

# **RAPPORT TECHNIQUE TECHNICAL REPORT**

**CEI  
IEC  
363**

Première édition  
First edition  
1972

---

---

**Evaluation du courant de court-circuit  
particulièrement en ce qui concerne  
la capacité nominale des disjoncteurs  
au court-circuit dans les installations  
électriques à bord des navires**

**Short-circuit current evaluation with  
special regard to rated short-circuit  
capacity of circuit-breakers  
in installations in ships**



Numéro de référence  
Reference number  
CEI/IEC 363: 1972

## Révision de la présente publication

Le contenu technique des publications de la C E I est constamment revu par la Commission afin d'assurer qu'il reflète bien l'état actuel de la technique.

Les renseignements relatifs à ce travail de révision, à l'établissement des éditions révisées et aux mises à jour peuvent être obtenus auprès des Comités nationaux de la C E I et en consultant les documents ci-dessous:

- **Bulletin de la C E I**
- **Annuaire de la C E I**
- **Catalogue des publications de la C E I**  
Publié annuellement

## Terminologie

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la Publication 50 de la C E I: Vocabulaire Electrotechnique International (VEI), qui est établie sous forme de chapitres séparés traitant chacun d'un sujet défini, l'Index général étant publié séparément. Des détails complets sur le VEI peuvent être obtenus sur demande.

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

## Symboles graphiques et littéraux

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

- la Publication 27 de la C E I: Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique;
- la Publication 617 de la C E I: Symboles graphiques pour schémas.

Les symboles et signes contenus dans la présente publication ont été soit repris des Publications 27 ou 617 de la C E I, soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

## Publications de la C E I établies par le même Comité d'Etudes

L'attention du lecteur est attirée sur le deuxième feuillet de la couverture, qui énumère les publications de la C E I préparées par le Comité d'Etudes qui a établi la présente publication.

## Revision of this publication

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

Information on the work of revision, the issue of revised editions and amendment sheets may be obtained from I E C National Committees and from the following I E C sources:

- **I E C Bulletin**
- **I E C Yearbook**
- **Catalogue of I E C Publications**  
Published yearly

## Terminology

For general terminology, readers are referred to I E C Publication 50: International Electrotechnical Vocabulary (IEV), which is issued in the form of separate chapters each dealing with a specific field, the General Index being published as a separate booklet. Full details of the IEV will be supplied on request.

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

## Graphical and letter symbols

For graphical symbols, and letter symbols and signs approved by the I E C for general use, readers are referred to:

- I E C Publication 27: Letter symbols to be used in electrical technology;
- I E C Publication 617: Graphical symbols for diagrams.

The symbols and signs contained in the present publication have either been taken from I E C Publications 27 or 617, or have been specifically approved for the purpose of this publication.

## I E C publications prepared by the same Technical Committee

The attention of readers is drawn to the back cover, which lists I E C publications issued by the Technical Committee which has prepared the present publication.

# RAPPORT TECHNIQUE TECHNICAL REPORT

**CEI  
IEC  
363**

Première édition  
First edition  
1972

---

---

**Evaluation du courant de court-circuit  
particulièrement en ce qui concerne  
la capacité nominale des disjoncteurs  
au court-circuit dans les installations  
électriques à bord des navires**

**Short-circuit current evaluation with  
special regard to rated short-circuit  
capacity of circuit-breakers  
in installations in ships**

© CEI 1972 Droits de reproduction réservés — Copyright — all rights reserved

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

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

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



Commission Electrotechnique Internationale  
International Electrotechnical Commission  
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX  
PRICE CODE

**V**

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

## SOMMAIRE

|                                                                                                                                                                                     | Pages |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| PRÉAMBULE . . . . .                                                                                                                                                                 | 4     |
| PRÉFACE . . . . .                                                                                                                                                                   | 4     |
| SECTION UN — INSTALLATIONS A COURANT ALTERNATIF                                                                                                                                     |       |
| Articles                                                                                                                                                                            |       |
| 1. Evaluation du courant de court-circuit maximal d'une installation et du facteur de puissance correspondant . . . . .                                                             | 6     |
| 2. Courant de court-circuit des générateurs (limité aux premières périodes) . . . . .                                                                                               | 6     |
| 3. Valeur maximale de crête possible du courant de court-circuit des générateurs . . . . .                                                                                          | 8     |
| 4. Contribution des moteurs au courant de court-circuit . . . . .                                                                                                                   | 10    |
| 5. Evaluation de la crête maximale possible du courant de court-circuit dans le cas de défaut près des barres principales . . . . .                                                 | 12    |
| 6. Evaluation du courant de court-circuit dans le cas de défaut éloigné des barres principales . . . . .                                                                            | 12    |
| 7. Choix de la valeur nominale de court-circuit des disjoncteurs conformément à la Publication 157-1 de la CEI, pour emploi dans les installations électriques de navires . . . . . | 14    |
| 8. Exemple d'un calcul de court-circuit . . . . .                                                                                                                                   | 24    |
| 8.1 Généralités . . . . .                                                                                                                                                           | 24    |
| 8.2 Courant de court-circuit des générateurs . . . . .                                                                                                                              | 24    |
| 8.3 Valeur de crête maximale possible du courant de court-circuit des générateurs . . . . .                                                                                         | 26    |
| 8.4 Courant de court-circuit des moteurs . . . . .                                                                                                                                  | 26    |
| 8.5 Evaluation du courant de court-circuit maximal dans le cas d'un défaut près des barres principales . . . . .                                                                    | 32    |
| 8.6 Evaluation du courant de court-circuit dans le cas d'un défaut éloigné des barres principales . . . . .                                                                         | 36    |
| 8.7 Contribution des moteurs aux points D et E . . . . .                                                                                                                            | 38    |
| SECTION DEUX — INSTALLATIONS A COURANT CONTINU                                                                                                                                      |       |
| 9. Liste des symboles littéraux principaux . . . . .                                                                                                                                | 44    |
| 9.1 Installation en général . . . . .                                                                                                                                               | 44    |
| 9.2 Machines . . . . .                                                                                                                                                              | 44    |
| 10. Court-circuit aux bornes du générateur c.c. . . . .                                                                                                                             | 46    |
| 10.1 Valeur de crête du courant de court-circuit . . . . .                                                                                                                          | 46    |
| 10.2 Valeurs du courant de court-circuit jusqu'à la valeur de crête . . . . .                                                                                                       | 46    |
| 11. Court-circuit aux bornes d'un moteur . . . . .                                                                                                                                  | 46    |
| 12. Court-circuit éloigné des bornes des machines électriques . . . . .                                                                                                             | 46    |
| 12.1 Valeur de crête du courant de court-circuit . . . . .                                                                                                                          | 46    |
| 12.2 Valeurs du courant de court-circuit jusqu'à la valeur de crête . . . . .                                                                                                       | 46    |
| 13. Court-circuit dans une installation . . . . .                                                                                                                                   | 46    |
| 14. Calcul au moyen de coefficients . . . . .                                                                                                                                       | 48    |
| 14.1 Court-circuit aux bornes d'un générateur ou d'un moteur . . . . .                                                                                                              | 48    |
| 14.2 Court-circuit loin des bornes des machines . . . . .                                                                                                                           | 48    |
| 15. Exemple de calcul . . . . .                                                                                                                                                     | 50    |
| 15.1 Données . . . . .                                                                                                                                                              | 50    |
| 15.2 Courant de court-circuit aux bornes du générateur au point A . . . . .                                                                                                         | 52    |
| 15.3 Court-circuit au point B . . . . .                                                                                                                                             | 52    |
| 15.4 Courant de court-circuit à un point quelconque de l'installation (C) loin des barres principales . . . . .                                                                     | 56    |

## CONTENTS

|                   | Page |
|-------------------|------|
| FOREWORD. . . . . | 5    |
| PREFACE. . . . .  | 5    |

### SECTION ONE — A.C. SYSTEMS

#### Clause

|                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Evaluation of the maximum short-circuit current and of the corresponding power factor in a system . . . . .                                     | 7  |
| 2. Short-circuit current of generators (limited to the first few cycles) . . . . .                                                                 | 7  |
| 3. Maximum possible peak value of the short-circuit current of generators . . . . .                                                                | 9  |
| 4. Short-circuit current of motors . . . . .                                                                                                       | 11 |
| 5. Evaluation of the maximum possible peak value of the short-circuit current in case of fault near the main busbars . . . . .                     | 13 |
| 6. Evaluation of the short-circuit current in case of fault remote from the main busbars . . . . .                                                 | 13 |
| 7. Choice of circuit-breakers of short-circuit rating conforming to IEC Publication 157-1, for application in electrical systems on ships. . . . . | 15 |
| 8. Example of a short-circuit calculation . . . . .                                                                                                | 25 |
| 8.1 General . . . . .                                                                                                                              | 25 |
| 8.2 Short-circuit current of the generators . . . . .                                                                                              | 25 |
| 8.3 Maximum possible peak value of the short-circuit current of the generators . . . . .                                                           | 27 |
| 8.4 Short-circuit current of motors . . . . .                                                                                                      | 27 |
| 8.5 Evaluation of the maximum value of the short-circuit current in case of fault near the main busbars . . . . .                                  | 33 |
| 8.6 Evaluation of the short-circuit current in case of fault remote from the main busbars . . . . .                                                | 37 |
| 8.7 Motor contribution in Points D and E . . . . .                                                                                                 | 39 |

### SECTION TWO — D.C. PLANTS

|                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 9. List of main letter symbols . . . . .                                                        | 45 |
| 9.1 Plants in general. . . . .                                                                  | 45 |
| 9.2 Machines. . . . .                                                                           | 45 |
| 10. Short-circuit at the terminals of a dynamo . . . . .                                        | 47 |
| 10.1 Short-circuit current peak value . . . . .                                                 | 47 |
| 10.2 Short-circuit current characteristics up to peak value . . . . .                           | 47 |
| 11. Short-circuit at the terminals of a motor. . . . .                                          | 47 |
| 12. Short-circuit far from the terminals of electrical machines . . . . .                       | 47 |
| 12.1 Short-circuit current peak value . . . . .                                                 | 47 |
| 12.2 Short-circuit current characteristics up to peak value . . . . .                           | 47 |
| 13. Short-circuit in an installation . . . . .                                                  | 47 |
| 14. Calculation by means of coefficients. . . . .                                               | 49 |
| 14.1 Short-circuit at the terminals of a generator or of a motor . . . . .                      | 49 |
| 14.2 Short-circuit far from the machine terminals . . . . .                                     | 49 |
| 15. Example of calculation . . . . .                                                            | 51 |
| 15.1 Data . . . . .                                                                             | 51 |
| 15.2 Short-circuit current on the d.c. generator terminals at Point A . . . . .                 | 53 |
| 15.3 Short-circuit at Point B . . . . .                                                         | 53 |
| 15.4 Short-circuit current at any point of the installation (C) far from main busbars . . . . . | 57 |

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**ÉVALUATION DU COURANT DE COURT-CIRCUIT  
PARTICULIÈREMENT EN CE QUI CONCERNE LA CAPACITÉ NOMINALE  
DES DISJONCTEURS AU COURT-CIRCUIT DANS LES INSTALLATIONS  
ÉLECTRIQUES A BORD DES NAVIRES**

PRÉAMBULE

- 1) Les décisions ou accords officiels de la CEI en ce qui concerne les questions techniques, préparés par des Comités d'Etudes où sont représentés tous les Comités nationaux s'intéressant à ces questions, expriment dans la plus grande mesure possible un accord international sur les sujets examinés.
- 2) Ces décisions constituent des recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux.
- 3) Dans le but d'encourager cette unification internationale, la CEI exprime le vœu que tous les Comités nationaux ne possédant pas encore de règles nationales, lorsqu'ils préparent ces règles, prennent comme base fondamentale de ces règles les recommandations de la CEI dans la mesure où les conditions nationales le permettent.
- 4) On reconnaît qu'il est désirable que l'accord international sur ces questions soit suivi d'un effort pour harmoniser les règles nationales de normalisation avec ces recommandations dans la mesure où les conditions nationales le permettent. Les Comités nationaux s'engagent à user de leur influence dans ce but.

PRÉFACE

Le présent rapport a été établi par le Comité d'Etudes N°18 de la CEI: Installations électriques à bord des navires.

Des projets furent discutés lors des réunions tenues à Leningrad en 1966 et à Opatija en 1968. A la suite de cette dernière réunion, un projet fut soumis à l'approbation des Comités nationaux suivant la Règle des Six Mois en juin 1969.

Les pays suivants se sont prononcés explicitement en faveur de la publication:

Australie  
Belgique  
Israël  
Italie  
Norvège  
Pays-Bas

Pologne  
Royaume-Uni  
Suède  
Turquie  
Union des Républiques  
Socialistes Soviétiques

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**SHORT-CIRCUIT CURRENT EVALUATION  
WITH SPECIAL REGARD TO RATED SHORT-CIRCUIT CAPACITY OF  
CIRCUIT-BREAKERS IN INSTALLATIONS IN SHIPS**

FOREWORD

- 1) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, prepared by Technical Committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.
- 2) They have the form of recommendations for international use and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 3) In order to promote this international unification, the IEC expresses the wish that all National Committees having as yet no national rules, when preparing such rules, should use the IEC recommendations as the fundamental basis for these rules in so far as national conditions will permit.
- 4) The desirability is recognized of extending international agreement on these matters through an endeavour to harmonize national standardization rules with these recommendations in so far as national conditions will permit. The National Committees pledge their influence towards that end.

PREFACE

This Report has been prepared by IEC Technical Committee No. 18, Electrical Installations in Ships.

Drafts were discussed at the meetings held in Leningrad in 1966 and in Opatija in 1968. As a result of this latter meeting, a draft was submitted to the National Committees for approval under the Six Months' Rule in June 1969.

