principal du navire. C'est le cas par exemple:

- a) des générateurs synchrones entraînés par une prise de force mécanique, hydraulique ou électrique en service à vitesse constante;
- b) des générateurs asynchrones fonctionnant à excitation à fréquence variable sur le circuit rotor;
- c) des générateurs à courant continu ou alternatif reliés au réseau par un convertisseur.

Le courant de court-circuit pour a) et b) ci-dessus peut être évalué comme indiqué en 5.1.1. L'évaluation du courant de court-circuit pour des générateurs c.c. ou a.c. utilisant des convertisseurs connectés au réseau nécessite une attention particulière.

#### 5.1.3.2 Générateurs couplés à un convertisseur

La documentation sur le comportement en court-circuit des générateurs couplés à des systèmes à convertisseurs est peu abondante et la généralisation est difficile. Etant donné qu'il existe beaucoup de types différents sur le marché, il convient avant tout de consulter les constructeurs sur le fonctionnement en court-circuit de leurs systèmes.

a) The a.c. component  $I_{acM}(t)$

The a.c. component depends on the subtransient effects of the machine and can be calculated from equation (16).

$$I_{acM}(t) = I''_M e^{-t/T''_M} \quad (16)$$

where  $I''_M$  can be calculated from equation (17).

$$I''_M = E''_M / [(R_R + R_S)^2 + (X_R + X_S)^2]^{1/2} \quad (17)$$

The voltage  $E''_M$  is dependent on the motor terminal voltage, the motor load current and power-factor at the time of the short circuit. It can be calculated from equation (18).

$$\underline{E''_M} = (\underline{U_{rM}} / \sqrt{3}) - I_{rM} \underline{Z''_M} \quad (18)$$

where  $\underline{Z''_M} = R_M + jX''_M$

Equation (18) expressed in its scalar version is shown in equation (19).

$$E''_M = \left[ \left( \frac{U_{rM}}{\sqrt{3}} \cos \phi_M - R_M I_{rM} \right)^2 + \left( \frac{U_{rM}}{\sqrt{3}} \sin \phi_M - X''_M I_{rM} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (19)$$

b) The d.c. component  $i_{dcM}(t)$

The d.c. component can be calculated from equation (20).

$$i_{dcM}(t) = \sqrt{2} (I''_M + I_{rM} \sin \phi_M) e^{-t/T_{dcM}} \quad (20)$$

where  $\cos \phi_M$  is the motor power factor.

c) The peak value  $i_{pM}$

The peak value can be calculated using equation (21).

$$i_{pM} = \sqrt{2} I_{acM}(t) + i_{dcM}(t) \quad (21)$$

evaluated at time  $t = T/2$ .

### 5.1.3 Shaft generators

#### 5.1.3.1 General

A shaft generator is any generator deriving its mechanical power from the ship's main propulsion shaft line, such as:

- synchronous generators driven by a mechanical, hydraulic or electric drive system arranged to operate at a fixed speed;
- asynchronous generators operating with variable frequency excitation on the rotor circuit;
- d.c. or a.c. generators using converter equipment to connect to the power system.

The short-circuit current for a) and b) above may be evaluated as outlined in 5.1.1. Evaluation of the short-circuit current for d.c. or a.c. generators using converter equipment to connect to the power system requires special consideration.

#### 5.1.3.2 Converter connected generators

Documentation on the short-circuit characteristics of generators connected by converter systems is scarce. There are many different schemes available and in all cases the manufacturer should first be consulted to obtain the specific generator system's short-circuit operating conditions.

Le calcul du courant de court-circuit exige une connaissance précise du comportement électronique du système de commande du convertisseur et de ses protections. Celles-ci peuvent comporter des appareils limiteurs de courant, des interrupteurs statiques ou d'autres dispositifs limitant le courant de court-circuit. Même si l'on dispose d'une information complète, le calcul précis est délicat en raison de l'action des composants statiques.

En l'absence d'informations provenant du constructeur, la méthode suivante doit être suivie pour l'estimation des courants de court-circuit.

#### a) Schéma du circuit général

La figure 5 montre la disposition globale d'un générateur de ligne d'arbres relié par un convertisseur au réseau. Le générateur peut être à courant alternatif ou continu, auquel cas un seul pont redresseur est utilisé.

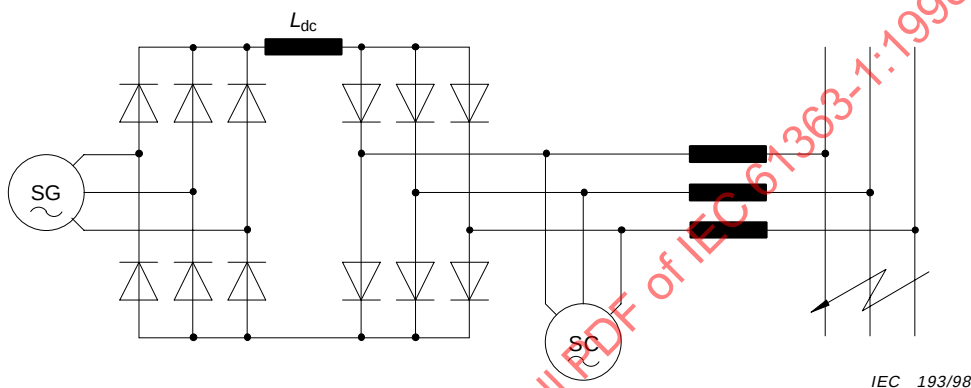


Figure 5 – Système de générateur de ligne d'arbres couplé à un convertisseur

#### b) Hypothèses

Pour le calcul des courants de court-circuit d'un système à générateur de ligne d'arbres, les hypothèses sont les suivantes:

- les composants continuent de fonctionner normalement pendant le court-circuit;
- le système est seul à contribuer au courant de crête de court-circuit;
- aucune protection ne fonctionne pendant la période de temps couverte par le calcul;
- le générateur voit le court-circuit comme un court-circuit triphasé;
- le convertisseur poursuit sa commutation pendant au moins 10 ms.

A partir des hypothèses ci-avant, le circuit de la figure 5 peut être traduit en schéma de système d'impédances par la figure 6.

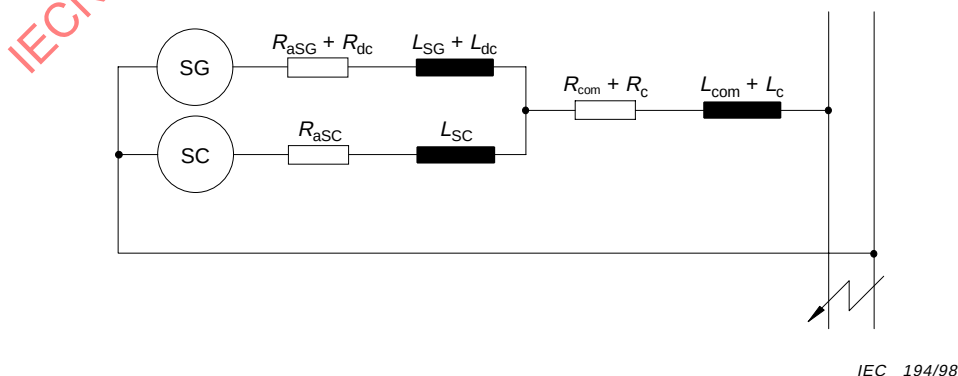


Figure 6 – Schéma de système d'impédances d'un générateur de ligne d'arbres couplé à un convertisseur

Short-circuit current evaluation requires an accurate knowledge of the converter control system characteristics and the converter protective functions including current-limiting devices, static switches and any other devices which will limit the short-circuit current. Even when full information is available, an accurate calculation is complicated due to the switching action of the solid-state devices.

In the absence of manufacturer's information, the following method shall be used to predict the short-circuit current.

a) General circuit diagram

Figure 5 shows the general arrangement of a shaft generator connected to a system with a converter. The generator may be a.c. or d.c. in which case, only one converter bridge would be used.

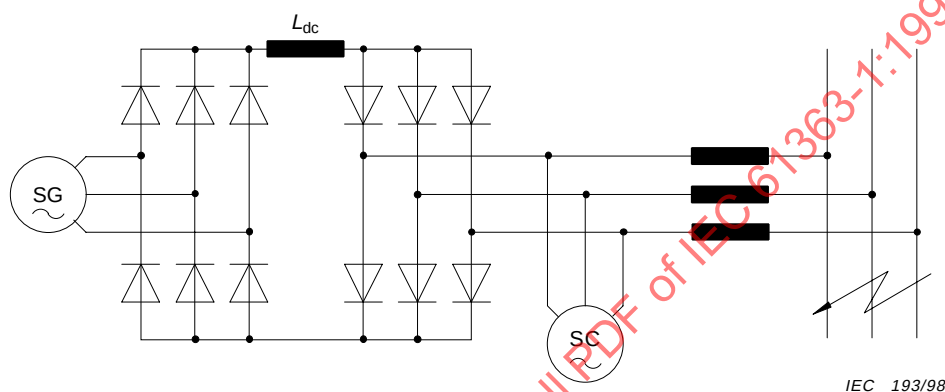


Figure 5 – Shaft generator system with converter

b) Assumptions

In calculating shaft generator system short-circuit currents, the following assumptions are made:

- all components continue to function normally throughout the short circuit;
- the system only contributes to the peak short-circuit current;
- for the period of time considered by the calculation, no circuit protective devices operate;
- the generator sees the short circuit as a three-phase short-circuit fault;
- the converter continues to commutate for at least 10 ms.