The following countries voted explicitly in favour of publication:

Australia  
Belgium  
Israel  
Italy  
Netherlands  
Norway

Poland  
Sweden  
Turkey  
United Kingdom  
Union of Soviet  
Socialist Republics

## ÉVALUATION DU COURANT DE COURT-CIRCUIT PARTICULIÈREMENT EN CE QUI CONCERNE LA CAPACITÉ NOMINALE DES DISJONCTEURS AU COURT-CIRCUIT DANS LES INSTALLATIONS ÉLECTRIQUES A BORD DES NAVIRES

### SECTION UN — INSTALLATIONS A COURANT ALTERNATIF

Cette section a pour but d'indiquer les différences essentielles entre les caractéristiques du circuit qu'on prend comme base pour la détermination des caractéristiques en court-circuit des disjoncteurs selon la Publication 157-1 de la CEI : Appareillage de distribution à basse tension, Première partie : Disjoncteurs, et celles qui sont particulières aux installations électriques à bord des navires.

On devra calculer les courants de court-circuit à chaque point de l'installation où on placera des appareils de protection.

#### 1. Évaluation du courant de court-circuit maximal d'une installation et du facteur de puissance correspondant

Le courant de court-circuit est maximal quand le défaut se produit le plus près possible des barres omnibus principales. On considère alors la résistance comme négligeable, l'impédance étant prise égale à la réactance des machines tournantes connectées.

Au contraire, pour évaluer le facteur de puissance, il est nécessaire de tenir compte de la résistance du circuit affecté par le défaut, c'est-à-dire la résistance des machines aussi bien que celle des éléments de circuits (connexions, interrupteurs, etc.) en série.

*Note.* — On ne doit tenir compte ni de la résistance, ni de la réactance du disjoncteur qu'on doit installer en un point donné, c'est une conséquence de la définition du courant de court-circuit présumé en ce point (en ce qui concerne l'appareil de coupure à y placer).

Les réactances des machines tournantes ne peuvent pas être considérées comme constantes pendant un court-circuit.

#### 2. Courant de court-circuit des générateurs (limité aux premières périodes)

On appelle courant de court-circuit subtransitoire  $I''$ , la valeur efficace de la composante alternative du courant de court-circuit extrapolé au temps zéro (début de court-circuit) par l'enveloppe des ondes de courant (figure 1, page 18).

Quand le court-circuit se produit sur le générateur à vide sous la tension nominale  $V_N$ , le courant de court-circuit subtransitoire  $I''_{\text{vide}}$  est donné par l'équation :

$$I''_{\text{vide}} = \frac{V_N}{X''_d} = \left( \frac{1}{x''_d} \right) I_N \quad (1)$$

où :

$X''_d$  = réactance directe subtransitoire du générateur,

$x''_d$  = même réactance, exprimée en pour-cent,

$I_N$  = courant nominal du générateur

## SHORT-CIRCUIT CURRENT EVALUATION WITH SPECIAL REGARD TO RATED SHORT-CIRCUIT CAPACITY OF CIRCUIT-BREAKERS IN INSTALLATIONS IN SHIPS

### SECTION ONE — A.C. SYSTEMS

The aim of this section is to point out the essential differences between the circuit conditions assumed as a basis for the short-circuit rating of circuit-breakers according to IEC Publication 157-1, Low-voltage distribution switchgear, Part 1 : Circuit-breakers, and those peculiar to electrical systems in ships.

Calculations of short-circuit currents should be made at each point in the system where protective devices are fitted.

#### 1. Evaluation of the maximum short-circuit current and of the corresponding power factor in a system

For the evaluation of the maximum short-circuit current in a system, i.e., in case of fault occurring in close proximity to the main busbars, the short-circuit impedance can be assumed generally to coincide with the reactance of the rotating machinery connected in the system, the resistance being regarded as negligible.

For evaluating the short-circuit power factor it is necessary, on the contrary, to take into account the resistance of the circuit affected by the fault, i.e., the resistance of the machinery as well as of any circuit element (connections, switchgear, etc.), in series.

*Note.* — Attention is drawn to the fact that the reactance and resistance of the circuit-breaker to be installed in a given point shall not be considered, according to the definition of prospective short-circuit current of a circuit (with respect to a switching device situated therein).

The reactances of rotating machinery cannot be regarded as constant during the short-circuit.

#### 2. Short-circuit current of generators (limited to the first few cycles)

The root mean square (r.m.s.) value of the a.c. component of the short-circuit current of a generator, extrapolated at time zero (instant of initiation) by the envelope of the current waves, is indicated as sub-transient short-circuit current  $I''$ . (See Figure 1, page 19.)

When the short-circuit occurs on the generator off-load at rated voltage  $V_N$ , the sub-transient short-circuit current  $I''_{no\ load}$  is given by the equation :

$$I''_{no\ load} = \frac{V_N}{X''_d} = \left( \frac{1}{x''_d} \right) I_N \quad (1)$$

where :

$X''_d$  = the direct axis sub-transient reactance of the generator,

$x''_d$  = the same reactance expressed in percent,

$I_N$  = the rated current of the generator.

Quand le court-circuit se produit, le générateur fournissant sa charge nominale (tension, courant et facteur de puissance nominaux), on peut obtenir le courant de court-circuit subtransitoire  $I''_{ch}$  en multipliant  $I''_{vide}$  par un facteur approprié dépendant des caractéristiques de la machine, auquel on donne la valeur de 1,1 si l'on manque d'informations précises pour le déterminer (voir également article 5).

La valeur efficace de la composante alternative du courant de court-circuit d'un générateur décroît à un taux qui diminue après les premiers cycles de courant ; cet intervalle de temps correspond au phénomène subtransitoire (figure 1, page 18).

Le courant de court-circuit transitoire  $I'$  est la valeur efficace de la composante alternative du courant après l'extinction du phénomène subtransitoire, mais extrapolée au temps zéro (figure 1).

Quand le court-circuit se produit, le générateur étant à vide à sa tension nominale  $V_N$ , le courant de court-circuit transitoire  $I'_{vide}$  est donné par l'équation :

$$I'_{vide} = \frac{V_N}{X'_d} = \left( \frac{1}{x'_d} \right) I_N \quad (2)$$

où :

$X'_d$  = réactance directe transitoire du générateur

$x'_d$  = même réactance, exprimée en pour-cent

$I_N$  = courant nominal du générateur

Quand le court-circuit se produit, le générateur fournissant sa charge nominale (tension, courant et facteur de puissance nominaux), on peut obtenir le courant de court-circuit transitoire  $I'_{ch}$  en multipliant  $I'_{vide}$  par un facteur comme dans le cas du courant de court-circuit subtransitoire, auquel on donne la valeur de 1,1 si l'on manque d'informations précises pour le déterminer (voir également article 5).

La constante de temps subtransitoire  $T''_d$  est la constante de temps de la décroissance exponentielle de l'amplitude de la valeur efficace de la composante alternative du courant de court-circuit pendant le phénomène subtransitoire ; on a de même  $T'_d$  pendant le phénomène transitoire (figure 1).

La première de ces valeurs  $T''_d$  est d'importance primordiale pour l'évaluation des courants de court-circuit dans les installations et la détermination du pouvoir de court-circuit des disjoncteurs devant y être installés.

Sans erreur appréciable, la valeur efficace durant les quelques premiers cycles est donnée par la formule :

$$I_{ac} = (I'' - I') e^{-t/T''_d} + I' \quad (3)$$

### 3. Valeur maximale de crête possible du courant de court-circuit des générateurs

La valeur maximale de crête possible correspond à la présence, pour une composante alternative donnée, de la composante aperiodique maximale possible. La valeur maximale de crête possible,  $I_{crête\ max}$ , du courant de court-circuit (valeur instantanée) dépend du courant subtransitoire  $I''$  (extrapolation au temps zéro de la valeur efficace de la composante alternative), du rapport  $x'_d/x''_d$  et de la constante de temps subtransitoire  $T''_d$  qui déterminent la diminution de la composante alternative durant l'intervalle de temps requis par le courant asymétrique de court-circuit pour atteindre sa valeur maximale de crête ; de plus, elle dépend du facteur de puissance du court-circuit qui détermine la diminution de la composante aperiodique pendant la même durée, avec la constante de temps  $T_{dc}$ .

La valeur de crête maximale peut être calculée avec la même formule que celle donnée pour la valeur efficace, en notant que la valeur efficace établie pour  $I_{ac}$  doit être multipliée par  $\sqrt{2}$  tandis que la composante aperiodique extrapolée au temps zéro a la valeur  $I'' \sqrt{2}$ .

When the short-circuit occurs on the generator at rated load, i.e., at rated voltage with rated current and rated power factor, the sub-transient short-circuit current  $I''_{\text{rated load}}$  can be obtained from the above sub-transient short-circuit current  $I''_{\text{no load}}$  by an appropriate multiplying factor based on the characteristics of the machine. When precise information is lacking, this multiplying factor can be chosen at a value of 1.1 (see also Clause 5).

The r.m.s. value of the a.c. component of the short-circuit current of a generator decreases at a rate, which becomes less after the first cycles of current, this time interval corresponding to the sub-transient phenomenon. (See Figure 1, page 19.)

The r.m.s. value of the a.c. component of the current, after the sub-transient phenomenon is extinguished, but extrapolated to time zero (see Figure 1), is indicated as transient short-circuit current  $I'$ .

When the short-circuit occurs on the generator off-load at rated voltage  $V_N$ , the transient short-circuit current  $I'_{\text{no load}}$  is given by the equation :

$$I'_{\text{no load}} = \frac{V_N}{X'_d} = \left( \frac{1}{x'_d} \right) I_N \quad (2)$$

where :

$X'_d$  = the direct axis transient reactance of the generator

$x'_d$  = the same reactance expressed in per cent

$I_N$  = the rated current of the generator

When the short-circuit occurs on the generator at rated load, i.e., at rated voltage with rated current and rated power factor, the transient short-circuit current  $I'_{\text{rated load}}$  can be obtained from the above transient short-circuit current  $I'_{\text{no load}}$  by an appropriate multiplying factor, as for the sub-transient short-circuit current. When precise information is lacking, this multiplying factor can be chosen at a value of 1.1 (see also Clause 5).

The time constant of the exponential decrease of the amplitude of the a.c. component of the short-circuit current, during the sub-transient phenomenon, is the sub-transient time constant  $T''_d$  (see Figure 1); the time constant of the transient phenomenon is the transient time constant  $T'_d$ .

The first of these time constants  $T''_d$ , is of prime interest in considering the short-circuit currents in the systems related to the short-circuit rating of the circuit-breakers to be installed therein.

The r.m.s. value during the first few cycles can be obtained from :

$$I_{ac} = (I'' - I') e^{-t/T''_d} + I' \quad (3)$$

without appreciable error.

### 3. Maximum possible peak value of the short-circuit current of generators

The maximum possible peak value of the current corresponds to the presence of the maximum possible d.c. component for a given a.c. component. The maximum possible peak value  $I_{\text{peak max}}$  of the short-circuit current (instantaneous value) is related to the sub-transient current  $I''$  (r.m.s. value of the a.c. component extrapolated at time zero). It also depends upon the ratio  $x'_d/x''_d$  and upon the sub-transient time constant  $T''_d$ , which determine the decrease of the a.c. component during the time interval required by the asymmetrical short-circuit current to reach its maximum peak value, and moreover, upon the short-circuit power factor, which determines the decrease of the d.c. component during the same time interval with the time constant  $T_{dc}$ .

The maximum possible peak value can be calculated with the same formula given for the r.m.s. value taking into account that the r.m.s. value stated for  $I_{ac}$  must be multiplied by  $\sqrt{2}$  whereas the d.c. component extrapolated at time zero has a value of  $I'' \sqrt{2}$ .

La formule suivante peut être utilisée pour déterminer cette valeur de crête maximale, ce qui est supposé avoir lieu pendant le temps  $t = \frac{1}{2} T$ ,  $T$  étant la durée d'un cycle.

$$I_{\text{crête max}} = \sqrt{2} [(I'' - I') e^{-T/2T_d''} + I'] + \sqrt{2} I'' e^{-T/2T_{dc}} \quad (4)$$

Au lieu de calculer  $I_{\text{crête}}$  avec cette formule, des graphiques peuvent être utilisés. Les figures 2, 3 et 4 (pages 22 et 23) montrent, en fonction de  $x_d'/x_d''$ , le facteur par lequel on doit multiplier  $I''$  pour avoir  $I_{\text{crête max}}$ , pour différentes valeurs de  $T_d''$  et du facteur de puissance du court-circuit. Ces diagrammes se réfèrent à  $I''_{\text{vide}}$ , c'est-à-dire au générateur à vide juste avant le court-circuit (voir article 5). Les figures 2a, 3a et 4a (page 22) sont pour une fréquence de 50 Hz, les figures 2b, 3b et 4b (page 23) sont pour 60 Hz.

#### 4. Contribution des moteurs au courant de court-circuit

Comme la réactance des moteurs connectés au système influe sur le calcul de l'impédance équivalente de court-circuit, la contribution de ces moteurs au courant de court-circuit réel doit être évaluée comme pour les générateurs.

##### 4.1 Pour les moteurs à induction, on doit noter que :

- Ils ne donnent pas de courant de court-circuit durable : le courant de court-circuit disparaît à la fin du phénomène transitoire.
- La force contre-électromotrice des moteurs (c'est-à-dire la tension qui est à l'origine de la contribution des moteurs au courant de défaut) est plus faible que la tension en ligne (tension nominale de l'installation) et a la valeur la plus faible quand les moteurs fournissent leur charge nominale (la surcharge n'est pas considérée comme un service normal).

##### 4.2 En l'absence d'information plus précise, on peut supposer en première approximation que la contribution des moteurs peut être assimilée à celle d'un moteur unique connecté aux barres principales avec une puissance nominale égale à la somme de celles des moteurs simultanément en service.

##### 4.2.1 La valeur efficace de la composante alternative $I_M''$ du courant de court-circuit provenant de ce moteur, fonctionnant à vide sous tension nominale, extrapolé au temps zéro (début du court-circuit) est :

$$I_M'' = 6,25 I_N \quad (5a)$$

ou :

$I_N$  = courant nominal du moteur

Des conditions de charge différentes de zéro entraînent de plus faibles valeurs de  $I_M''$ .

##### 4.2.2 La décroissance de la composante alternative $I_M''$ du courant de court-circuit correspond, en fonction du temps, aux valeurs efficaces ci-dessous :

| Temps (en cycles) après le début du court-circuit | Composante alternative du courant de court-circuit $I_{M(t)}$ |
|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 1                                                 | $I_{M(t)} = 2,5 I_N$                                          |
| 2                                                 | $I_{M(2T)} = I_N$                                             |

(5b)

(5c)

The following formula may be used for determining the maximum peak value which is assumed to occur at time  $t = \frac{1}{2} T$ ,  $T$  being the time of one cycle.

$$I_{\text{peak max}} = \sqrt{2} [(I'' - I') e^{-T/2T_d''} + I'] + \sqrt{2} I'' e^{-T/2T_{dc}} \quad (4)$$

Instead of calculating  $I_{\text{peak}}$  with this formula, diagrams may be used. Figures 2, 3 and 4 (pages 22 and 23) show, as functions of the ratio  $x_d'/x_d''$ , the multiplying factors by which  $I_{\text{peak max}}$  can be obtained from  $I''$ , for different values of  $T_d''$  and for different values of the short-circuit power factor. These diagrams are referred to conditions of no load for the generator before the occurrence of the short-circuit, i.e., to the current  $I''_{\text{no load}}$  (see Clause 5). The Figures 2a, 3a and 4a (page 22) are for a frequency of 50 Hz; the figures 2b, 3b and 4b (page 23) are for 60 Hz.

#### 4. Short-circuit current of motors

As the reactances of motors connected in the system are significant in determining the short-circuit equivalent impedance, the contribution of these motors to the actual short-circuit current should be evaluated in the same way as for generators.

##### 4.1 For induction motors, account should be taken of the fact that:

- There is no sustained short-circuit current supplied by the motors, because of the extinction of the short-circuit current at the end of the transient phenomenon.
- The internal voltage of the motors, i.e., the voltage supplying the current contribution of the motors at the short-circuit fault, is less than the line voltage (rated voltage of the system) and it has the lowest value when the motors are running at rated load (overload not being considered as normal service condition).

##### 4.2 When more precise information is lacking, it can be assumed as a first approximation that the contribution of motors is that of one motor only, directly connected to main busbars, with a rated power equal to the sum of rated powers of all the motors which may be running simultaneously in service.

##### 4.2.1 The r.m.s. value of the a.c. component $I_M''$ of the short-circuit current arising from this motor (running at rated voltage and no load) extrapolated at time zero (initiation of the short-circuit), is:

$$I_M'' = 6.25 I_N \quad (5a)$$

where:

$I_N$  = the rated current of this motor

Conditions of load different from zero lead to lower values for  $I_M''$ .

##### 4.2.2 The decrease of the a.c. component $I_M''$ of the short-circuit current due to this motor is such as to correspond to the following r.m.s. values as a function of time:

| Time (in cycles) after the instant of short-circuit initiation | A.C. component of the short-circuit current $I_{M(t)}$ |
|----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 1                                                              | $I_{M(t)} = 2.5 I_N$                                   |
| 2                                                              | $I_{M(2T)} = I_N$                                      |

(5b)

(5c)

- 4.2.3 Le facteur de puissance du courant de court-circuit  $I_M$  dû aux moteurs à induction, c'est-à-dire le cosinus de l'angle entre la force contre-électromotrice et le courant de court-circuit, n'est pas inférieur à 0,3. La pointe maximale possible du courant de court-circuit ne peut donc pas dépasser :

$$I_{M \text{ crête max}} = 8 I_N \quad (6)$$

Pour de gros moteurs, l'approximation ci-dessus peut n'être pas convenable et un calcul précis peut s'avérer nécessaire en partant des données suivantes :

$P_n$  = puissance nominale, en kVA

$Z_b$  = impédance du moteur avec rotor bloqué ( $z_b$ , exprimée en pour-cent)

$X_b$  = réactance du moteur avec rotor bloqué ( $x_b$ , exprimée en pour-cent)

$R_r$  = résistance du rotor ( $r_r$ , exprimée en pour-cent)

$R_s$  = résistance du stator ( $r_s$ , exprimée en pour-cent)

$$\text{constante de temps, en secondes : } T' = \frac{X_b}{2 \pi f r_r} \quad (7)$$

$$\text{constante de temps de la composante aperiodique : } T_{dc} = \frac{X_b}{2 \pi f r_s} \quad (8)$$

Le courant de court-circuit aux bornes d'un moteur est exprimé par les formules :

$$\text{Composante alternative : } I_{ac} = \frac{V_N}{Z_b} e^{-t/T'} \quad (9)$$

$$\text{Composante aperiodique : } I_{dc} = \sqrt{2} \frac{V_N}{Z_b} e^{-t/T_{dc}} \quad (10)$$

Tandis que le courant de pointe au temps  $t = \frac{1}{2} T$  est obtenu par la formule :

$$I_{pr} = \sqrt{2} \frac{V_N}{Z_b} e^{-T/2 T'} + \sqrt{2} \frac{V_N}{Z_b} e^{-T/2 T_{dc}} \quad (11)$$

## 5. Evaluation de la crête maximale possible du courant de court-circuit dans le cas de défaut près des barres principales

L'évaluation de la crête maximale possible du courant de court-circuit est généralement obtenue en combinant la contribution des générateurs et des moteurs connectés à l'installation, en supposant que les impédances en série, autres que les impédances internes aux machines, sont négligeables.

Pour la valeur maximale de crête possible, il n'est pas requis d'appliquer le facteur multiplicateur comme à l'article 2.

On admet généralement de se référer aux générateurs à vide et d'évaluer la valeur de crête maximale qui en résulte en faisant la somme arithmétique des valeurs de crête obtenues séparément pour les générateurs (article 3) et les moteurs (article 4).

Ceci est justifié si on considère que la valeur de crête du courant de court-circuit total (maximum possible) croît moins vite que la composante alternative du court-circuit et ceci bien que le courant de court-circuit d'un générateur croisse dans les conditions de charge normale (facteur de puissance arrière) du fait de l'augmentation de l'excitation. Cela provient de ce que la composante aperiodique est différente. De plus, la contribution des moteurs est réduite lorsqu'ils sont en charge.

## 6. Evaluation du courant de court-circuit dans le cas de défaut éloigné des barres principales

Dans ce cas, toutes les impédances entre le défaut et le tableau principal doivent être prises en compte.

- 4.2.3 The power factor of the short-circuit current  $I_M$  due to induction motors, i.e., the cosine of the angle between the internal voltage and the short-circuit current, is not less than 0.3. The maximum possible peak value of this short-circuit current cannot therefore exceed the value :

$$I_{M \text{ peak max}} = 8 I_N \quad (6)$$

For large motors, the above approximation may not be adequate and precise calculation may be necessary using the following information :

$P_n$  = rated power, in kVA

$Z_b$  = impedance of the motor with rotor locked ( $z_b$  in per cent)

$X_b$  = reactance of the motor with rotor locked ( $x_b$  in per cent)

$R_r$  = rotor resistance ( $r_r$  in per cent)

$R_s$  = stator resistance ( $r_s$  in per cent)

$$\text{transient time constant, in seconds: } T' = \frac{x_b}{2 \pi f r_r} \quad (7)$$

$$\text{time constant of the d.c. component: } T_{dc} = \frac{x_b}{2 \pi f r_s} \quad (8)$$

The short-circuit current at the terminals of a motor is expressed by the formulae :

$$\text{A.C. component: } I_{ac} = \frac{V_N}{Z_b} e^{-t/T'} \quad (9)$$

$$\text{D.C. component: } I_{dc} = \sqrt{2} \frac{V_N}{Z_b} e^{-t/T_{dc}} \quad (10)$$

While the peak current at time  $t = \frac{1}{2} T$  is obtained by the formula :

$$I_{pr} = \sqrt{2} \frac{V_N}{Z_b} e^{-T/2 T'} + \sqrt{2} \frac{V_N}{Z_b} e^{-T/2 T_{dc}} \quad (11)$$

## 5. Evaluation of the maximum possible peak value of the short-circuit current in case of fault near the main busbars

The maximum possible peak value of the short-circuit current is generally obtained by combining the contributions of generators and motors connected in the system, assuming that impedances in series, other than those inherent in the machines, are negligible.

For the maximum possible peak value, it is not required to apply the multiplying factor as under Clause 2.

It can be generally accepted to refer to generators off load and to evaluate the maximum resulting peak value by the arithmetical sum of the peak values separately evaluated for the generator(s) (see Clause 3) and for the motors (see Clause 4).

This is justified by considering that, although the short-circuit current of a generator increases with loading under normal conditions (power factor lagging) in consequence of the increased internal voltage, on the other hand, the peak value of the total short-circuit current (maximum possible) does not increase by the same ratio of the a.c. component of the short-circuit current, but less. This effect depends on the fact that the conditions of the d.c. component are different. Moreover, the contribution of motors is reduced when motors are on load.

## 6. Evaluation of the short-circuit current in case of fault remote from the main busbars

When the point of fault is remote from the main switchboard, all external impedances between the main switchboard and the point of fault are to be taken into account.

L'effet de ces impédances sur le courant de court-circuit venant des générateurs correspond aux formules suivantes :

$$\begin{aligned} \text{impédance subtransitoire : } Z_e'' &= (R_s + R_e) + j(X_d'' + X_e) \text{ en pour-cent} \\ z_e'' &= (r_s + r_e) + j(x_d'' + x_e) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{impédance transitoire : } Z_e' &= (R_s + R_e) + j(X_d' + X_e) \text{ en pour-cent} \\ z_e' &= (r_s + r_e) + j(x_d' + x_e) \end{aligned} \quad (13)$$

$Z_e''$  resp.  $Z_e'$  = impédances externes ( $z_e'$  resp.  $z_e''$  en pour-cent) pendant les premiers cycles où :

$R_s$  = résistance du stator ( $r_s$  en pour-cent)

$R_e$  = résistance extérieure ; câbles, barres, etc. ( $r_e$  en pour-cent)

$X_e$  = réactance extérieure ( $x_e$  en pour-cent)

et, en ce qui concerne les constantes de temps :

$$\text{subtransitoire, en secondes : } T_e'' = T_d'' \left[ \frac{1 + (x_e/x'')}{1 + (x_e/x')} \right] \quad (14)$$

$$\text{composante apériodique, en secondes : } T_{eac} = \frac{T_{dc} + (x_e/2\pi f R_s)}{1 + (R_e/R_s)} \quad (15)$$

Puisqu'on ne considère dans ce rapport que les tout premiers cycles, la variation due à la constante de temps transitoire peut être négligée.

Des formules correspondantes sont utilisées pour les moteurs. En général, il n'est pas nécessaire de tenir compte de la contribution des moteurs éloignés du point de défaut.

On peut obtenir de la même manière que dans les articles 2 et 3, les valeurs du courant de court-circuit :

$$I_{ac} = (I_e'' - I_e') e^{-t/T_e''} + I_e' \quad (16)$$

$$I_{crête \max} = \sqrt{2} [(I_e'' - I_e') e^{-T/2 T_e''} + I_e'] + \sqrt{2} I_e' e^{-T/2 T_{eac}} \quad (17)$$

où :

$$I_e'' = V_N / Z_e'' \quad (18)$$

$$I_e' = V_N / Z_e' \quad (19)$$

## 7. Choix de la valeur nominale de court-circuit des disjoncteurs conformément à la Publication 157-1 de la CEI, pour emploi dans les installations électriques de navires

La valeur de la crête maximale possible du courant de court-circuit présumé au point de branchement d'un disjoncteur détermine le pouvoir nominal de fermeture requis pour le disjoncteur lui-même.

Le pouvoir nominal de coupure correspondant (conformément à la Publication 157-1 de la CEI) est obtenu en appliquant le tableau I suivant, dans lequel la relation entre le pouvoir nominal de coupure et de fermeture est donnée (le tableau I est extrait du tableau I, paragraphe 4.3.4 de la Publication 157-1 de la CEI).

TABLEAU I

| Pouvoir nominal de coupure<br>A | Facteur de multiplication pour l'obtention<br>du pouvoir nominal de fermeture |
|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| ≤ 10 000                        | 1,7                                                                           |
| 10 001-20 000                   | 2,0                                                                           |
| 20 001-50 000                   | 2,1                                                                           |
| > 50 000                        | 2,2                                                                           |

The effect of such impedances on the short-circuit current arising from generators corresponds to the formulae :

$$\begin{aligned} \text{sub-transient impedance : } Z_e'' &= (R_s + R_e) + j(X_d'' + X_e) \text{ in per cent} \\ z_e'' &= (r_s + r_e) + j(x_d'' + x_e) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{transient impedance : } Z_e' &= (R_s + R_e) + j(X_d' + X_e) \text{ in per cent} \\ z_e' &= (r_s + r_e) + j(x_d' + x_e) \end{aligned} \quad (13)$$

$Z_e''$  resp.  $Z_e'$  = external impedances ( $z_e''$  resp.  $z_e'$  in per cent) during the first cycles.

where :

$R_s$  = stator resistance ( $r_s$  in per cent),

$R_e$  = external resistance ; cables, busbars, etc. ( $r_e$  in per cent),

$X_e$  = external reactance ( $x_e$  in per cent)

and as regards the time constants :

$$\text{sub-transient time constant, in seconds : } T_e'' = T_d'' \left[ \frac{1 + (x_e/x'')}{1 + (x_e/x')} \right] \quad (14)$$

$$\text{time constant of the d.c. component, in seconds : } T_{e_{dc}} = \frac{T_{dc} + (x_e/2\pi f R_s)}{1 + (R_e/R_s)} \quad (15)$$

Due to the fact that only the first few cycles are considered in this Report, the variation according to the transient time constant may be neglected.