Using the above assumptions, the circuit of figure 5 can be represented as a system impedance diagram shown in figure 6.

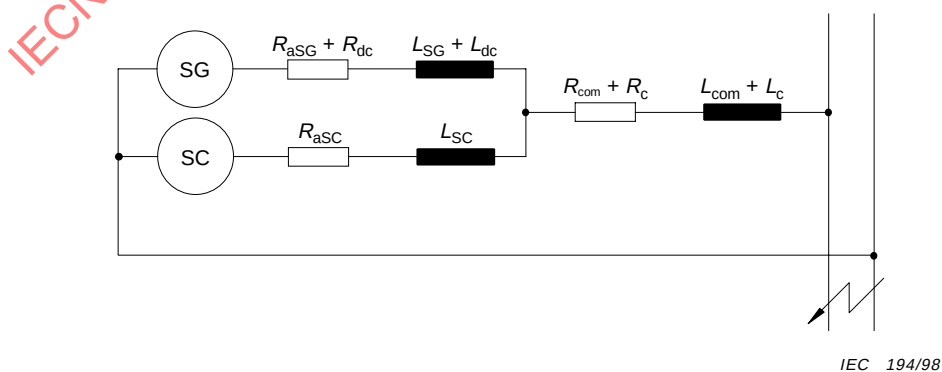


Figure 6 – System impedance diagram of a shaft generator system with converter

Le convertisseur peut être combiné avec le condensateur synchrone (pony set) ce qui permet de le traiter en générateur synchrone conventionnel. Il y a lieu de noter cependant que:

- $L_{dc}$  est l'inductance du circuit c.c.

Pour obtenir le courant de court-circuit au temps  $t = 5 \text{ ms}$ ,  $L_{dc}$  peut être corrigé par un facteur  $2/(\pi\sqrt{3})$ .

- Le générateur de ligne d'arbres peut fonctionner à fréquence réduite.

Il est tenu compte de cela en réduisant  $L''_{SG}$  d'un facteur  $f_e/f_r$  dans lequel  $f_e$  est la plus faible fréquence à laquelle le générateur produit la tension assignée, et  $f_r$  est la fréquence assignée du réseau.

- $L_{com}$  est l'inductance des selfs de commutation.
- $L''_{SC}$  est l'inductance subtransitoire du condensateur synchrone.

D'après la figure 6, la contribution du générateur de ligne d'arbres peut être négligée selon le rapport de  $L_{dc}$  à la réactance subtransitoire du condensateur synchrone  $L''_{SC}$ .

### 5.1.3.3 Générateurs de ligne d'arbres à convertisseurs auto-commutants

Un générateur de ligne d'arbres à convertisseur auto-commutant est représenté à la figure 7.

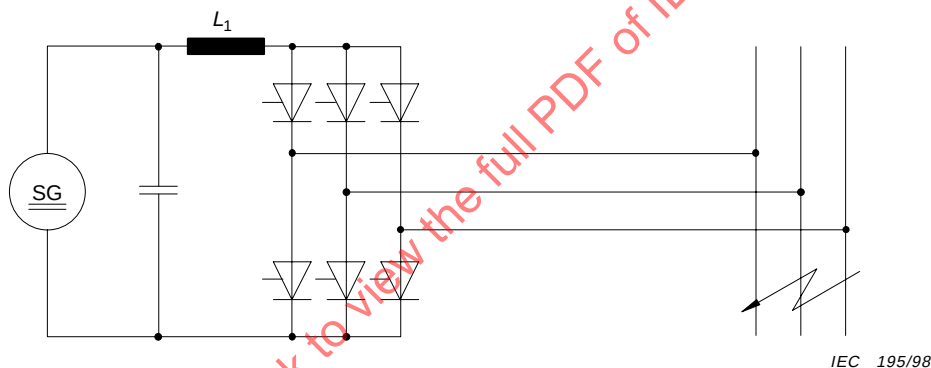


Figure 7 – Générateur de ligne d'arbres à convertisseur auto-commutant

Dans ce système, les composants à semi-conducteurs coupent le courant de court-circuit avant qu'il atteigne sa valeur de crête maximale maîtrisable, ou bien le courant est limité par l'action rapide de fusibles limiteurs.

En supposant que le dispositif à semi-conducteurs conduise au minimum pendant 0,1 ms après la naissance du court-circuit, le courant croîtra de façon linéaire en fonction du temps, à un rythme déterminé par l'inductance limiteur de courant  $L_1$ , (voir figure 7) jusqu'à ce qu'il atteigne son maximum. Il convient d'obtenir du constructeur l'amplitude du courant de crête. En l'absence de données précises, celle-ci peut être supposée double du courant nominal du générateur à l'instant  $t = 0,1 \text{ ms}$ . Cette pointe interviendra avant le courant maximal des composants actifs (rotatifs) et donc ne contribue pas au courant crête de court-circuit dans le réseau.

Si le court-circuit se produit au-delà des bornes du convertisseur, l'impédance du circuit de raccordement doit être comprise dans les calculs.

### 5.1.4 Moteurs alimentés par convertisseur

Les moteurs alimentés par convertisseur ne contribuent au courant de court-circuit que si le convertisseur est composé de deux SCR en opposition et si le SCR inverseur conduit ou devient conducteur. Ces situations peuvent être traitées de la même façon qu'un générateur de ligne d'arbres couplé à un inverseur convertisseur, en omettant le condensateur synchrone.

The inverter can be combined with the synchronous condenser (pony-set) to enable the shaft generator to be treated as a conventional synchronous generator. It should be noted however that:

- $L_{dc}$  is the inductance of the d.c. circuit.

To obtain the short-circuit current at time  $t = 5$  ms,  $L_{dc}$  may be reduced by a factor  $2/(\pi\sqrt{3})$ .

- The shaft generator may be operating at a lower frequency.

This may be incorporated by reducing  $L''_{SG}$  by the factor  $f_e/f_r$ , where  $f_e$  is the lowest frequency of the shaft generator at which rated voltage is generated, and  $f_r$  is the rated network frequency.

- $L_{com}$  is the inductance of the commutation coils.
- $L''_{SC}$  is the subtransient inductance of the synchronous condenser.

From figure 6 it can be seen that dependent on the ratio of  $L_{dc}$  to the subtransient reactance of the synchronous condenser  $L''_{SC}$  the contribution of the shaft generator may be neglected.

### 5.1.3.3 Shaft generators with self-commutating inverters

A shaft generator using a self-commutated inverter is shown in figure 7.

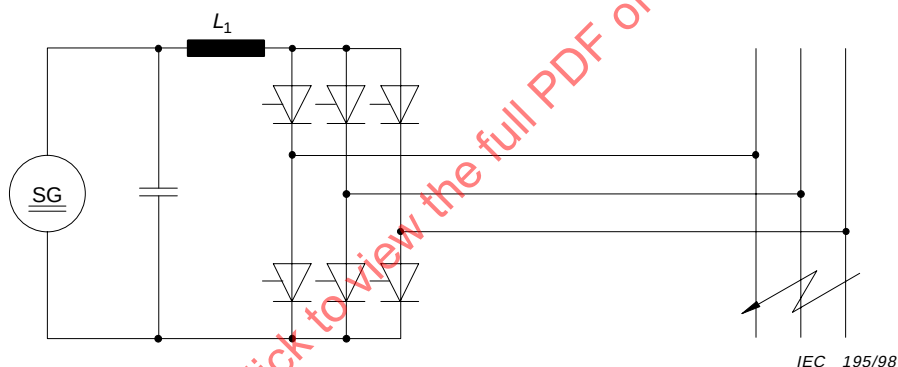


Figure 7 – Shaft generator with self-commutating inverter

For this system, the semi-conductor devices are switched off before the short-circuit current reaches its maximum controllable peak value, or the current is limited by fast-acting current-limiting fuses.

Assuming that the semi-conductor devices conduct for a minimum of 0,1 ms from initiation of the short circuit, the current will increase linearly with time, at a rate determined by the current-limiting inductance  $L_1$  (see figure 7), until it reaches its maximum. The magnitude of the peak current should be obtained from the manufacturer. In the lack of precise data the peak current may be assumed to be twice the generator rated current at time  $t = 0,1$  ms. This peak will occur before the peak current of the active (rotary) components, and therefore does not contribute to the peak short-circuit current in a network.

If the short circuit occurs further from the converter terminals, the impedance of the connecting circuit shall be included in the calculations.

### 5.1.4 Converter fed motors

Converter fed motors can contribute to the short-circuit current only if the converter consists of two anti-parallel connected SCR's and the reversing SCR is or becomes conducting. These situations can be handled in the same manner as a shaft generator with inverter by omitting the synchronous condenser.

## 5.2 Composants non actifs

### 5.2.1 Généralités

Les composants non actifs d'un système sont les câbles, transformateurs et bobines de réactance. Ces composants atténuent les courants de court-circuit et n'y contribuent pas.