Corresponding formulae are used for motors. In general, it is not necessary to take into account the contribution of motors remote from the point of fault.

The values of short-circuit current can be obtained in the same way as given in Clauses 2 and 3 from :

$$I_{ac} = (I_e'' - I_e') e^{-t/T_e''} + I_e' \quad (16)$$

$$I_{\text{peak max}} = \sqrt{2} [(I_e'' - I_e') e^{-T/2 T_e''} + I_e'] + \sqrt{2} I_e'' e^{-T/2 T_{e_{dc}}} \quad (17)$$

where :

$$I_e'' = V_N / Z_e'' \quad (18)$$

$$I_e' = V_N / Z_e' \quad (19)$$

## 7. Choice of circuit-breakers of short-circuit rating conforming to IEC Publication 157-1, for application in electrical systems on ships

The evaluation of the maximum possible peak value of the prospective short-circuit current at the point of application of a circuit-breaker identifies the rated short-circuit making capacity required for the circuit-breaker itself.

The correlated rated short-circuit breaking capacity (if the rating conforms to IEC Publication 157-1) can be obtained by applying the following Table I where the relationship between rated short-circuit breaking and making capacity is given (Table I is taken from Table I, Sub-clause 4.3.4 of IEC Publication 157-1).

TABLE I

| Rated short-circuit breaking capacity<br>A | Multiplying factor for obtaining rated<br>short-circuit making capacity |
|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| ≤ 10 000                                   | 1.7                                                                     |
| 10 001-20 000                              | 2.0                                                                     |
| 20 001-50 000                              | 2.1                                                                     |
| > 50 000                                   | 2.2                                                                     |

La relation ci-dessus entre le pouvoir nominal de coupure et le pouvoir nominal de fermeture est basée sur :

- les valeurs spécifiées ci-dessous pour le facteur de puissance ;
- la supposition que la valeur efficace de la composante alternative du courant de court-circuit se maintient constante durant le court-circuit.

En raison de cette supposition, le pouvoir de coupure nominal d'un disjoncteur ainsi choisi d'après son pouvoir de fermeture est convenable ; il devient surabondant si la composante alternative du courant réel de court-circuit est modifiée par un décrement non nul, pourvu que le facteur de puissance du court-circuit nominal du disjoncteur n'excède pas le facteur de puissance évalué au point d'application.

Il faut noter que le court-circuit nominal selon la Publication 157-1 de la CEI est basé sur des valeurs du facteur de puissance du court-circuit au moins égales aux limites données dans le tableau II (d'après le tableau VII du paragraphe 8.2.4.5 de la Publication 157-1 de la CEI).

TABLEAU II

| Pouvoir de coupure nominal<br>sur court-circuit<br>A | Limite inférieure du facteur<br>de puissance |
|------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| $\leq 10\ 000$                                       | 0,5                                          |
| 10 001-20 000                                        | 0,3                                          |
| 20 001-50 000                                        | 0,25                                         |
| $> 50\ 000$                                          | 0,2                                          |

Si le facteur de puissance calculé d'une installation est nettement plus faible que celui de la Publication 157-1 de la CEI pour le même court-circuit nominal, on demandera au fournisseur de fixer lui-même le pouvoir de coupure nominal du disjoncteur considéré.

Pratiquement, on demandera seulement au fournisseur de présenter un rapport d'essai de son disjoncteur essayé avec le facteur de puissance inférieur à celui stipulé dans la Publication 157-1 de la CEI et sans changement du pouvoir de fermeture.

Le courant présumé pour cet essai sera obtenu en multipliant le pouvoir de fermeture par un facteur correspondant au facteur de puissance du court-circuit prévu.

Le tableau III ci-après donne le facteur multiplicateur en fonction du facteur de puissance du court-circuit.

TABLEAU III

| Facteurs de puissance<br>(inférieurs à ceux de la Publication 157-1<br>de la CEI) | Facteurs multiplicateurs<br>(à appliquer au pouvoir de fermeture<br>pour obtenir le pouvoir de coupure<br>(composante alternative constante)) |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0,15                                                                              | 1/2,30                                                                                                                                        |
| 0,10                                                                              | 1/2,45                                                                                                                                        |
| 0,05                                                                              | 1/2,62                                                                                                                                        |

Le courant obtenu définit le nouveau pouvoir de coupure du disjoncteur avec le nouveau facteur de puissance. La composante alternative de ce courant ne sera affectée d'aucun décrement, selon les hypothèses faites dans la Publication 157-1 de la CEI.

The relationship between rated short-circuit breaking capacity and rated short-circuit making capacity is based :

- on the figures specified below for the short-circuit power factor ;
- on the assumption that the a.c. component of the short-circuit current maintains constant its r.m.s. value during the short-circuit.

As a consequence of this assumption, the rated breaking capacity of a circuit-breaker chosen on the basis of the required making capacity at the point of its actual installation will, therefore, be adequate ; or in excess, if the a.c. component of the actual short-circuit current is affected by a decrement different from zero, provided that the power factor of the short-circuit rating of the circuit-breaker does not exceed the short-circuit power factor evaluated for the point of actual application.

Attention is drawn to the fact that the short-circuit rating according to IEC Publication 157-1 is based on values of short-circuit power factors not less than the limits specified in Table II (from Table VII, Sub-clause 8.2.4.5 of IEC Publication 157-1).

TABLE II

| Rated short-circuit breaking capacity<br>A | Short-circuit power factor not less than |
|--------------------------------------------|------------------------------------------|
| ≤ 10 000                                   | 0.5                                      |
| 10 001-20 000                              | 0.3                                      |
| 20 001-50 000                              | 0.25                                     |
| > 50 000                                   | 0.2                                      |

In cases where the short-circuit power factor evaluated for a system is substantially less than that assumed in the short-circuit rating of a circuit-breaker conforming to IEC Publication 157-1, the manufacturer shall be asked to declare the rating he will assign to his circuit-breaker with a short-circuit power factor sufficiently less than that of IEC Publication 157-1.

In many practical cases, the manufacturer may be asked to produce only a test report of his circuit-breaker tested with the required short-circuit power factor less than that prescribed in IEC Publication 157-1, and with unaltered making capacity.

The prospective current of such a test shall be obtained from the value of the making capacity by the multiplying factor corresponding to the required short-circuit power factor.

The following Table III gives the multiplying factors as functions of the short-circuit power factors.

TABLE III

| Short-circuit power factors<br>(less than those of IEC Publication 157-1) | Multiplying factors (for obtaining the correlated breaking capacity from the required making capacity, under the assumption of a.c. component constant) |
|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0.15                                                                      | 1/2.30                                                                                                                                                  |
| 0.10                                                                      | 1/2.45                                                                                                                                                  |
| 0.05                                                                      | 1/2.62                                                                                                                                                  |

This prospective current identifies the new breaking capacity to be assigned to the circuit-breaker with the new required short-circuit power factor. This same prospective current shall have its a.c. component without any decrement, according to the basic assumptions of IEC Publication 157-1.

Dans des cas particuliers, des essais avec un décrétement non nul de la composante alternative du courant avec un nouveau facteur de puissance peuvent se justifier pourvu que :

- le décrétement attendu de la composante alternative du court-circuit auquel on s'attend dans l'application considérée soit connu ;
- le décrétement affectant la composante alternative du courant d'essai n'excède pas celui de l'application considérée.

Les disjoncteurs ayant des pouvoirs de court-circuit nominaux conformes aux critères ci-dessus conviennent pour application aux installations marines puisque leur pouvoir de coupure est au moins égal à celui de l'application pratique.

Par exemple, si au point d'installation d'un disjoncteur on évalue à 40 kA la valeur de crête maximale du courant de court-circuit et que le facteur de puissance envisagé du court-circuit est d'environ 0,25, un disjoncteur d'un pouvoir de coupure nominal (selon la Publication 157-1 de la CEI) de  $40(1/2,0) = 20$  kA (voir tableau I) conviendra pour l'application envisagée puisque le facteur de puissance du court-circuit correspondant au pouvoir de coupure (voir tableau II) n'excède pas le facteur de puissance envisagé dans l'application.

Au contraire, si on évalue à nouveau à 40 kA la valeur de crête maximale du courant présumé de court-circuit pour une application envisagée, mais qu'il en résulte pour le facteur de puissance en court-circuit une valeur inférieure à 0,25, par exemple d'environ 0,10, un disjoncteur choisi suivant la Publication 157-1 de la CEI peut ne pas convenir pour cette application. Un tel disjoncteur, dont le pouvoir de fermeture nominal ne devrait pas être inférieur à 40 kA, doit être essayé suivant la méthode d'essai de la Publication 157-1 de la CEI mais avec un facteur de puissance du court-circuit n'excédant pas la valeur de 0,10 requise par l'application envisagée, et avec un courant présumé d'au moins  $40(1/2,45) = 16,4$  kA (tableau III). Si le disjoncteur subit l'essai avec succès, il convient pour l'application envisagée.

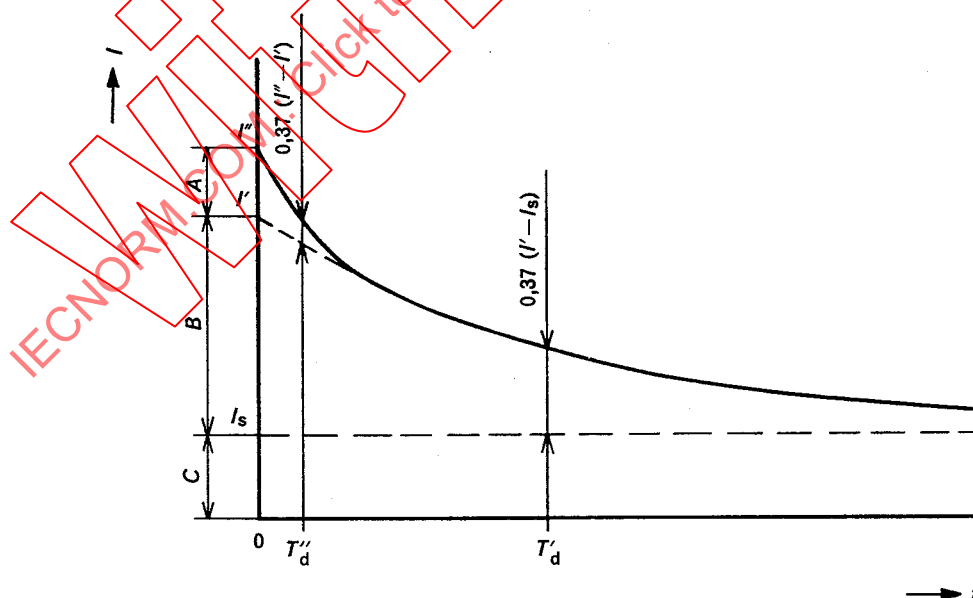


FIG. 1. — Enveloppe de la valeur efficace des ondes de courant pendant les premiers cycles.

In particular cases, special tests may be justified allowing a decrement of the a.c. component of the test current with the new required short-circuit power factor, provided that :

- the decrement to be expected for the a.c. component of the short-circuit current in the relevant application is known ;
- the decrement affecting the a.c. component of the test current does not exceed that of the relevant application.

Circuit-breakers with short-circuit rating conforming to the above criteria, are suitable for application in marine systems, their inherent breaking capacity being adequate to the actual application, or in excess.

For example, if the maximum peak value of the prospective short-circuit current evaluated in the point of application of a circuit-breaker, for a particular case, is about 40 kA, and the power factor of the evaluated short-circuit current is about 0.25, a circuit-breaker with rated short-circuit breaking capacity (according to IEC Publication 157-1) of  $40(1/2.0) = 20$  kA (see Table I) will be suitable for the relevant application, since the short-circuit power factor corresponding to the rated breaking capacity (see Table II) does not exceed the short-circuit power factor evaluated for the application itself.

On the contrary, if the maximum peak value of the prospective short-circuit current evaluated for a particular application is again 40 kA, but the short-circuit power factor results in a value less than 0.25, e.g., about 0.10, a circuit-breaker rated according to IEC Publication 157-1 may not be suitable for this application. Such a circuit-breaker, having rated making capacity not less than 40 kA, should be tested according to the test procedure of IEC Publication 157-1 but with a short-circuit power factor not exceeding the value of 0.10, required by the relevant application, and with a prospective current of  $40(1/2.45) = 16.4$  kA at least (see Table III). If the circuit-breaker passes this test, it is suitable for the relevant application.

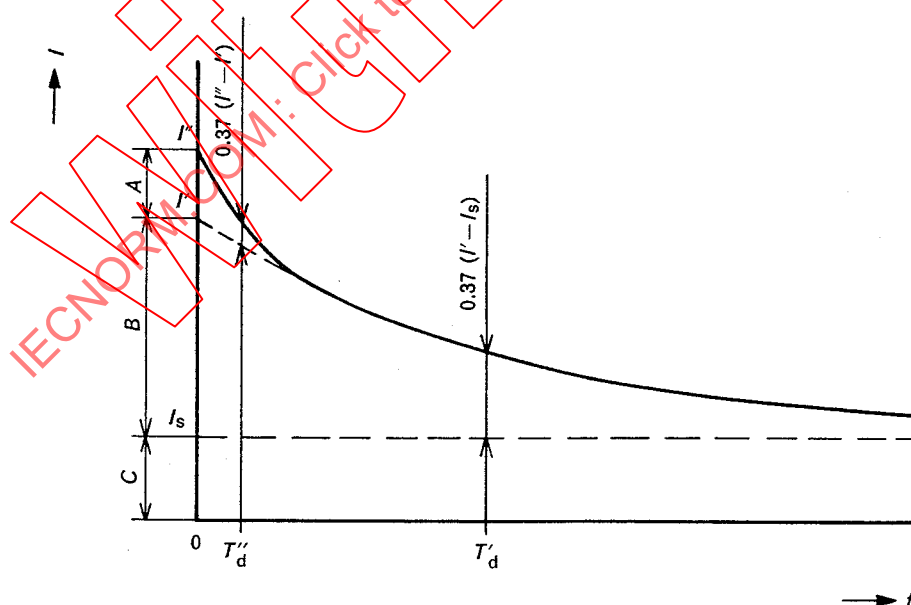


FIG. 1. — Envelope of the r.m.s. value of the current waves of a short-circuit corresponding to the first cycles.