### 5.2.2 Câbles

Le schéma équivalent est donné à la figure 8.

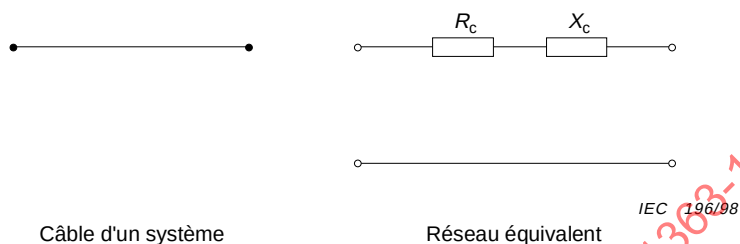


Figure 8 – Schéma équivalent des câbles

L'impédance d'un câble comprend sa résistance et sa réactance. Il y a lieu de prendre en compte la température des câbles en fonctionnement normal et l'élévation de température due au courant de court-circuit. Le plus souvent, les valeurs de résistance et de réactance se trouvent dans les normes du constructeur et sont estimées pour une température d'âme de 20 °C à la fréquence nominale du système.

Dans le cas de câbles connectés en parallèle, on prendra en considération 8.5.2 de la CEI 60092-202.

### 5.2.3 Transformateurs

La figure 9 donne le schéma équivalent d'un transformateur. Ce réseau inclut la valeur des résistance et réactance de fuite que l'on peut obtenir du constructeur.

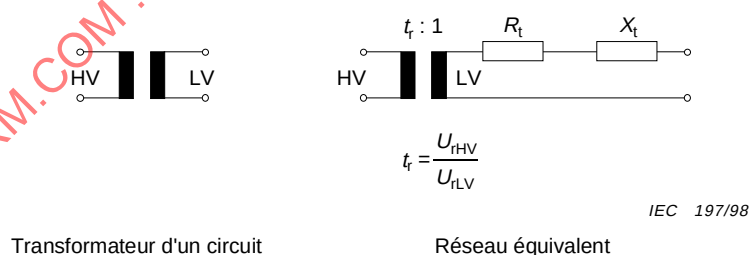


Figure 9 – Schéma équivalent d'un transformateur

Les résistances, réactances et impédances sont données par les équations (22), (23) et (24). Les valeurs de  $u_{rR}$  et de  $u_{rk}$  sont données en %.

$$R_T = u_{rR} U_r^2 / 100 S_{rT} \quad (22)$$

$$X_T = (Z_T^2 - R_T^2)^{1/2} \quad (23)$$

$$Z_T = u_{rk} U_r^2 / 100 S_{rT} \quad (24)$$



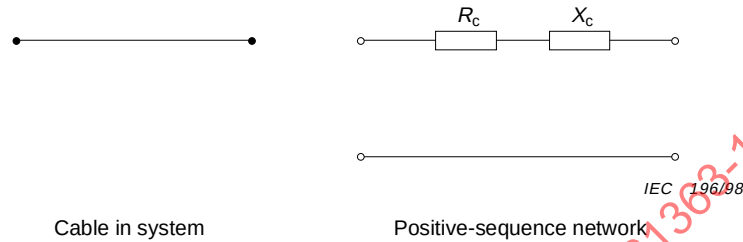
## 5.2 Non-active components

### 5.2.1 General

System non-active components are the cables, transformers and reactors. Such components attenuate the short-circuit current and do not contribute short-circuit current.

### 5.2.2 Cables

The positive-sequence component network is shown in figure 8.



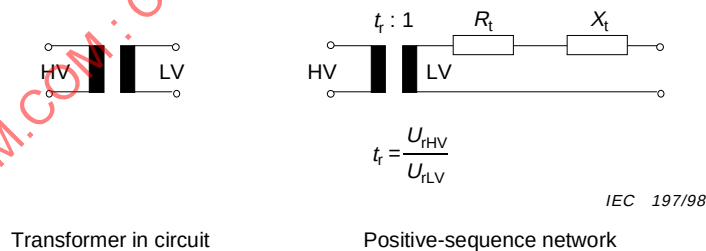
**Figure 8 – Cables positive-sequence component network**

The cable impedance comprises resistance and reactance. Consideration should be given to the temperature of the conductors during normal service and the temperature rise due to the short-circuit current. In most cases the resistance and reactance values can be obtained from manufacturing standards and evaluated for a conductor temperature of 20 °C and rated system frequency.

For cables connected in parallel, attention is drawn to 8.5.2 of IEC 60092-202.

### 5.2.3 Transformers

Figure 9 shows the positive-sequence component network for a transformer. This network includes the leakage values of resistance and reactance which may be obtained from the manufacturer.



**Figure 9 – Transformer positive-sequence component network**

The positive-sequence resistance, reactance and impedance can be calculated from equations (22), (23) and (24). The values of  $u_{rR}$  and  $u_{rk}$  are in %.

$$R_T = u_{rR} U_r^2 / 100 S_{rT} \quad (22)$$

$$X_T = (Z_T^2 - R_T^2)^{1/2} \quad (23)$$

$$Z_T = u_{rk} U_r^2 / 100 S_{rT} \quad (24)$$

Si les pertes cuivre  $P_{Cu}$  sont connues, la résistance peut se déduire de l'équation (25):

$$R_T = P_{Cu} / 3 I_T^2 \quad (25)$$

#### 5.2.4 Bobines de réactance

Le schéma équivalent d'une bobine de réactance est donné par la figure 10. La résistance de la bobine est généralement faible et négligeable. La réactance est en principe chiffrée en pourcentage et peut se calculer avec la formule (26). Les valeurs de  $u_{rL}$  sont données en %.

$$X_L = u_{rL} U_r / (100 \sqrt{3} I_r) \quad (26)$$

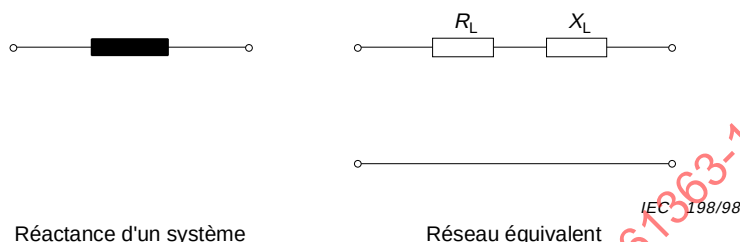


Figure 10 – Schéma équivalent d'une bobine de réactance

## 6 Hypothèses simplificatrices

### 6.1 Généralités

Les méthodes de calcul proposées à l'article 5 indiquent les formules les plus appropriées au calcul des courants de court-circuit variables dans le temps aux bornes des équipements. Lorsque les composants sont rassemblés en un système, il est souhaitable de simplifier les formules de calcul et de normaliser la méthode de calcul.

Toute simplification introduit inévitablement des erreurs. En conséquence, le choix du degré de simplification dépendra non seulement des données connues, mais également du degré de précision que l'on devra assurer au résultat final. Lorsque toutes les informations sont disponibles, il y a lieu d'utiliser les formules de l'article 5. Si les informations sont limitées, la formule appropriée du présent article peut être utilisée.

Le présent article expose les approximations que l'on peut faire pour simplifier le calcul et indique la perte de précision qui en résulte, par comparaison avec des méthodes plus sophistiquées. Il demeure de la responsabilité des ingénieurs concepteurs des systèmes de décider jusqu'à la perte de précision peut être tolérée dans un calcul, en retenant la formule qui convient.

### 6.2 Machines synchrones

#### 6.2.1 Courants de court-circuit triphasés

Les formules de 5.1.1.5 impliquent de connaître les paramètres de la machine ainsi que les conditions de charge préalables et le facteur de puissance.

Dans les calculs de courants de court-circuit dont l'intérêt premier est de choisir les équipements de protection, plusieurs hypothèses raisonnables peuvent être faites qui simplifieront le déroulement des calculs tout en conservant une précision adéquate aux résultats, pour l'intervalle de temps à étudier.

If the ohmic losses  $P_{Cu}$  are known, the resistance can be calculated from equation (25).

$$R_T = P_{Cu} / 3 I_{rT}^2 \quad (25)$$

## 5.2.4 Reactors

The positive sequence component network for a reactor is shown in figure 10. The reactor resistance is generally small and may be neglected. The reactance is normally quoted as a percentage and can be calculated from equation (26). The values of  $u_{rL}$  is in %.

$$X_L = u_{rL} U_r / (100 \sqrt{3} I_r) \quad (26)$$

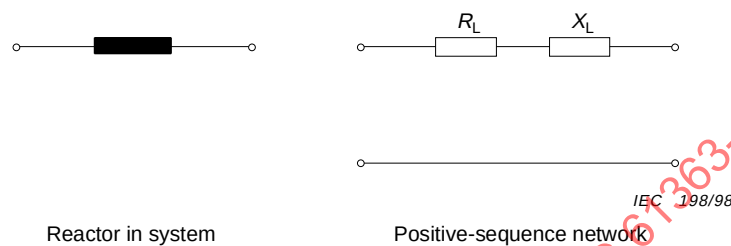


Figure 10 – Reactor positive-sequence component network

## 6 Simplifying assumptions

### 6.1 General

The formulae in clause 5 are the most appropriate for calculating time-dependent short-circuit currents occurring at the terminals of equipment. When components are connected together in a system, it is desirable to simplify the calculating formulae and standardize the calculation method.

Any simplification inevitably introduces errors. Accordingly, the degree of simplification chosen will depend not only on the data available but also on the accuracy permitted in the final result. If full information is available, the formulae of clause 5 should be used. If information is limited, an appropriate formula from this clause may be used.

This clause outlines approximations which can be made to simplify a calculation, and indicates the resulting loss of accuracy when compared to more sophisticated methods. It shall remain the system engineer's responsibility to decide how much loss of accuracy can be tolerated in a calculation, and choose formulae as appropriate.

### 6.2 Synchronous machines

#### 6.2.1 Three-phase short-circuit currents

The formulae of 5.1.1.5 require knowledge of the machine parameters in addition to the preload conditions and power factor.

For short-circuit current calculations where the primary interest is in the selection of protective equipment, several reasonable assumptions can be made which will simplify the calculating procedures yet still retain an adequate accuracy in the result, during the time period being considered.

Ces hypothèses comprennent:

- a) l'omission de la résistance statorique, erreur négligeable;
- b) l'omission des conditions de charge préalables, erreur de 5 % à 10 %;
- c) l'omission de la composante alternative transitoire, imprécisions excessives dans le courant de crête de court-circuit;
- d) l'omission des décroissances subtransitoire et transitoire, imprécisions excessives dans le courant de crête de court-circuit.

### 6.2.2 Effet de la résistance statorique

Si la résistance statorique  $R_a$  est ignorée, elle peut être négligée dans les formules (3), (4), (5), (6), (7) et (8). Pour un courant de court-circuit calculé aux bornes d'une machine, le résultat sera trop élevé, mais compris dans les tolérances acceptables. Dans le calcul des systèmes, l'erreur est négligeable.

### 6.2.3 Effet de la condition de charge préalable

Si l'on néglige la condition de pré-charge  $I_0$  dans les équations (5), (6), (7) et (8), les valeurs de  $E''_{q0}$  et  $E'_{q0}$  peuvent être supposées égales entre elles et à  $U_0 \sqrt{3}$ . Cela revient à calculer le courant de court-circuit en supposant le générateur à vide, et donne une valeur calculée plus faible (en général de 10 %).

### 6.2.4 Omission de la décroissance transitoire de la composante alternative

Si la décroissance transitoire de la composante est négligée, cela entraîne une imprécision excessive du courant crête de court-circuit. Une telle imprécision invaliderait tout résultat de calcul au-delà de la première demi-période du défaut et par conséquent, cette approximation est déconseillée lorsqu'un calcul temporel est requis.

Si l'approximation est faite, la formule (2) devient:

$$I_{ac}(t) = (I''_{kd} - I'_{kd}) e^{-t/T''_d} + I'_{kd} \quad (27)$$

### 6.2.5 Omission de la décroissance du courant de court-circuit

Les formules de l'article 5 sont basées sur le calcul de la décroissance de l'enveloppe du courant de court-circuit comme résultat des composantes subtransitoire, transitoire et synchrone. Si l'on néglige la décroissance, la composante alternative du courant de court-circuit peut être assimilée au quotient de la tension constante par une réactance subtransitoire constante et la composante c.c. à une constante proportionnelle. La résistance de stator et le courant de pré-charge seraient négligés et il conviendrait de calculer la valeur crête du courant en supposant l'asymétrie maximale.

Ces suppositions ne peuvent être faites que lors d'une estimation approximative des valeurs car les résultats seront fortement erronés pour les calculs allant au-delà de la première demi-période.

Les formules de calcul deviennent:

$$I_{ac} = U_0 / (\sqrt{3} X''_d) \quad (28)$$

$$i_{dc} = \sqrt{2} I_{ac} = A \quad (29)$$

$$i_p = \sqrt{2} I_{ac} + i_{dc} \quad (30)$$

These assumptions include:

- a) ignoring stator resistance, negligible error;
- b) ignoring preload conditions, results will be within 5 % and 10 %;
- c) ignoring the transient decay of the a.c. component, excessive inaccuracies occur in the peak short-circuit current;
- d) ignoring the subtransient and transient decay of the a.c. component, excessive inaccuracies occur in the peak short-circuit current.

### 6.2.2 Effect of stator resistance

If the stator resistance  $R_a$  is unavailable it may be ignored in formulae (3), (4), (5), (6), (7), and (8). For a short-circuit current calculated at the terminals of a machine, the result will be higher but well within acceptable tolerances. For system calculations, the error is negligible.

### 6.2.3 Effect of preload condition

If the preload condition,  $I_0$ , is ignored in equations (5), (6), (7) and (8) the values of  $E''_{q0}$  and  $E'_{q0}$  can be assumed to be equal, and equal to  $U_0/\sqrt{3}$ . This in effect calculates the short-circuit current assuming a generator on no load, and results in a lower calculated value of the symmetrical short-circuit current (generally less by 10 %).

### 6.2.4 Neglecting transient component decay of the a.c. component

If the transient component decay is ignored, excessive inaccuracies occur in the peak short-circuit current. Such inaccuracies will invalidate any results calculated beyond the first half-cycle of the fault condition, and accordingly this approximation is *not* recommended when time-dependent calculations are required.

Using this approximation formula (2) becomes:

$$I_{ac}(t) = (I''_{kd} - I'_{kd}) e^{-t/T''_d} + I'_{kd} \quad (27)$$

### 6.2.5 Neglecting short-circuit current decay

In clause 5, the formulae are based on calculating the decay of the envelope of the short-circuit current as a result of the subtransient, transient and synchronous components. If this decay is ignored, the a.c. component of the short-circuit current can be assumed to be a ratio of a constant voltage divided by constant subtransient reactance and the d.c. component as a proportional constant. Stator resistance and preload currents should be ignored and the peak current calculated assuming maximum asymmetry.

These assumptions should only be made when estimating approximate values as the results will produce excessive errors for calculations required beyond the first 0,5 cycles.

The calculating formulae become:

$$I_{ac} = U_0 / (\sqrt{3} X''_d) \quad (28)$$

$$i_{dc} = \sqrt{2} I_{ac} = A \quad (29)$$

$$i_p = \sqrt{2} I_{ac} + i_{dc} \quad (30)$$

c'est-à-dire

$$i_p = 2\sqrt{2} I_{ac} \quad (31)$$

NOTE 1 –  $U_0$  est la tension du générateur avant défaut. Pour s'assurer que le calcul comprenne la valeur maximale du courant de court-circuit, il convient de supposer que les générateurs fonctionnaient, avant défaut, à leur valeur assignée.

NOTE 2 – Pour obtenir une estimation plus proche de la valeur de crête à 0,5 période, le facteur 2 peut être remplacé par 1,8.

### 6.2.6 Constantes de temps

Si les constantes de temps c.a. et c.c. sont inconnues, il est possible de les calculer à partir des constantes de temps et des impédances de la machine en circuit ouvert de la façon suivante:

a) Constante de temps subtransitoire, (généralement de l'ordre de 1 ms à 30 ms):

$$T''_d = (X''_d / X'_d) T'_{do} \quad (32)$$

b) Constante de temps transitoire (généralement de 20 ms à 1200 ms):

$$T'_d = (X'_d / X_d) T'_{do} \quad (33)$$

c) Constante de temps c.c. (généralement de 15 ms à 300 ms):

$$T_{dc} = X''_d / (2\pi f_r R_a) \quad (34)$$

## 6.3 Moteurs asynchrones

### 6.3.1 Premières approximations

En première approximation, il peut être admis que tous les moteurs asynchrones connectés en même temps au court-circuit contribuent à un courant alternatif de court-circuit égal à leur courant de démarrage (généralement entre 4 et 7 fois le courant total normal de la machine).

On peut aussi supposer que la contribution des moteurs est constante pendant toute la durée du court-circuit.

Ces suppositions conduiront à des valeurs plus élevées des courants de court-circuit que ce qui se produirait pour l'installation réelle. L'erreur sera fonction du nombre et de l'importance des moteurs connectés.

### 6.3.2 Omission des conditions de charge préalable des moteurs

Les équations (18) et (19) donnent la f.é.m. subtransitoire interne des moteurs  $E''_M$  et tiennent compte de l'effet de ses conditions de pré-charge. Celles-ci peuvent être omises avec une erreur négligeable, en sorte que:

$$E''_M = U_{rM} / \sqrt{3} \quad (35)$$

En outre, si les câbles de liaison sont courts,  $U_{rM}$  peut être assimilée à  $U_n$ , tension nominale du système:

$$E''_M = U_n / \sqrt{3} \quad (36)$$

De même dans les équations (17) et (20), en ce qui concerne les composantes a.c. et c.c., le courant de pré-charge des moteurs peut être négligé et les équations deviennent alors:

$$I''_M = (U_n / \sqrt{3}) / [(R_R + R_S)^2 + (X_R + X_S)^2]^{1/2} \quad (37)$$

et

$$i_{dcM}(t) = \sqrt{2} I''_M e^{-t/T_{dcM}} \quad (38)$$

i.e.

$$i_p = 2\sqrt{2} I_{ac} \quad (31)$$

NOTE 1 –  $U_0$  is the generator prefault voltage. To ensure that the calculation includes the maximum value of the short-circuit currents, it should be assumed that in the prefault condition, the generators are being operated at their rated value.