*Note.* — Après les premiers cycles, la valeur du courant de court-circuit puis sa valeur permanente dépendent de la régulation et de l'excitation.

L'enveloppe du courant de court-circuit efficace de la figure 1, page 18, peut être exprimée par :

$$I'' = A + B + C$$

en tenant compte de :

$$A = (I'' - I') \varepsilon^{-t/T_d''}, \quad I'' = \frac{V_N}{X_d''}, \quad I' = \frac{V_N}{X_d'},$$

$$B = (I' - I_s) \varepsilon^{-t/T_d'}$$

$$C = I_s$$

de sorte que  $I_{ac}$  en valeur efficace a la valeur :

$$I_{ac} = (I'' - I') \varepsilon^{-t/T_d''} + (I' - I_s) \varepsilon^{-t/T_d'} + I_s \text{ (eff)} \quad (20)$$

Withdrawing  
IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC TR 60363:1972

*Note.* — After the first few cycles, the value of the short-circuit current as well as the steady-state value depend on the regulation and excitation systems.

The envelope of the short-circuit current (r.m.s.) in Figure 1, page 19, can be expressed by :

$$I'' = A + B + C$$

taking into account that :

$$A = (I'' - I') e^{-t/T_d''}, \quad I'' = \frac{V_N}{X_d''}, \quad I' = \frac{V_N}{X_d'},$$

$$B = (I' - I_s) e^{-t/T_d'}$$

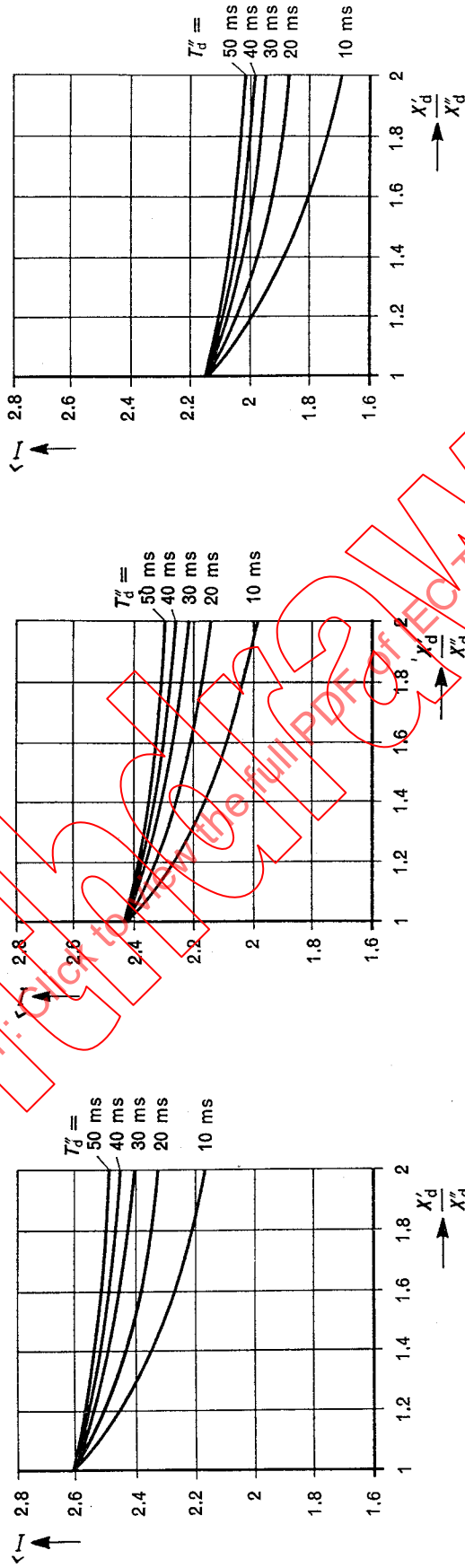
$$C = I_s$$

so that  $I_{ac}$  in r.m.s. value :

$$I_{ac} = (I'' - I') e^{-t/T_d''} + (I' - I_s) e^{-t/T_d'} + I_s \text{ (r.m.s.)} \quad (20)$$

Withdrawn  
IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC TR 60363:1972

Coefficients donnant la valeur de crête maximale du courant en fonction du temps  $T_d''$  à 50 Hz  
 Facteur multiplicateur  $= f(x_d')/x_d''$  pour 50 Hz et  $T_d''$  différentes  
 Factors for  $I_{\text{peak max}}$  for times  $T_d''$  for 50 Hz  
 Multiplying factor  $= f(x_d')/x_d''$  for 50 Hz and different  $T_d''$



$\hat{I}$  = le facteur multiplicateur  $= \frac{I_{\text{crête max}}}{I''_{\text{vide}}}$   
 $\hat{I}$  = multiplying factor  $= \frac{I_{\text{peak max}}}{I''_{\text{no load}}}$

FIG. 2a. —  $\cos \varphi = 0,05$ .  
 $\cos \varphi = 0,05$ .

FIG. 3a. —  $\cos \varphi = 0,1$ .  
 $\cos \varphi = 0,1$ .

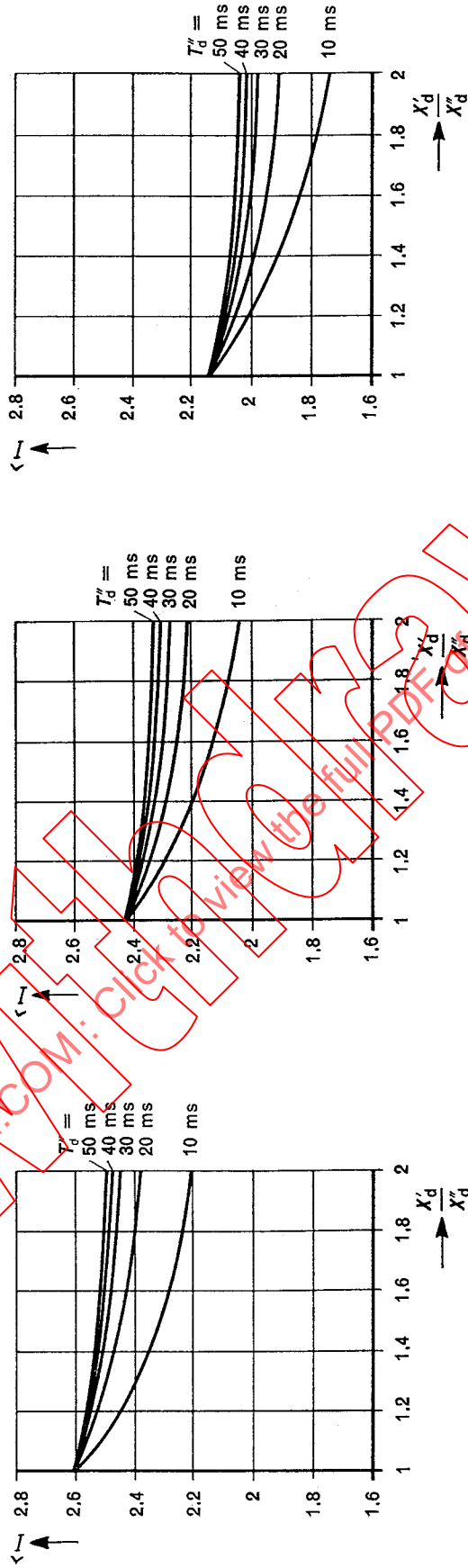
FIG. 4a. —  $\cos \varphi = 0,2$ .  
 $\cos \varphi = 0,2$ .

Coefficients donnant la valeur de crête maximale du courant en fonction du temps  $T_d''$  à 60 Hz

Facteur multiplicateur  $= f(x_d'/x_d'')$  pour 60 Hz et  $T_d''$  différentes

Factors for  $I_{\text{peak max}}$  for times  $T_d''$  for 60 Hz

Multiplying factor  $= f(x_d'/x_d'')$  for 60 Hz and different  $T_d''$



$$\hat{I} = \text{le facteur multiplicateur} = \frac{I_{\text{crête max}}}{I''_{\text{vide}}}$$

$$\hat{I} = \text{multiplying factor} = \frac{I_{\text{peak max}}}{I''_{\text{no load}}}$$

FIG. 2b. —  $\text{Cos } \varphi = 0,05$ .  
 $\text{Cos } \varphi = 0,05$ .

FIG. 3b. —  $\text{Cos } \varphi = 0,1$ .  
 $\text{Cos } \varphi = 0,1$ .

FIG. 4b. —  $\text{Cos } \varphi = 0,2$ .  
 $\text{Cos } \varphi = 0,2$ .

## 8. Exemple d'un calcul de court-circuit

### 8.1 Généralités

Cet exemple est hypothétique et ne représente aucune installation existante et sert seulement à montrer comment procéder au calcul et aux estimations. Voir figure 5, page 30, où sont également donnés les paramètres de calcul.

### 8.2 Courant de court-circuit des générateurs

Pour chaque générateur :  $I_N = \frac{1\,000}{450 \sqrt{3}} = 1,28 \text{ kA}$ .

$$I''_{\text{vide}} = \frac{I_N}{x_d''} = \frac{1,28}{0,15} = 8,53 \text{ kA}.$$

$$I'_{\text{vide}} = \frac{I_N}{x_d'} = \frac{1,28}{0,2} = 6,40 \text{ kA}.$$

La valeur efficace de  $I_{ac}$  durant les tout premiers cycles peut être obtenue à partir de la formule (3) :

$$I_{ac} = (I'' - I') \varepsilon^{-t/T''} + I'$$

La fréquence étant 60 Hz, la période = 0,0167 s,  $\frac{1}{2}$  période =  $\frac{1}{2} T = 8,3 \text{ ms}$

$$(I'' - I')_{\text{vide}} = 2,13 \text{ kA}$$

Les valeurs de  $I_{ac}$  et de  $I_{dc}$  en fonction du temps  $t$  sont données dans les tableaux IV et V pour les valeurs de  $t$  suivantes :

$$t = 0; \frac{1}{2} T; T; \frac{3}{2} T; 2 T \text{ et } 3 T$$

$T$  étant la durée d'un cycle.

TABLEAU IV

$T''_{\text{gén}} = 20 \text{ ms}$ . Pour le décrement, voir figure 7, page 42 où sont également donnés les paramètres de calcul

| $t$<br>ms             | $(I'' - I') \varepsilon^{-t/T''}$ à vide<br>kA | $I'$ à vide<br>kA | $I_{ac}$ efficace<br>à vide<br>kA | $I_{ac}$<br>à charge nominale<br>kA |
|-----------------------|------------------------------------------------|-------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| 0                     | 2,13                                           | 6,4               | 8,53                              | 9,38                                |
| $\frac{1}{2} T = 8,3$ | $2,13 \times 0,65 = 1,38$                      | 6,4               | 7,78                              | 8,55                                |
| $T = 16,6$            | $2,13 \times 0,42 = 0,89$                      | 6,4               | 7,29                              | 8,02                                |
| $\frac{3}{2} T = 25$  | $2,36 \times 0,28 = 0,6$                       | 6,4               | 7,0                               | 7,7                                 |
| $2 T = 33,2$          | $2,36 \times 0,18 = 0,38$                      | 6,4               | 6,78                              | 7,46                                |
| $3 T = 50$            | $2,36 \times 0,08 = 0,17$                      | 6,4               | 6,57                              | 7,23                                |

La composante apériodique ayant à l'instant  $t = 0$ , une valeur :

$$\sqrt{2} I'' = 8,53 \sqrt{2} = 12,1 \text{ kA décroît comme suit : } I_{dc} = \sqrt{2} I'' \varepsilon^{-t/T_{dc}} \text{ (voir formule (4)).}$$

## 8. Example of a short-circuit calculation

### 8.1 General

This example is hypothetical and does not represent any existing plant. It serves only to explain how to calculate and to estimate. The calculated parameters are given in Figure 5, page 31.

### 8.2 Short-circuit current of the generators

For each generator:  $I_N = \frac{1\,000}{450\sqrt{3}} = 1.28\text{ kA}$ .

$$I''_{\text{no load}} = \frac{I_N}{x_d''} = \frac{1.28}{0.15} = 8.53\text{ kA}.$$

$$I'_{\text{no load}} = \frac{I_N}{x_d'} = \frac{1.28}{0.2} = 6.40\text{ kA}.$$

The r.m.s. value of  $I_{ac}$  during the first few cycles can be obtained from formula (3):

$$I_{ac} = (I'' - I') e^{-t/T''} + I'$$

The frequency being 60 Hz, 1 cycle = 0.0167 s;  $\frac{1}{2}$  cycle =  $\frac{1}{2}T = 8.3\text{ ms}$

$$(I'' - I')_{\text{no load}} = 2.13\text{ kA}$$

The values of  $I_{ac}$  and  $I_{dc}$  as a function of time  $t$  are given in Tables IV and V for the following values of  $t$ :

$$t = 0; \frac{1}{2}T; T; \frac{3}{2}T; 2T \text{ and } 3T$$

$T$  being the time of one cycle.