NOTE 2 – To provide a closer estimate of the peak value at 0,5 cycles, the factor 2 may be replaced by 1,8.

### 6.2.6 Time constants

If the a.c. and d.c. time constants are unavailable, they can be calculated from the machine open-circuit time constants and impedance as follows:

a) Subtransient time constant (usually of the order of 1 ms to 30 ms):

$$T''_d = (X''_d / X'_d) T''_{do} \quad (32)$$

b) Transient time constant (usually of the order of 20 ms to 1200 ms):

$$T'_d = (X'_d / X_d) T'_{do} \quad (33)$$

c) d.c. time constant (usually of the order of 15 ms to 300 ms):

$$T_{dc} = X''_d / (2\pi f_r R_a) \quad (34)$$

## 6.3 Asynchronous motors

### 6.3.1 First approximations

As a first approximation, it may be assumed that all asynchronous motors connected at the time of the short circuit, contribute an a.c. short-circuit current equal to their starting current. (Usually 4 to 7 times the machine normal full-load current.)

It may also be assumed that the motor contribution is constant throughout the complete short-circuit fault period.

Such assumptions will give higher values of short-circuit currents than will occur on the actual installation. The error will depend upon the number and size of motors connected.

### 6.3.2 Neglecting the motor preload conditions

Equations (18) and (19) calculate the motor internal subtransient voltage  $E''_M$  and include the effect of the motor preload conditions. The preload motor condition can be neglected with negligible error such that:

$$E''_M = U_{rM} / \sqrt{3} \quad (35)$$

Further, if the connecting cables are short,  $U_{rM}$  can be approximated to  $U_n$ , the system nominal voltage:

$$E''_M = U_n / \sqrt{3} \quad (36)$$

Similarly in equations (17) and (20) for the a.c. and d.c. components, the motor preload current may be neglected and the equations become:

$$I''_M = (U_n / \sqrt{3}) / [(R_R + R_S)^2 + (X_R + X_S)^2]^{1/2} \quad (37)$$

and

$$i_{dcM}(t) = \sqrt{2} I''_M e^{-t/T_{dcM}} \quad (38)$$

### 6.3.3 Données générales – Gros moteurs

Pour les moteurs d'une puissance supérieure à 100 kW ou à 15 % de la capacité normale des générateurs connectés, il convient d'utiliser les formules de l'article 5. Si l'on manque de données concernant les moteurs pour évaluer les formules appropriées, les valeurs approximatives suivantes des paramètres caractéristiques des moteurs peuvent être utilisées:

#### a) Impédance des moteurs $Z''_M$

Pour les installations à 50 Hz ou à 60 Hz

$$z''_M = 0,16 \text{ p.u.}$$

$$x''_M = 0,15 \text{ p.u.}$$

$$r_s = 0,034 \text{ p.u.}$$

$$r_R = 0,021 \text{ p.u.}$$

$$r_M = r_s + r_R = 0,055 \text{ p.u.}$$

où

$Z''_M$  est l'impédance à rotor bloqué.

#### b) Constantes de temps

$$\text{– à 60 Hz, } T''_M = 18,67 \text{ ms} \quad T_{dcM} = 11,73 \text{ ms}$$

$$\text{– à 50 Hz, } T''_M = 22,4 \text{ ms} \quad T_{dcM} = 14,08 \text{ ms}$$

#### c) Courant de pré-charge inconnu

Si l'on néglige le courant de pré-charge, l'utilisation des paramètres caractéristiques ci-avant donne:

$$I''_M = 6,25 I_{rM} \quad (39)$$

$$I_{acM} = 4,00 I_{rM} \quad \text{à } t = T/2 \quad (40)$$

$$i_{pM} = 10 I_{rM} \quad (41)$$

#### d) Utilisation du courant à rotor bloqué

Le courant du moteur à rotor bloqué,  $I_{LR}$ , peut, lorsqu'il est connu, être utilisé dans les calculs en posant que  $I''_M$  est égal à  $I_{LR}$ .

#### e) Si les données du moteur ne sont pas toutes connues, la puissance du moteur en kVA peut être calculée comme suit:

$$\text{moteurs à induction} \quad 1 \text{ kW} = 1,34 \text{ kVA}$$

$$\text{moteurs synchrones} \quad 1 \text{ kW} = 1 \text{ kVA}$$

Pour des calculs approchés, le produit du facteur de puissance par l'efficacité peut être considéré comme égal à 0,8.

### 6.3.4 Données générales – Petits moteurs

Des petits moteurs alimentés par le même bus peuvent être considérés comme un moteur unique équivalent, ayant un courant assigné égal à la somme des courants assignés des moteurs individuels, reliés au système à leur point commun de connexion.

L'ensemble du groupe des moteurs, y compris leurs câbles de liaison, peut être considéré comme un moteur équivalent unique pourvu des paramètres caractéristiques suivants:

#### a) Impédances des moteurs $Z''_M$

Pour 50 Hz ou 60 Hz

$$z''_M = 0,2 \text{ p.u.}$$

$$x''_M = 0,188 \text{ p.u.}$$

$$r_s = 0,043 \text{ p.u.}$$

$$r_R = 0,027 \text{ p.u.}$$

$$r_M = r_s + r_R = 0,07 \text{ p.u.}$$



### 6.3.3 General data for large motors

For any motor rated more than 100 kW or 15 % of the normal connected generator capacity, the formulae of clause 5 should be used. If insufficient motor data is available, the following approximate values for the motor characteristic parameters may be used.

a) Motor impedance  $Z''_M$

For both 50 Hz and 60 Hz installations

$$z''_M = 0,16 \text{ p.u.}$$

$$x''_M = 0,15 \text{ p.u.}$$

$$r_s = 0,034 \text{ p.u.}$$

$$r_R = 0,021 \text{ p.u.}$$

$$r_M = r_s + r_R = 0,055 \text{ p.u.}$$

where

$Z''_M$  is the locked rotor impedance.

b) Time constants

$$\text{– at 60 Hz, } T''_M = 18,67 \text{ ms} \quad T_{dcM} = 11,73 \text{ ms}$$

$$\text{– at 50 Hz, } T''_M = 22,4 \text{ ms} \quad T_{dcM} = 14,08 \text{ ms}$$

c) Ignoring preload current

If the preload current is ignored, using the above characteristic parameters gives:

$$I''_M = 6,25 I_{rM} \quad (39)$$

$$I_{acM} = 4,00 I_{rM} \quad \text{at } t = T/2 \quad (40)$$

$$I_{pM} = 10 I_{rM} \quad (41)$$

d) Using motor locked rotor current

If the motor locked rotor current  $I_{LR}$  is known, it may be assumed that  $I''_M$  is equal to  $I_{LR}$ .

e) When full motor data is unavailable the motor input kVA may be calculated as follows:

$$\text{Induction motors} \quad 1 \text{ kW} = 1,34 \text{ kVA}$$

$$\text{Synchronous motors 1,0 pf} \quad 1 \text{ kW} = 1 \text{ kVA}$$

For approximate calculations the product of motor power factor and efficiency may be considered equal to 0,8.

### 6.3.4 General data for small motors

Small motors connected to the same bus may be considered as a single equivalent motor, having a rated current equal to the sum of the individual motor rated currents, and connected to the system at their common bus.

The total motor group including their connecting cables may be considered as a single equivalent motor having the following characteristic parameters:

a) Motor impedance  $Z''_M$

For both 50 Hz and 60 Hz:

$$z''_M = 0,2 \text{ p.u.}$$

$$x''_M = 0,188 \text{ p.u.}$$

$$r_s = 0,043 \text{ p.u.}$$

$$r_R = 0,027 \text{ p.u.}$$

$$r_M = r_s + r_R = 0,07 \text{ p.u.}$$

b) Constantes de temps

- à 60 Hz,  $T''_M = 18,67 \text{ ms}$   $T_{dcM} = 11,73 \text{ ms}$
- à 50 Hz,  $T''_M = 22,4 \text{ ms}$   $T_{dcM} = 14,08 \text{ ms}$

c) Courant de pré-charge inconnu

Si l'on néglige le courant de pré-charge, l'utilisation des paramètres caractéristiques ci-avant donne:

$$I''_M = 5 I_{rM} \quad (42)$$

$$I_{acM} = 3,2 I_{rm} \quad \text{à } t = T/2 \quad (43)$$

$$i_{pM} = 8 I_{rM} \quad (44)$$

d) Les formules de 6.3.3 peuvent être utilisées pour calculer la puissance du moteur en kVA.

### 6.3.5 Moteurs asynchrones à service limité

Le courant de court-circuit des moteurs conçus pour fonctionner en service limité et dont on ne connaît pas complètement les paramètres, peut se calculer en supposant le moteur en service continu et fonctionnant à puissance réduite.

## 7 Application du générateur équivalent

### 7.1 Généralités

Lorsque le calcul temporel de courants de court-circuit de systèmes comprenant des générateurs et/ou des moteurs de caractéristiques et/ou de dimensions différentes est requis, les générateurs et les moteurs doivent être combinés en un «générateur équivalent» ou en un «moteur équivalent».

### 7.2 Hypothèses

La méthode de calcul repose sur l'hypothèse que le courant de court-circuit en tout point d'une installation peut être évalué en remplaçant les composants actifs par un générateur et/ou moteur équivalent, dont les caractéristiques produiraient le même courant de court-circuit que les composants actifs qu'il remplace.

### 7.3 Evaluation du moteur équivalent

#### 7.3.1 Généralités

Pour évaluer le moteur équivalent, les courants de court-circuit des moteurs individuels sont calculés à leur point commun de liaison. Ces courants se calculent comme indiqué en 5.1.2.6.

Les courants individuels de court-circuit s'additionnent alors arithmétiquement pour déterminer les courants de court-circuit totaux  $I_{acM}(t)_{To}$  et  $i_{dcM}(t)_{To}$ , à l'aide des équations (45) et (46)

$$I_{acM}(t)_{To} = \sum I_{acM}(t) \quad (45)$$

et

$$i_{dcM}(t)_{To} = \sum i_{dcM}(t) \quad (46)$$

La somme des courants de court-circuit sert à déterminer les paramètres caractéristiques d'un moteur équivalent qui produirait les mêmes courants de court-circuit que ceux calculés ci-avant.

Les courants de court-circuit du moteur équivalent  $I_{acM*}(t)_{To}$  et  $i_{dcM*}(t)_{To}$  sont égaux à  $I_{acM}(t)_{To}$  et  $i_{dcM}(t)_{To}$  évalués à un instant donné  $t$ , c'est-à-dire:

$$I_{acM*}(t) = I''_{M*} e^{-t/T_{M*}} \quad (47)$$

$$i_{dcM*}(t) = \sqrt{2} I''_{M*} e^{-t/T_{M*}} \quad (48)$$

## b) Time constants

- at 60 Hz  $T''_M = 18,67 \text{ ms}$      $T_{dcM} = 11,73 \text{ ms}$
- at 50 Hz  $T''_M = 22,4 \text{ ms}$      $T_{dcM} = 14,08 \text{ ms}$ .

## c) Ignoring preload current

If the preload current is ignored then using the above characteristic parameters leads to:

$$I''_M = 5 I_{rM} \quad (42)$$

$$I_{acM} = 3,2 I_{rm} \quad \text{at } t = T/2 \quad (43)$$

$$i_{pM} = 8 I_{rM} \quad (44)$$

d) The formulae of 6.3.3 may be used to calculate motor kVA.

### 6.3.5 Limited service asynchronous motors

The short-circuit current of motors designed to work in limited service, whose parameters are not completely known, may be calculated assuming the motor is in continuous service and operating at reduced power.

## 7 Application of the equivalent generator

### 7.1 General

For systems with generators and/or motors having different ratings and/or characteristics, the generators and motors shall be combined to form an "equivalent generator" or an "equivalent motor".

### 7.2 Assumptions

The calculation method assumes that the short-circuit current at any point on an installation can be evaluated by replacing the active components with those of an equivalent generator and/or motor, having characteristics which will produce the same short-circuit current as the active components it replaces.

### 7.3 Evaluation of the equivalent motor

#### 7.3.1 General

To evaluate the equivalent motor, the short-circuit current for each individual motor shall be calculated at the point of common connection, as outlined in 5.1.2.6.

The individual short-circuit currents shall then be arithmetically summed to determine the total short-circuit currents  $I_{acM}(t)_{To}$  and  $i_{dcM}(t)_{To}$ , using equations (45) and (46).

$$I_{acM}(t)_{To} = \sum I_{acM}(t) \quad (45)$$

and

$$i_{dcM}(t)_{To} = \sum i_{dcM}(t) \quad (46)$$

The short-circuit current summation shall be used to determine the characteristic parameters of an equivalent motor which would produce the same short-circuit currents as calculated above.

The short-circuit current of the equivalent motor  $I_{acM*}(t)_{To}$  and  $i_{dcM*}(t)_{To}$  are equal to  $I_{acM}(t)_{To}$  and  $i_{dcM}(t)_{To}$  evaluated at a specific point in time, i.e.:

$$I_{acM*}(t) = I''_{M*} e^{-t/T_{M*}} \quad (47)$$

$$i_{dcM*}(t) = \sqrt{2} I''_{M*} e^{-t/T_{M*}} \quad (48)$$

### 7.3.2 Détermination des paramètres du moteur équivalent

Pour évaluer les équations (47) et (48), les paramètres du moteur équivalent sont calculés comme suit:

a) Courant subtransitoire du moteur équivalent  $I''_{M*}$

$I''_{M*}$  se calcule en additionnant les courants des moteurs individuels  $I''_M$ , calculés chacun selon l'équation (17):

$$I''_{M*} = \sum I''_M \quad (49)$$

b) Impédance subtransitoire du moteur équivalent  $Z''_{M*}$

$Z''_{M*}$  se calcule en utilisant la valeur ci-dessus de  $I''_{M*}$  comme indiqué par l'équation (50):

$$Z''_{M*} = U_0 / (\sqrt{3} I''_{M*}) \quad (50)$$

c) Constantes de temps du moteur équivalent  $T''_{M*}$ ,  $T_{dcM*}$

$$T''_{M*} = -t_x / \ln [K''_M(t_x) / I''_{M*}] \quad (51)$$

$$T_{dcM*} = -t_x / \ln [K_{dcM}(t_x) / (\sqrt{2} I''_{M*})] \quad (52)$$

$K''_M(t_x)$  et  $K_{dcM}(t_x)$  sont tirées des équations (53) et (54)

$$K''_M(t_x) = \sum I''_M e^{-t_x/T''_M} \quad (53)$$

$$K_{dcM}(t_x) = \sqrt{2} \sum I''_M e^{-(t_x/T_{dcM})} \quad (54)$$

$t_x$  est l'instant pour lequel les courants sont calculés.

d) Résistance et réactances du moteur équivalent.

Les résistances et réactances se calculent comme suit:

$$R_{R*} = c_1 X''_{M*} \quad (55)$$

$$R_{S*} = c_2 X''_{M*} \quad (56)$$

où

$$c_1 = 1/(2\pi f T''_{M*}) \quad (57)$$

$$c_2 = 1/(2\pi f T_{dcM*}) \quad (58)$$

$$Z''_{M*} = [(R_{S*} + R_{R*})^2 + X''_{M*}{}^2]^{1/2} \quad (59)$$

et

$$X''_{M*} = Z''_{M*} / [1 + (c_1 + c_2)^2]^{1/2} \quad (60)$$

## 7.4 Evaluation du générateur équivalent

### 7.4.1 Généralités

Pour évaluer le générateur équivalent, il est nécessaire de faire le calcul temporel des courants de court-circuit des générateurs et moteurs individuels à leur point commun de liaison. Ces courants se calculent comme indiqué en 5.1.1.5 et 5.1.2.6.

Les courants individuels de court-circuit s'additionnent alors arithmétiquement pour déterminer les courants de court-circuit totaux  $I_{ac}(t)_{To}$  et  $i_{dc}(t)_{To}$ , à l'aide des équations (61) et (62):

$$I_{ac}(t)_{To} = \sum I_{acG}(t) + \sum I_{acM}(t) \quad (61)$$

et

$$i_{dc}(t)_{To} = \sum i_{dcG}(t) + \sum i_{dcM}(t) \quad (62)$$

Les sommes des courants de court-circuit servent alors à déterminer les paramètres caractéristiques d'un générateur équivalent qui produirait le même courant de court-circuit que celui calculé ci-avant.

### 7.3.2 Determination of the equivalent motor parameters

To evaluate equations (47) and (48), the equivalent motor parameters shall be calculated as follows:

a) Equivalent motor subtransient current  $I''_{M*}$

$I''_{M*}$  can be calculated by summing the individual motor currents  $I''_M$ , each calculated according to equation (17):

$$I''_{M*} = \sum I''_M \quad (49)$$

b) Equivalent motor subtransient impedance  $Z''_{M*}$

$Z''_{M*}$  shall be calculated by using the above value of  $I''_{M*}$  in equation (50):

$$Z''_{M*} = U_0 / (\sqrt{3} I''_{M*}) \quad (50)$$

c) Equivalent motor time constants  $T''_{M*}$ ,  $T_{dcM*}$

$$T''_{M*} = -t_x / \ln [K''_M(t_x) / I''_{M*}] \quad (51)$$

$$T_{dcM*} = -t_x / \ln [K_{dcM}(t_x) / (\sqrt{2} I''_{M*})] \quad (52)$$

$K''_M(t_x)$  and  $K_{dcM}(t_x)$  shall be evaluated using equations (53) and (54):

$$K''_M(t_x) = \sum I''_M e^{-t_x/T''_M} \quad (53)$$

$$K_{dcM}(t_x) = \sqrt{2} \sum I''_M e^{-(t_x/T_{dcM})} \quad (54)$$

$t_x$  is the point in time at which the currents are calculated.

d) Equivalent motor resistance and reactance

The resistance and reactance shall be calculated as follows:

$$R_{R*} = c_1 X''_{M*} \quad (55)$$

$$R_{S*} = c_2 X''_{M*} \quad (56)$$

where

$$c_1 = 1/(2\pi f T''_{M*}) \quad (57)$$

$$c_2 = 1/(2\pi f T_{dcM*}) \quad (58)$$

$$Z''_{M*} = [(R_{S*} + R_{R*})^2 + X''_{M*}{}^2]^{1/2} \quad (59)$$

and

$$X''_{M*} = Z''_{M*} / [1 + (c_1 + c_2)^2]^{1/2} \quad (60)$$

## 7.4 Evaluation of the equivalent generator

### 7.4.1 General

To evaluate the equivalent generator, the time-dependent short-circuit current for each individual generator and motor shall be calculated at the point of common connection, as outlined in 5.1.1.5 and 5.1.2.6.