TABLE IV

$T''_{\text{gen}} = 20\text{ ms}$ . For decrement see Figure 7, page 43, in which some particular values are given

| $t$<br>ms            | $(I'' - I') e^{-t/T''}$ no load<br>kA | $I'$ no load<br>kA | $I_{ac}$ r.m.s.<br>no load<br>kA | $I_{ac}$ rated load<br>kA |
|----------------------|---------------------------------------|--------------------|----------------------------------|---------------------------|
| 0                    | 2.13                                  | 6.4                | 8.53                             | 9.38                      |
| $\frac{1}{2}T = 8.3$ | $2.13 \times 0.65 = 1.38$             | 6.4                | 7.78                             | 8.55                      |
| $T = 16.6$           | $2.13 \times 0.42 = 0.89$             | 6.4                | 7.29                             | 8.02                      |
| $\frac{3}{2}T = 25$  | $2.36 \times 0.28 = 0.6$              | 6.4                | 7.0                              | 7.7                       |
| $2T = 33.2$          | $2.36 \times 0.18 = 0.38$             | 6.4                | 6.78                             | 7.46                      |
| $3T = 50$            | $2.36 \times 0.08 = 0.17$             | 6.4                | 6.57                             | 7.23                      |

The d.c. component having at an instant  $t = 0$ , a value:

$$\sqrt{2} I'' = 8.53 \sqrt{2} = 12.1\text{ kA} \text{ decreases as follows: } I_{dc} = \sqrt{2} I'' e^{-t/T_{dc}} \text{ (see formula (4)).}$$

TABEAU V

$T_{dc\text{ gén}} = 40$  ms. La figure 7, page 42, donne la valeur du décroissement  $\varepsilon^{-t/T_{dc}}$  en fonction du temps; le tableau V en extrait quelques valeurs particulières.

| $t$<br>ms             | $I_{dc} = f(\text{temps})$<br>kA |
|-----------------------|----------------------------------|
| 0                     | 12,1                             |
| $\frac{1}{2} T = 8,3$ | $12,1 \times 0,8 = 9,68$         |
| $T = 16,6$            | $12,1 \times 0,66 = 8$           |
| $\frac{3}{2} T = 25$  | $12,1 \times 0,53 = 6,4$         |
| $2 T = 33,2$          | $12,1 \times 0,43 = 5,2$         |
| $3 T = 50$            | $12,1 \times 0,28 = 3,4$         |

### 8.3 Valeur de crête maximale possible du courant de court-circuit des générateurs

Voir formule 4 et figure 2b, page 23.

Suivant l'article 1, pour un défaut se produisant près des barres principales, les résistances peuvent être négligées ; bien que le facteur de puissance soit très petit et pour déterminer le facteur de multiplication pour  $I_{crête\text{ max}}$ , la figure 2b ( $\cos \varphi = 0,05$ ) doit être utilisée.

la figure 2b donne pour  $\frac{x'_d}{x_d} = \frac{0,20}{0,15} = 1,33$ , un facteur  $\frac{I_{crête}}{I_{vide}} = 2,5$  ;

d'où :

$$I_{crête\text{ max}} = 2,5 \times 7,78 = 19,5 \text{ kA}$$

Selon la formule 4, la valeur de crête maximale peut être aussi prise des tableaux IV et V :

$$I_{crête\text{ max}} = 7,78 \sqrt{2} + 9,68 = 11 + 9,68 = 20,68 \text{ kA}$$

### 8.4 Courant de court-circuit des moteurs

La méthode la plus simple pour calculer la contribution des moteurs est celle donnée dans le paragraphe 3.1 de la Modification N° 1 à la Publication 92-4 de la CEI : Installations électriques à bord des navires, Quatrième partie : Appareillage, protection électrique, distribution et appareils de commande (chapitre XIII) et les formules 5 et 6 du présent rapport. C'est celle d'un moteur imaginaire ayant comme puissance la somme des puissances nominales des moteurs en service simultanément et étant connecté directement aux barres principales.

En fait, la contribution de ce moteur peut aussi être calculée par les formules 7 à 11 du présent rapport au lieu d'employer les facteurs des formules 5 et 6.

Ces méthodes ne sont acceptables que si la puissance motrice est répartie en grandes unités raccordées directement aux barres principales.

Si, au contraire, elle est divisée en quelques grosses unités et de nombreuses petites, toutes raccordées par des câbles longs, on peut avoir un résultat plus correct en faisant un calcul séparé (avec les mêmes facteurs ou formules) pour les différents points où les disjoncteurs de moteurs sont placés, ou bien où la puissance motrice est concentrée. Ces différentes méthodes sont utilisées ci-après.

TABLE V

$T_{dc \text{ gen}} = 40 \text{ ms}$ . For decrement  $e^{-t/T_{dc}}$  as function of time see Figure 7, page 43.  
Table V contains a few particular values.

| $t$<br>ms             | $I_{dc} = f(\text{time})$<br>kA |
|-----------------------|---------------------------------|
| 0                     | 12.1                            |
| $\frac{1}{2} T = 8.3$ | $12.1 \times 0.8 = 9.68$        |
| $T = 16.6$            | $12.1 \times 0.66 = 8$          |
| $\frac{3}{2} T = 25$  | $12.1 \times 0.53 = 6.4$        |
| $2 T = 33.2$          | $12.1 \times 0.43 = 5.2$        |
| $3 T = 50$            | $12.1 \times 0.28 = 3.4$        |

### 8.3 Maximum possible peak value of the short-circuit current of the generators

See formula 4 and Figure 2b, page 23.

According to Clause 1, for a fault occurring in close proximity to the main busbars, resistances may be neglected; though the power factor is very small and for determining the multiplying factor for  $I_{\text{peak max}}$  Figure 2b ( $\cos \phi = 0.05$ ) has to be used.

Figure 2b gives for  $\frac{x'_d}{x''_d} = \frac{0.20}{0.15} = 1.33$ , a factor  $\frac{I_{\text{peak}}}{I_{\text{no load}}} = 2.5$ ;

where :

$$I_{\text{peak max}} = 2.5 \times 7.78 = 19.5 \text{ kA}$$

According to formula 4, the maximum peak value can also be taken from Tables IV and V :

$$I_{\text{peak max}} = 7.78 \sqrt{2} + 9.68 = 11 + 9.68 = 20.68 \text{ kA}$$

### 8.4 Short-circuit current of motors

The most simple method for calculating motor contribution is the method given in Sub-clause 3.1 of Amendment No. 1 to IEC Publication 92-4, Electrical Installations in Ships, Part 4 : Switchgear, Electrical Protection, Distribution and Controlgear (Chapter XIII) and formulae 5 and 6 of this Report are of one imaginary motor directly connected to the main busbars with a rated power equal to the sum of rated powers of all motors running simultaneously in service.

The motor contribution of this imaginary motor can, in point of fact, also be calculated with formulae 7 to 11 of this Report instead of the factors given in formulae 5 and 6.

These methods give only acceptable results if the motor power is principally concentrated in large units which are directly connected to the main busbars.

If the motor power is divided into only a few large units and many smaller ones all connected via long cables, then it may be more correct to make a separate calculation with the same formulae or factors for those points where the motor circuit-breakers are situated or motor power is concentrated. These various methods will be demonstrated as follows :

a) Première méthode (voir figure 5, page 30, et formules 5 et 6)

Puissance motrice totale = 1 500 kVA concentrée en un seul moteur avec les paramètres suivants :

$$I_N (\text{moteur}) = \frac{1\,500}{450 \sqrt{3}} = 1,93 \text{ kA.}$$

Valeur efficace de la contribution du moteur, selon la formule 5.

| $t$        | 0    | $\frac{1}{2} T$ | $T$ | $2 T$ |
|------------|------|-----------------|-----|-------|
| Facteur    | 6,25 | 4               | 2,5 | 1     |
| $I_m$ (kA) | 12   | 7,7             | 4,8 | 1,9   |

$$I_{\text{crête max}} = 8 I_N = 8 \times 1,93 = 15,5 \text{ kA}$$

b) Deuxième méthode

Puissance motrice totale = 1 500 kVA concentrée en un seul moteur avec les paramètres suivants :

$z_b = 0,16$  impédance avec rotor bloqué, en pour-cent

$x_b = 0,155$  réactance avec rotor bloqué, en pour-cent

$R_r = 0,0027 \Omega$

$R_s = 0,0055 \Omega$

D'où :

$$Z_b = \frac{V_N}{I_N} z_b = \frac{260}{1\,930} 0,16 = 0,0216 \Omega$$

$$X_b = \frac{V_N}{I_N} x_b = \frac{260}{1\,930} 0,155 = 0,0209 \Omega$$

$$T_d' = \frac{0,0209}{2 \pi 60 \times 0,0027} = 0,0205 \text{ s} = 20,5 \text{ ms} \quad (\text{voir formule 7})$$

$$T_{ac} = \frac{0,0209}{2 \pi 60 \times 0,0055} = 0,01 \text{ s} = 10 \text{ ms} \quad (\text{voir formule 8})$$

$$I_{ac} = \frac{V_N}{Z_b} e^{-t/T'} = \frac{260}{0,0216} e^{-t/0,0205} = 12 e^{-t/0,0205} \quad (\text{voir formule 9})$$

valeur qui varie en fonction du temps, comme l'indique le tableau VI.

TABLEAU VI

$T_d' (\text{moteur}) = 20,5 \text{ ms}$ . Pour décroissement, voir figure 7, page 42.

| $t$<br>ms             | $I_{\text{moteurs ac}} = f(\text{temps})$<br>kA |
|-----------------------|-------------------------------------------------|
| 0                     | 12                                              |
| $\frac{1}{2} T = 8,3$ | $12 \times 0,65 = 7,8$                          |
| $T = 16,6$            | $12 \times 0,42 = 5$                            |
| $\frac{3}{2} T = 25$  | $12 \times 0,28 = 3,36$                         |
| $2 T = 33,2$          | $12 \times 0,18 = 2,16$                         |
| $3 T = 50$            | $12 \times 0,08 = 0,96$                         |

a) First method (see Figure 5, page 31, and Formulae 5 and 6)

Total motor power = 1 500 kVA, concentrated in one motor with the following parameters :

$$I_{N \text{ (motor)}} = \frac{1\,500}{450 \sqrt{3}} = 1.93 \text{ kA}$$

The r.m.s. value of the motor contribution is calculated according to formula 5.

| $t$        | 0    | $\frac{1}{2} T$ | $T$ | $2 T$ |
|------------|------|-----------------|-----|-------|
| Factor     | 6.25 | 4               | 2.5 | 1     |
| $I_m$ (kA) | 12   | 7.7             | 4.8 | 1.9   |

$$I_{\text{peak max}} = 8 I_N = 8 \times 1.93 = 15.5 \text{ kA}$$

b) Second method

Total motor power = 1 500 kVA concentrated in one motor with the following parameters :

$z_b = 0.16$  impedance with rotor locked, in per cent

$x_b = 0.155$  reactance with rotor locked, in per cent

$R_r = 0.0027 \Omega$

$R_s = 0.0055 \Omega$

It follows :

$$Z_b = \frac{V_N}{I_N} z_b = \frac{260}{1\,930} 0.16 = 0.0216 \Omega$$

$$X_b = \frac{V_N}{I_N} x_b = \frac{260}{1\,930} 0.155 = 0.0209 \Omega$$

$$T_d' = \frac{0.0209}{2 \pi 60 \times 0.0027} = 0.0205 \text{ s} = 20.5 \text{ ms} \quad (\text{see formula 7})$$

$$T_{dc} = \frac{0.0209}{2 \pi 60 \times 0.0055} = 0.01 \text{ s} = 10 \text{ ms} \quad (\text{see formula 8})$$

$$I_{ac} = \frac{V_N}{Z_b} e^{-t/T'} = \frac{260}{0.0216} e^{-t/0.0205} = 12 e^{-t/0.0205} \quad (\text{see formula 9})$$

This value varies as a function of the time as shown in Table VI.

TABLE VI

$T_d \text{ (motor)} = 20.5 \text{ ms}$ . For decrement see Figure 7, page 43.

| $t$<br>ms             | $I_{ac \text{ motors}} = f(\text{time})$<br>kA |
|-----------------------|------------------------------------------------|
| 0                     | 12                                             |
| $\frac{1}{2} T = 8.3$ | $12 \times 0.65 = 7.8$                         |
| $T = 16.6$            | $12 \times 0.42 = 5$                           |
| $\frac{3}{2} T = 25$  | $12 \times 0.28 = 3.36$                        |
| $2 T = 33.2$          | $12 \times 0.18 = 2.16$                        |
| $3 T = 50$            | $12 \times 0.08 = 0.96$                        |

Pour  $t = 0$ ,  $I_{dc} = \sqrt{2} V_N / Z_b = \sqrt{2} (260) / 0,0216 = 16,9 \text{ kA}$ , valeur qui varie en fonction du temps suivant la formule 10 :

$$I_{dc} = \sqrt{2} \frac{V_N}{Z_b} \varepsilon^{-t/T_{dc}} = 16,9 \varepsilon^{-t/0,010} \quad (\text{voir formule 10})$$

TABLEAU VII

$T_{dc} (\text{moteur}) = 10 \text{ ms}$ . Pour décrétement, voir figure 7, page 42.

| $t$<br>ms             | $I_{dc} \text{ moteurs} = f(\text{temps})$<br>kA |
|-----------------------|--------------------------------------------------|
| 0                     | 16,9                                             |
| $\frac{1}{2} T = 8,3$ | $16,9 \times 0,43 = 7,25$                        |
| $T = 16,6$            | $16,9 \times 0,2 = 3,4$                          |
| $\frac{3}{2} T = 25$  | $16,9 \times 0,09 = 1,5$                         |
| $2 T = 33,2$          | $16,9 \times 0,01 = \text{négligeable}$          |
| $3 T = 50$            | $16,9 \times = \text{négligeable}$               |

Courant de crête maximal au temps  $t = \frac{1}{2} T$  suivant la formule 11 :

$$\sqrt{2} I_{ac} + I_{dc} = 7,8 \sqrt{2} + 7,25 = 18,3 \text{ kA}$$

c) *Troisième méthode*

A appliquer suivant les paragraphes 8.5 et 8.6.