The individual short-circuit currents are summed arithmetically to determine the total short-circuit current  $I_{ac}(t)_{To}$ , and  $i_{dc}(t)_{To}$ , using equations (61) and (62):

$$I_{ac}(t)_{To} = \sum I_{acG}(t) + \sum I_{acM}(t) \quad (61)$$

and

$$i_{dc}(t)_{To} = \sum i_{dcG}(t) + \sum i_{dcM}(t) \quad (62)$$

The short-circuit current summations shall then be used to determine the characteristic parameters of an equivalent generator which would produce the same short-circuit current as calculated above.

#### 7.4.2 Composante alternative $I_{ac}(t)_*$

La fonction temporelle de la composante alternative  $I_{ac}(t)_*$  du générateur équivalent peut se calculer à chaque instant à l'aide de l'équation (61) ci-dessus. Cette fonction se caractérise par les courants subtransitoire, transitoire et d'état permanent du générateur équivalent tels que:

$$I_{ac}(t)_* = (I''_* - I'_*) e^{-t/T''_{d*}} + (I'_* - I_{k*}) e^{-t/T'_{d*}} + I_{k*} \quad (63)$$

Il est commode de récrire cette équation sous la forme:

$$I_{ac}(t)_* = M_* e^{-t/T''_{d*}} + N_* e^{-t/T'_{d*}} + I_{k*} \quad (64)$$

Les valeurs initiales subtransitoire, transitoire et d'état permanent du courant de court-circuit triphasé du générateur équivalent,  $I''_*$ ,  $I'_*$  et  $I_{k*}$  peuvent être tirées des équations (65), (66) et (67):

$$I''_* = \sum_i^n I''_{kdi} + \sum_j^n I''_{Mj} \quad (65)$$

$$I'_* = \sum_i^n I'_{kdi} \quad (66)$$

$$I_{k*} = \sum_i^n I_{kdi} \quad (67)$$

Les intégrations ci-dessus s'appliquent aux «i» générateurs et aux «j» moteurs raccordés au point commun pour lesquels le générateur équivalent est évalué.

Les constantes  $M_*$  et  $N_*$  se calculent d'après les équations (68) et (69).

$$M_* = (I''_* - I'_*) \quad (68)$$

$$N_* = (I'_* - I_{k*}) \quad (69)$$

#### 7.4.3 Constante de temps subtransitoire $T''_{d*}$ du générateur équivalent

Pour déterminer la constante de temps subtransitoire  $T''_{d*}$  du générateur équivalent, il est nécessaire de définir une fonction  $K''(t)$  pour chacun des générateurs à évaluer, telle que:

$$K''(t) = (I''_{kd} - I'_{kd}) e^{-t/T''_{d*}} + I'_{kd} \quad (70)$$

Une fonction semblable  $K''(t)_*$  peut être définie pour le générateur équivalent, telle que:

$$K''(t)_* = M_* e^{-t/T''_{d*}} + I'_* \quad (71)$$

qui est aussi égale à:

$$K''(t)_* = \sum_i^n K''(t) + \sum_j^n I''_{Mj} e^{-t/T''_{Mj}} \quad (72)$$

pour chaque générateur et moteur.

L'équation ci-dessus peut être évaluée à un instant donné,  $t_x$ , de façon à calculer  $K''(t_x)_*$  qui peut être introduit dans l'équation (73) pour calculer  $T''_{d*}$ , c'est-à-dire:

$$T''_{d*} = -t_x / \ln [(K''(t_x)_* - I'_*) / M_*] \quad (73)$$

#### 7.4.4 Constante de temps transitoire $T'_{d*}$ du générateur équivalent

La constante du temps transitoire  $T'_{d*}$  du générateur équivalent peut s'obtenir par évaluation de l'équation (74) au temps  $t = t_x$ , c'est-à-dire:

$$I_{ac}(t_x)_* = M_* e^{-t_x/T''_{d*}} + N_* e^{-t_x/T'_{d*}} + I_{k*} \quad (74)$$

#### 7.4.2 AC component $I_{ac}(t)_*$

The a.c. component time function  $I_{ac}(t)_*$  shall be calculated at any point in time using equation (61) above. This function includes the subtransient, transient and steady-state currents of the equivalent generator, i.e.:

$$I_{ac}(t)_* = (I''_* - I'_*) e^{-t/T''_{d*}} + (I'_* - I_{k*}) e^{-t/T'_{d*}} + I_{k*} \quad (63)$$

This equation can be rewritten as:

$$I_{ac}(t)_* = M_* e^{-t/T''_{d*}} + N_* e^{-t/T'_{d*}} + I_{k*} \quad (64)$$

The initial values of the equivalent generator subtransient, transient and steady-state three-phase short-circuit current,  $I''_*$ ,  $I'_*$  and  $I_{k*}$  shall be evaluated using equations (65), (66), and (67):

$$I''_* = \sum_i^n I''_{kdi} + \sum_j^n I''_{Mj} \quad (65)$$

$$I'_* = \sum_i^n I'_{kdi} \quad (66)$$

$$I_{k*} = \sum_i^n I_{kdi} \quad (67)$$

The above summations apply to the  $i$  generators and  $j$  motors connected at a common point, for which the equivalent generator is being evaluated.

The constants  $M_*$  and  $N_*$  shall be calculated from equations (68), (69).

$$M_* = (I''_* - I'_*) \quad (68)$$

$$N_* = (I'_* - I_{k*}) \quad (69)$$

#### 7.4.3 Equivalent generator subtransient time constant $T''_{d*}$

To calculate  $T''_{d*}$  it is necessary to define a function  $K''(t)$  and for each generator where:

$$K''(t) = (I''_{kd} - I'_{kd}) e^{-t/T''_{d*}} + I'_{kd} \quad (70)$$

A similar function  $K''(t)_*$  shall also be defined where:

$$K''(t)_* = M_* e^{-t/T''_{d*}} + I'_* \quad (71)$$

which is also equal to:

$$K''(t)_* = \sum_i^n K''(t) + \sum_j^n I''_{Mj} e^{-t/T''_{Mj}} \quad (72)$$

for each generator and motor.

The above equation shall be evaluated at time,  $t_x$ , in order to calculate  $K''(t_x)_*$  which shall then be substituted in equation (73) to calculate  $T''_{d*}$ :

$$T''_{d*} = -t_x / \ln [(K''(t_x)_* - I'_*) / M_*] \quad (73)$$

#### 7.4.4 Equivalent generator transient time constant $T'_{d*}$

$T'_{d*}$  is calculated by evaluating equation (74) at time  $t = t_x$  i.e.:

$$I_{ac}(t_x)_* = M_* e^{-t_x/T''_{d*}} + N_* e^{-t_x/T'_{d*}} + I_{k*} \quad (74)$$

L'on peut supposer que  $I_{ac}(t_x)_*$  est aussi égal à:

$$I_{ac}(t_x)_* = \sum_i^n I_{ac}(t_x)_i + \sum_j^n I_{acM}(t_x)_j \quad (75)$$

pour les «i» générateurs et les «j» moteurs étudiés.

$M_* e^{-t_x/T''_{d*}}$  peut être extrait des équations (68) et (73).  $N_*$  peut se déduire de (69) et  $I_{k*}$  de l'équation (67).

En conséquence,  $T'_{d*}$  peut s'obtenir à partir de (76):

$$T'_{d*} = -t_x / \ln \left\{ \left[ I_{ac}(t_x)_* - (M_* e^{-t_x/T''_{d*}} + I_{k*}) \right] / N_* \right\} \quad (76)$$

#### 7.4.5 Constante de temps c.c., $T_{dc*}$

La constante de temps c.c. du générateur équivalent peut s'obtenir en évaluant l'équation (77) au temps  $t = t_x$

$$i_{dc}(t_x)_* = \sqrt{2} I''_* e^{-t_x/T_{dc*}} \quad (77)$$

qui est aussi égal à:

$$I_{ac}(t_x)_* = \sum_i^n i_{dc}(t_x)_i + \sum_j^n i_{dc}(t_x)_j \quad (78)$$

pour les «i» générateurs et les «j» moteurs étudiés.

$I''_*$  peut se calculer avec (65). En conséquence  $T_{dc*}$  peut se calculer à l'aide de (79):

$$T_{dc*} = -t_x / \ln [i_{dc}(t_x)_* / (\sqrt{2} I''_*)] \quad (79)$$

dans laquelle  $i_{dc}(t_x)_*$  est tirée de (78).

#### 7.4.6 Impédances des générateurs équivalents

Les résistances et réactances peuvent s'évaluer à partir des formules suivantes:

$$R_* = X''_* / 2 \pi f T_{dc*} = c_3 X''_* \quad (80)$$

dans laquelle:

$$c_3 = 1 / (2 \pi f T_{dc*}) \quad (81)$$

Les impédances peuvent être évaluées avec:

$$Z_* = (R_*^2 + X_*^2)^{1/2} \quad (82)$$

$$Z''_* = U_0 / (\sqrt{3} I''_*) \quad (83)$$

$$Z'_* = U_0 / (\sqrt{3} I'_*) \quad (84)$$

$$Z_* = U_0 / (\sqrt{3} I_*) \quad (85)$$

d'où

$$X''_* = Z''_* / (1 + c_3^2)^{1/2} \quad (86)$$

$$X'_* = (Z'^2_* - R_*^2)^{1/2} \quad (87)$$

$$X_* = (Z_*^2 - R_*^2)^{1/2} \quad (88)$$



$I_{ac}(t_x)_*$  is also equal to:

$$I_{ac}(t_x)_* = \sum_i^n I_{ac}(t_x)_i + \sum_j^n I_{acM}(t_x)_j \quad (75)$$

for the “ $i$ ” generators and “ $j$ ” motors being considered.

$M_* e^{-t_x/T''_{d*}}$  is calculated from equations (68) and (73).  $N_*$  is calculated from equation (69), and  $I_{k*}$  is calculated from equation (67).

Hence  $T'_{d*}$  is calculated using equation (76):

$$T'_{d*} = -t_x / \ln \left\{ \left[ I_{ac}(t_x)_* - (M_* e^{-t_x/T''_{d*}} + I_{k*}) \right] / N_* \right\} \quad (76)$$

#### 7.4.5 DC time constant $T_{dc*}$

$T_{dc*}$  shall be calculated by evaluating equation (77) at time  $t = t_x$

$$i_{dc}(t_x)_* = \sqrt{2} I''_* e^{-t_x/T_{dc*}} \quad (77)$$

which is also equal to:

$$I_{ac}(t_x)_* = \sum_i^n i_{dc}(t_x)_i + \sum_j^n i_{dc}(t_x)_j \quad (78)$$

for the “ $i$ ” generators and “ $j$ ” motors being considered.

$I''_*$  shall be calculated from equation (65) and hence  $T_{dc*}$  shall be calculated from equation (79):

$$T_{dc*} = -t_x / \ln [i_{dc}(t_x)_* / (\sqrt{2} I''_*)] \quad (79)$$

$i_{dc}(t_x)_*$  is calculated from equation (78).

#### 7.4.6 Equivalent generator impedance

The resistance and reactance may be evaluated from the following formulae:

$$R_* = X''_* / 2 \pi f T_{dc*} = c_3 X''_* \quad (80)$$

where:

$$c_3 = 1 / (2 \pi f T_{dc*}) \quad (81)$$

The impedance may be evaluated from:

$$Z_* = (R_*^2 + X_*^2)^{1/2} \quad (82)$$

$$Z''_* = U_0 / (\sqrt{3} I''_*) \quad (83)$$

$$Z'_* = U_0 / (\sqrt{3} I'_*) \quad (84)$$

$$Z_* = U_0 / (\sqrt{3} I_*) \quad (85)$$

hence

$$X''_* = Z''_* / (1 + c_3^2)^{1/2} \quad (86)$$

$$X'_* = (Z'^2_* - R_*^2)^{1/2} \quad (87)$$

$$X_* = (Z_*^2 - R_*^2)^{1/2} \quad (88)$$

## 8 Calcul de systèmes

### 8.1 Généralités

Les calculs de courant de court-circuit des systèmes englobent le calcul de courant de court-circuit:

- a) sur les barres omnibus principales des générateurs;
- b) aux tableaux de distribution reliés aux barres principales;
- c) aux tableaux de distribution ou de commutation reliés aux barres principales ou à un tableau de distribution alimenté par un transformateur.

Les calculs de courant de court-circuit des systèmes doivent prendre en compte les courants de court-circuit provenant de tous les moteurs et générateurs raccordés au système, y compris ceux qui sont raccordés aux barres principales, aux tableaux de commutation intermédiaires et tableaux de distribution. Les formules des articles 5 et 6 peuvent être utilisées pour déterminer les courants de court-circuit en fonction du temps aux bornes du constituant. Le présent article indique comment utiliser les formules ci-avant pour calculer les courants de court-circuit des systèmes, de manière à inclure les effets des câbles et transformateurs reliant les composants du système aux tableaux de distribution et de commutation.

Il est difficile d'élaborer une méthode normalisée de calcul des courants de court-circuit, mais il est souhaitable de suivre les procédures fondamentales de calcul indiquées en 8.7, afin d'assurer la cohérence de l'approche.

En raison de la complexité des calculs, il est recommandé de faire un essai de calcul comme indiqué en 8.3 avant d'entreprendre les calculs détaillés d'un système pour s'assurer que les erreurs entraînées par l'utilisation d'une méthode simplifiée ou des approximations sont acceptables.

### 8.2 Influence des composants non actifs reliés en série aux composants actifs

#### 8.2.1 Généralités

Lorsque l'on calcule le courant de court-circuit en un point relié par des composants non actifs (câbles ou transformateurs) à des composants actifs (générateurs, moteurs), les impédances des composants non actifs sont à prendre en considération. Ces impédances réduisent l'amplitude du courant de court-circuit, accroissent les constantes de temps subtransitoire et transitoire et diminuent les constantes de temps c.c.. Les effets de réseau procurent une valeur atténuée du courant de court-circuit qui décroît plus lentement.

#### 8.2.2 Générateurs

- a) Changements d'impédance

Les impédances des composants non actifs sont prises en considération en augmentant l'impédance des composants actifs.

Dans les équations (3) et (4)  $Z''_d$  et  $Z'_d$  seraient remplacées par  $Z''_e$  et  $Z'_e$  telles que:

$$Z''_e = [(R_a + R)^2 + (X''_d + X)^2]^{1/2} \quad (89)$$

$$Z'_e = [(R_a + R)^2 + (X'_d + X)^2]^{1/2} \quad (90)$$

Dans les équations (7) et (8),  $\underline{Z''}_d$  et  $\underline{Z}'_d$  seraient remplacées par  $\underline{Z''}_e$  et  $\underline{Z}'_e$  telles que:

$$\underline{Z''}_e = \underline{Z''}_d + \underline{Z} \quad (91)$$

$$\underline{Z}'_e = \underline{Z}'_d + \underline{Z} \quad (92)$$

- b) Changements de constantes de temps

Les constantes de temps doivent inclure l'impédance ajoutée des composants non actifs.

## 8 System calculations

### 8.1 General

System calculations require the short-circuit current to be evaluated at:

- a) the main generating busbars;
- b) distribution boards connected to the main generating busbars;
- c) distribution boards or switchboards connected to the main generating busbars or a distribution board and fed through a transformer.

System short-circuit current calculations shall include the short-circuit current contributed by all motors and generators connected to the system including those at the main generating busbars, sub-switchboards and distribution boards. The formulae of clauses 5 and 6 calculate the time-dependent short-circuit current at the terminals of the system's components. For system calculations, these formulae shall be modified as described in the following clauses, in order to include the effects of the cables and transformers connecting the system's components to the distribution and switchboards.

It is difficult to establish a standard methodology to complete the system calculations but to ensure a consistent approach, a standard calculation procedure as outlined in 8.7 should be followed.

Because of the complexities involved, completing a detailed calculation can be time-consuming and accordingly "test" calculations shall be done as indicated in 8.3 to ascertain if the errors resulting from using a simplified or approximate method are acceptable.

### 8.2 Effects of non-active components connected in series with active components

#### 8.2.1 General

When calculating the short-circuit current at a point on an installation which is connected by a non-active component (cables or transformers) to an active component (generators and motors), the non-active component impedance shall be taken into account. This impedance reduces the magnitude of the short-circuit current, increases the subtransient and transient time constants, and decreases the d.c. time constant. The net effect is a lower value of short-circuit current which decays more slowly.

#### 8.2.2 Generators

##### a) Impedance changes

Non-active component impedances are taken into account by increasing the impedance of the active components.

In equations (3) and (4)  $Z''_d$  and  $Z'_d$  should be replaced by  $Z''_e$  and  $Z'_e$  where:

$$Z''_e = [(R_a + R)^2 + (X''_d + X)^2]^{1/2} \quad (89)$$

$$Z'_e = [(R_a + R)^2 + (X'_d + X)^2]^{1/2} \quad (90)$$

In equations (7) and (8),  $\underline{Z''_d}$  and  $\underline{Z'_d}$  should be replaced by  $\underline{Z''_e}$  and  $\underline{Z'_e}$  where:

$$\underline{Z''_e} = \underline{Z''_d} + \underline{Z} \quad (91)$$

$$\underline{Z'_e} = \underline{Z'_d} + \underline{Z} \quad (92)$$

##### b) Time-constant changes

The time constants shall include the added impedance of the non-active components.