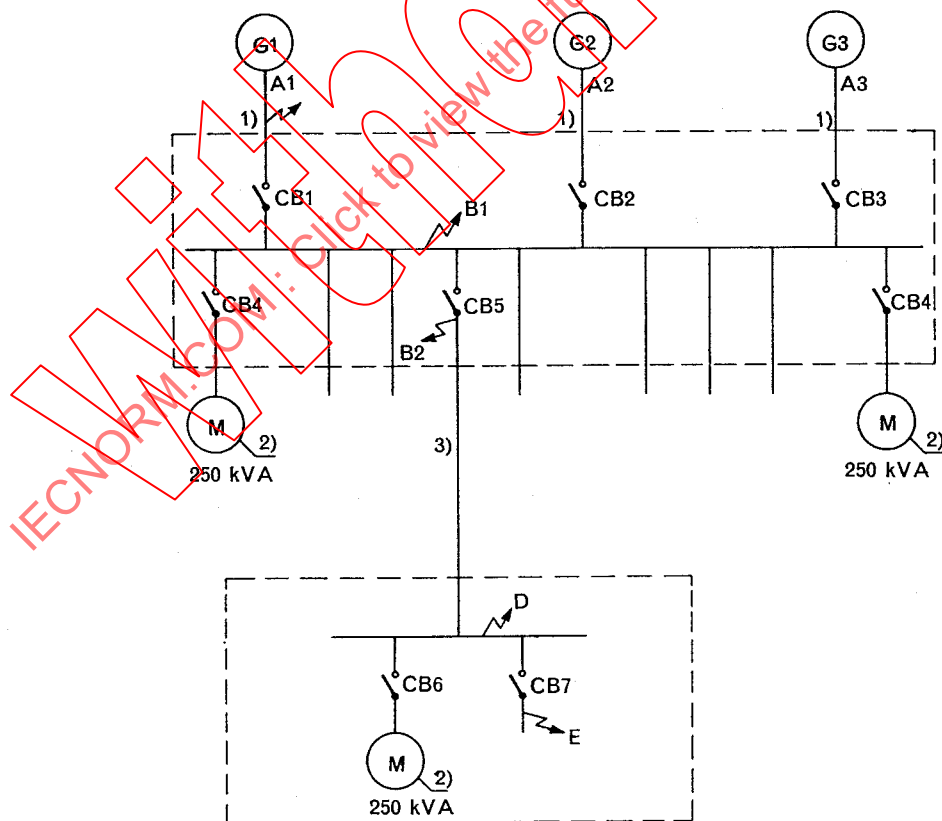


FIG. 5. — Exemple hypothétique

For  $t = 0$ ,  $I_{dc} = \sqrt{2} V_N / Z_b = \sqrt{2} (260) / 0.0216 = 16.9 \text{ kA}$ .  
This value varies as a function of the time as follows :

$$I_{dc} = \sqrt{2} \frac{V_N}{Z_b} \varepsilon^{-t/T_{dc}} = 16.9 \varepsilon^{-t/0.010} \quad (\text{see formula 10})$$

TABLE VII

$T_{dc} (\text{motor}) = 10 \text{ ms}$ . For decrement see Figure 7, page 43.

| $t$<br>ms             | $I_{dc} \text{ motors} = f(\text{time})$<br>kA |
|-----------------------|------------------------------------------------|
| 0                     | 16.9                                           |
| $\frac{1}{2} T = 8.3$ | $16.9 \times 0.43 = 7.25$                      |
| $T = 16.6$            | $16.9 \times 0.2 = 3.4$                        |
| $\frac{3}{2} T = 25$  | $16.9 \times 0.09 = 1.5$                       |
| $2 T = 33.2$          | $16.9 \times 0.01 = \text{negligible}$         |
| $3 T = 50$            | $16.9 \times = \text{negligible}$              |

The maximum peak current at time  $t = \frac{1}{2} T$  according to formula 11 is :

$$\sqrt{2} I_{ac} + I_{dc} = 7.8 \sqrt{2} + 7.25 = 18.3 \text{ kA}$$

c) *Third method*

To be applied according to Sub-clause 8.5 and 8.6.

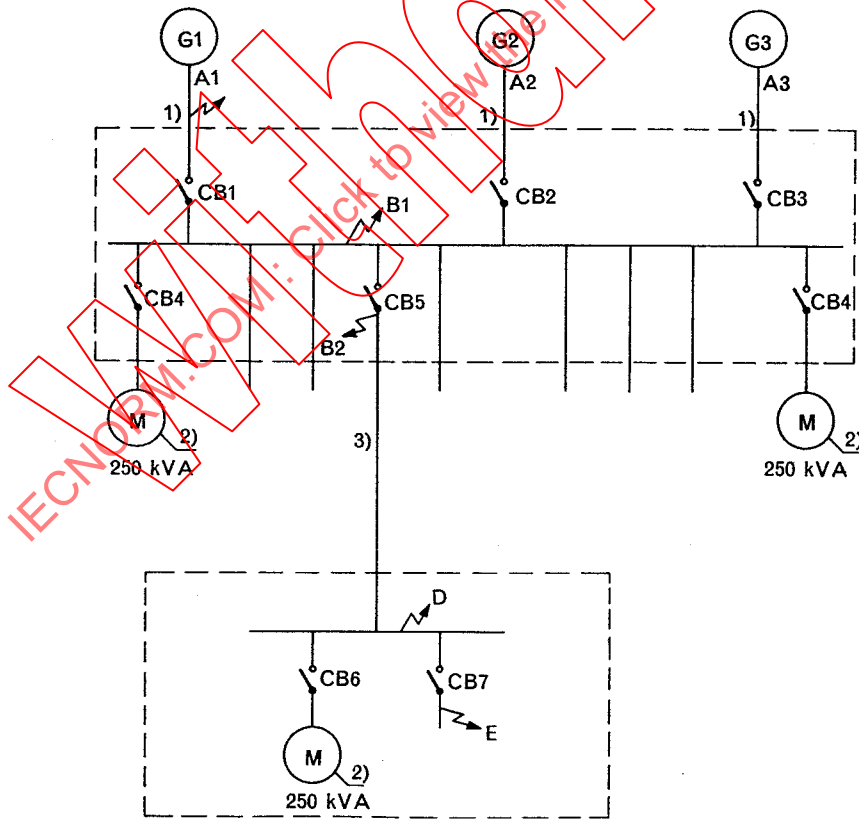


FIG. 5. — Hypothetical example.

Pour les générateurs :  $G1 = G2 = G3$  1 000 kVA,  $V_N = 450$  V,  $f = 60$  Hz,  $\cos \varphi = 0,8$  à la charge nominale.  
 $x_d'' = 0,15$ ;  $x_d' = 0,2$ ;  $x_d = 1,15$ ;  $T'' = 20$  ms;  $T' = 400$  ms;  
 $T_{de} = 40$  ms.

Pour les moteurs : La puissance motrice totale qui peut être utilisée simultanément en service est de 1 500 kVA équivalant à 50% de la puissance totale des générateurs. Il y a deux moteurs de 250 kVA directement connectés aux barres principales et un grand moteur de 250 kVA connecté à un tableau divisionnaire via un câble de 100 m :

- 1) 20 m câble,  $4 \times 3 \times 180$  mm<sup>2</sup>,  $R = 0,65 \times 10^{-3} \Omega$ ;  $X = 0,46 \times 10^{-3} \Omega$ .
- 2) Moteur de 250 kVA,  $V_N = 450$  V,  $z_b = 0,16$ ;  $T_d' = 0,02$ ;  $x_b = 0,155$ ;  $T_{de} = 0,01$ .
- 3) 100 m câble,  $3 \times 180$  mm<sup>2</sup>,  $R = 13 \times 10^{-3} \Omega$ ;  $X = 9,2 \times 10^{-3} \Omega$ .

#### 8.5 Evaluation du courant de court-circuit maximal dans le cas d'un défaut près des barres principales

Sa valeur est la somme arithmétique des pointes de courant évaluées séparément pour les génératrices et les moteurs. Pour les disjoncteurs de génératrices CB1, CB2 et CB3 (voir Figure 5, page 30), on doit prendre en considération le paragraphe 6.2 de la Modification N° 1 à la Publication 92-4 de la CEI (chapitre XIII).

Avec un court-circuit au point A1, CB1 doit couper la somme des courants de court-circuit de G2, G3 et la contribution du moteur.

##### a) Première méthode

Cette méthode est déjà donnée au paragraphe 8.4.

##### b) Deuxième méthode

Court-circuit au point A1

$$I_{ac \text{ total}} = I_{ac \text{ gén}} + I_{ac \text{ contribution moteur}}$$

| $t$<br>kA                    | 0     | $\frac{1}{2} T$ | $T$ | $\frac{3}{2} T$ | $2 T$ | $3 T$ |
|------------------------------|-------|-----------------|-----|-----------------|-------|-------|
| $I_{ac \text{ 2 gén}}^*$     | 18,75 | 17,1            | 16  | 15,4            | 15    | 14,5  |
| $I_{ac \text{ moteur}}^{**}$ | 12    | 7,8             | 5   | 3,36            | 2,16  | 0,96  |
| $I_{ac \text{ total}}$       | 30,75 | 24,9            | 21  | 18,8            | 17,2  | 15,5  |

\*  $I_{ac \text{ 2 gén}} = 2 I_{ac \text{ à charge nominale}}$  (voir tableau IV).

\*\* Voir tableau VI.

Les chiffres relatifs aux générateurs sont extraits du tableau IV (et multipliés par 2).

Les chiffres relatifs aux moteurs sont extraits du tableau VI. Pour  $I_{crête \text{ totale}}$ , voir les paragraphes 8.3 et 8.4.

$$I_{crête \text{ totale}} = 2 I_{crête \text{ gén}} + I_{crête \text{ moteur}} = 2 \times 20,68 + 18 \cong 60 \text{ kA}.$$

Ceci veut dire que CB1, CB2, CB3 doivent avoir un pouvoir de coupure de 24,9 (soit 25) kA et un pouvoir de fermeture de 60 kA.

Dans ce calcul, on a négligé l'influence des câbles entre les génératrices et le tableau principal. Une vérification rapide montre que la résistance des câbles est  $R_{câble} = 0,64$  m $\Omega$ ,  $X_{câble} = 0,46$  m $\Omega$ , alors que la réactance subtransitoire d'un générateur est  $X_r = 30,5$  m $\Omega$ .

La présence des câbles, dont la réactance est à peine 1,5% de  $X''$ , affecte donc si peu le calcul qu'on peut les négliger pour le calcul de la valeur efficace.

For the generators : G1 = G2 = G3 1 000 kVA,  $V_N = 450$  V,  $f = 60$  Hz,  $\cos \varphi = 0.8$  at rated load.

$$x_d'' = 0.15, x_d' = 0.2; x_d = 1.15, T'' = 20 \text{ ms}, T' = 400 \text{ ms}, \\ T_{dc} = 40 \text{ ms}.$$

For the motors : Total motor power which may be running simultaneously in service is 1 500 kVA equal to 50% of the total power of the generators. There are two motors of 250 kVA directly connected to the main busbars and one large motor of 250 kVA connected to a section board via a cable of 100 m.

- 1) 20 m cable,  $4 \times 3 \times 180 \text{ mm}^2$ ;  $R = 0.65 \times 10^{-3} \Omega$ ;  $X = 0.46 \times 10^{-3} \Omega$ .
- 2) Motor of 250 kVA,  $V_N = 450$  V,  $z_b = 0.16$ ;  $T_d' = 0.02$ ;  $x_b = 0.155$ ;  $T_{dc} = 0.01$ .
- 3) 100 m cable,  $3 \times 180 \text{ mm}^2$ ,  $R = 13 \times 10^{-3} \Omega$ ;  $X = 9.2 \times 10^{-3} \Omega$ .

## 8.5 Evaluation of the maximum value of the short-circuit current in case of fault near the main busbars

The actual peak current is the arithmetical sum of the peak values separately evaluated for the generators and for the motors. For the generator circuit-breakers CB1, CB2 and CB3 (see Figure 5, page 31), Sub-clause 6.2 of Amendment No. 1 to IEC Publication 92-4 (Chapter XIII) should be taken into account.

With a short-circuit at Point A1, CB1 has to break the sum of the short-circuit currents of G2, G3 and the motor contribution.

### a) First method

The first method is given already in Clause 8.4.

### b) Second method

Short-circuit at Point A1

$$I_{ac \text{ total}} = I_{ac \text{ gen}} + I_{ac \text{ motor contribution}}$$

| $t$<br>kA                   | 0     | $\frac{1}{2} T$ | $T$ | $\frac{3}{2} T$ | $2 T$ | $3 T$ |
|-----------------------------|-------|-----------------|-----|-----------------|-------|-------|
| $I_{ac \text{ 2 gen}}^*$    | 18.75 | 17.1            | 16  | 15.4            | 15    | 14.5  |
| $I_{ac \text{ motor}}^{**}$ | 12    | 7.8             | 5   | 3.36            | 2.16  | 0.96  |
| $I_{ac \text{ total}}$      | 30.75 | 24.9            | 21  | 18.8            | 17.2  | 15.5  |

\*  $I_{ac \text{ 2 gen}} = 2 I_{ac \text{ rated load}}$  (see Table IV).

\*\* See Table VI.

The figures given for the generators are taken from Table IV and multiplied by 2.

The figures for the motors are taken from Table VI. For  $I_{peak \text{ total}}$  see Sub-clauses 8.3 and 8.4.

$$I_{peak \text{ total}} = 2 I_{peak \text{ gen}} + I_{peak \text{ motor}} = 2 \times 20.68 + 18 \cong 60 \text{ kA}.$$

This means that CB1, CB2 and CB3 should have a rated breaking capacity of 24.9 (25) kA and a rated making capacity of 60 kA.

In this calculation, the influence of the cables between the generators and the main switch board is neglected. A rapid check shows that the sub-transient reactance of one generator is  $X_r = 30.5 \text{ m}\Omega$ ;  $X_{\text{cable}} = 0.46 \text{ m}\Omega$  and  $R_{\text{cable}} = 0.64 \text{ m}\Omega$ .

These cable values, which are hardly 1.5% of  $X''$  affect the total  $I$  only to a very small degree, so that they may be neglected in the calculation for the r.m.s. value.

Court-circuit au point B1-B2 (voir Figure 5, page 30) :

En ce qui concerne le tableau principal, le calcul peut être entrepris avec les mêmes valeurs, valables pour les points A1, A2, A3. De même  $T_a''$  et  $T_a'$  ne sont pas affectés par l'insertion des câbles. Seule  $T_{dc}$  (et par voie de conséquence la diminution de la composante apériodique) est influencée par la résistance du câble et, par suite, la valeur asymétrique de  $I_{crête\ max}$ .

Pour un générateur  $V_N = 260\text{ V}$ ,  $I_N = 1\ 280\text{ A}$ .

$$x'' = 0,15; \quad X'' = \frac{260}{1\ 280} 0,15 = 0,0305\ \Omega;$$

$$T_{dc} = 40\text{ ms} = \frac{L}{R} = \frac{\omega L}{\omega R} = \frac{X''}{\omega R_s};$$

$$R_s = \frac{X''}{\omega T_{dc}} = \frac{0,0305}{2\pi 60 \times 0,04} \cong 0,002\ \Omega;$$

$$R_{câble} = 0,000\ 64\ \Omega; \quad X_{câble} = 0,000\ 46\ \Omega;$$

de la formule 15, on tire :

$$T_{eac} = \frac{T_{dc} + (x_e/\omega R_s)}{1 + (R_e/R_s)} = \frac{0,04 + (0,000\ 46/2\pi 60 \times 0,002)}{1 + \frac{1}{2}(0,000\ 64)} \cong 0,031\text{ s} = 31\text{ ms}$$

Avec cette nouvelle constante de temps, les chiffres du tableau V sont modifiés comme suit :

$$I_{dc} = \sqrt{2}; \quad I'' e^{-t/0,031}$$

TABLEAU VIII

$T_{eac}(\text{gén}) = 31\text{ ms}$ . Pour décrétement, voir figure 7, page 42.

| $t$<br>ms             | $I_{dc} = f(\text{temps})$<br>kA |
|-----------------------|----------------------------------|
| 0                     | 12,1                             |
| $\frac{1}{2} T = 8,3$ | $12,1 \times 0,76 = 9,1$         |
| $T = 16,6$            | $12,1 \times 0,58 = 7$           |
| $\frac{3}{2} T = 25$  | $12,1 \times 0,44 = 5,3$         |
| $2 T = 33,2$          | $12,1 \times 0,34 = 4,1$         |
| $3 T = 50$            | $12,1 \times 0,18 = 2,2$         |

En comparant les tableaux V et VIII, on constate que  $I_{crête}$  n'est pas beaucoup influencée bien que la constante de temps apériodique ait décru de 40 ms à 31 ms par suite de l'insertion du câble. La valeur calculée avec une constante de temps de 31 ms pour  $I_{crête}$  est :

$$I_{crête\ gén} = 7,78 \sqrt{2} + 9,1 = 11 + 9,1 = 20,1\text{ kA au lieu de }20,68\text{ kA}.$$

Les disjoncteurs CB4, CB5 etc., situés dans les lignes partant du tableau principal ont à supporter, quand on concentre toute la puissance motrice sur les barres principales, une valeur symétrique totale de :

| $t$<br>kA                   | 0  | $\frac{1}{2} T$ | $T$ | $\frac{3}{2} T$ | $2 T$ | $3 T$ |
|-----------------------------|----|-----------------|-----|-----------------|-------|-------|
| $I_{ac}\ 3\text{ gén}$      | 28 | 25,6            | 24  | 23              | 22,5  | 21,7  |
| $I_{ac}\ 1\text{ moteur}^*$ | 12 | 7,8             | 5   | 3,36            | 2,16  | 0,96  |
| $I_{ac}\ total$             | 40 | 33,4            | 29  | 26,4            | 24,7  | 22,7  |

\*Voir Tableau VI.

Short-circuit at Points B1-B2 (see Figure 5, page 31) :

The calculation with regard to the main switchboard may thus be started with the same values as valid for Points A1, A2, A3. Also, the values of  $T_d''$  and  $T_d'$  are not affected by the insertion of these cables. Only  $T_{dc}$  and in consequence, the decrease of the d.c. component is influenced by the resistance of the cable concerned and as a consequence, the asymmetrical value  $I_{peak \max}$ . For one generator  $V_N = 260 \text{ V}$ ,  $I_N = 1\,280 \text{ A}$ .

$$x'' = 0.15, \quad X'' = \frac{260}{1\,280} 0.15 = 0.0305 \, \Omega,$$

$$T_{dc} = 40 \text{ ms} = \frac{L}{R} = \frac{\omega L}{\omega R} = \frac{X''}{\omega R_s},$$

$$R_s = \frac{X''}{\omega T_{dc}} = \frac{0.0305}{2\pi 60 \times 0.04} \cong 0.002 \, \Omega,$$

$$R_{\text{cable}} = 0.000\,64 \, \Omega, \quad X_{\text{cable}} = 0.000\,46 \, \Omega,$$

from formula 15, we have :

$$T_{e_{dc}} = \frac{T_{dc} + (x_e/\omega R_s)}{1 + (R_e/R_s)} = \frac{0.04 + (0.000\,46/2\pi 60 \times 0.002)}{1 + \frac{1}{2} (0.000\,64)} \cong 0.031 \text{ s} \cong 31 \text{ ms}$$

With this new time constant, the values of Table V change as follows :

$$I_{dc} = \sqrt{2}; I'' e^{-t/0.031}$$

TABLE VIII

$T_{e_{dc} \text{ (gen)}} = 31 \text{ ms}$ . For decrement see Figure 7, page 43.

| $t$<br>ms             | $I_{dc} = f(\text{time})$<br>kA |
|-----------------------|---------------------------------|
| 0                     | 12.1                            |
| $\frac{1}{2} T = 8.3$ | $12.1 \times 0.76 = 9.1$        |
| $T = 16.6$            | $12.1 \times 0.58 = 7$          |
| $\frac{3}{2} T = 25$  | $12.1 \times 0.44 = 5.3$        |
| $2 T = 33.2$          | $12.1 \times 0.34 = 4.1$        |
| $3 T = 50$            | $12.1 \times 0.18 = 2.2$        |

Though the d.c. time constant has decreased by cable insertion from 40 ms to 31 ms, it appears when comparing Table V with Table VIII, that  $I_{peak}$  is not strongly influenced.

The calculated value with a time constant of 31 ms for  $I_{peak}$  is :

$$I_{peak \text{ gen}} = 7.78 \sqrt{2} + 9.1 = 11 + 9.1 = 20.1 \text{ kA, instead of } 20.68 \text{ kA.}$$

The circuit-breakers CB4, CB5, etc., situated in the outgoing lines of the main switchboard have to withstand, when concentrating the total motor power on the main busbars, a total symmetrical value of :

| $t$<br>kA                   | 0  | $\frac{1}{2} T$ | $T$ | $\frac{3}{2} T$ | $2 T$ | $3 T$ |
|-----------------------------|----|-----------------|-----|-----------------|-------|-------|
| $I_{ac \text{ 3 gen}}$      | 28 | 25.6            | 24  | 23              | 22.5  | 21.7  |
| $I_{ac \text{ 1 motor } *}$ | 12 | 7.8             | 5   | 3.36            | 2.16  | 0.96  |
| $I_{ac \text{ total}}$      | 40 | 33.4            | 29  | 26.4            | 24.7  | 22.7  |

\*See Table VI.

Les chiffres de la première ligne sont triples des valeurs du tableau IV.

$$I_{\text{crête totale}} = I_{\text{crête 3 gén}} + I_{\text{crête moteur}} = 3 \times 20,1 + 18 \cong 78 \text{ kA}.$$

Cela signifie que CB4, CB5 etc. doit avoir un pouvoir nominal de coupure de 33,4 (34) kA et un pouvoir nominal de fermeture de 78 kA.

#### 8.6 Evaluation du courant de court-circuit dans le cas d'un défaut éloigné des barres principales

Défaut au point D, calculé sans contribution de moteur. Le schéma simplifié est donné à la figure 6.

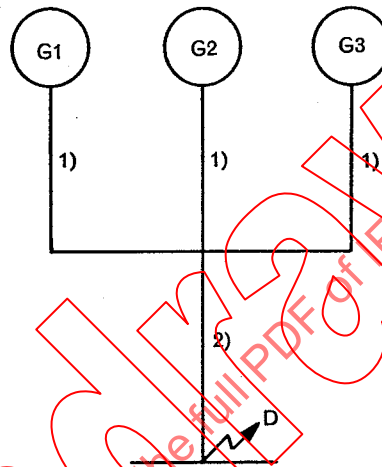


FIGURE 6

- 1) 20 m câble  $4 \times 3 \times 180 \text{ mm}^2$ ;
- 2) 100 m câble  $3 \times 180 \text{ mm}^2$ .

$$X''_{\text{gén}} = 0,0305 \Omega ; R_{\text{gén}} = 0,002 \Omega.$$

Les impédances des câbles sont les suivantes :

- câbles de 20 m venant des générateurs :  
 $X = 0,00046 \Omega ; R = 0,00065 \Omega$  ;
- câbles entre CB5 et point D  
 (100 m de  $3 \times 180 \text{ mm}^2$ ).

L'impédance totale est :

$$X = 0,0092 \Omega ; R = 0,013 \Omega ;$$

$$X_{\text{total}} = \frac{1}{3}(0,0305 + 0,00046) + 0,0092 \cong 0,0195 \Omega ;$$

$$R_{\text{total}} = \frac{1}{3}(0,002 + 0,00065) + 0,013 = 0,0139 \Omega ;$$

$$Z''_e = \sqrt{0,0195^2 + 0,0139^2} = 0,024 \Omega ;$$

$$I'_e \text{ au point D} = 260/0,024 = 11 \text{ kA à } t = 0.$$

Pour trouver  $Z'$  et  $I'$ , on doit considérer  $X''$  au lieu de  $X'$  dans la figure 6.

$$X'_{\text{total}} = \frac{1}{3}(0,041 + 0,00046) + 0,0092 = 0,0232 \Omega, \text{ et } R_{\text{total}} = 0,0139 \Omega ;$$

$$Z'_e = \sqrt{0,0232^2 + 0,0139^2} = 0,027 \Omega ;$$

$$I'_e \text{ au point D} = 260/0,027 = 9,6 \text{ kA}.$$

The figures of the first line are taken from Table IV and multiplied by three.

$$I_{\text{peak total}} = I_{\text{peak 3 gen}} + I_{\text{peak motor}} = 3 \times 20.1 + 18 \cong 78 \text{ kA.}$$

This means that CB4, CB5 etc. should have a rated breaking capacity of 33.4 (34) kA and a rated making capacity of 78 kA.

#### 8.6 Evaluation of the short-circuit current in case of fault remote from the main busbars

Fault at Point D, calculated without motor contribution. In Figure 6, the simplified scheme is given.

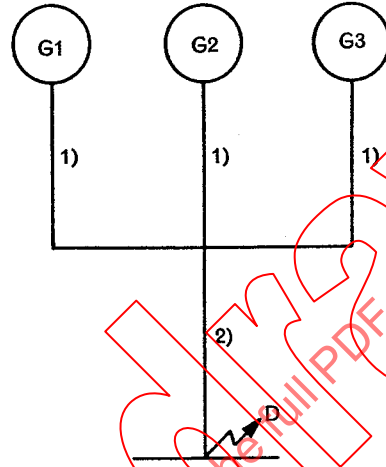


FIGURE 6

- 1) 20 m cable  $4 \times 3 \times 180 \text{ mm}^2$ .
- 2) 100 m cable  $3 \times 180 \text{ mm}^2$ .

$$X''_{\text{gen}} = 0.0305 \Omega; R_{\text{gen}} = 0.002 \Omega.$$

The impedances of the cables are the following :

- cables of 20 m coming from the generators :  
 $X = 0.00046 \Omega; R = 0.00065 \Omega;$
- cables between main switch board and section board  
 (100 m of  $3 \times 180 \text{ mm}^2$ ).

The total impedance is :

$$X = 0.0092 \Omega, R = 0.013 \Omega,$$

$$X_{\text{total}} = \frac{1}{3} (0.0305 + 0.00046) + 0.0092 \cong 0.0195 \Omega,$$

$$R_{\text{total}} = \frac{1}{3} (0.002 + 0.00065) + 0.013 = 0.0139 \Omega,$$

$$Z''_e = \sqrt{0.0195^2 + 0.0139^2} = 0.024 \Omega,$$

$$\text{For } t = 0, I''_e \text{ at point D} = 260/0.024 = 11 \text{ kA.}$$

To find  $Z'$  and  $I'$ , value  $X''$  should be taken instead of  $X'$  in Figure 6.

$$X'_{\text{total}} = \frac{1}{3} (0.041 + 0.00046) + 0.0092 = 0.0232 \Omega \text{ and } R_{\text{total}} = 0.0139 \Omega.$$

$$Z'_e = \sqrt{0.0232^2 + 0.0139^2} = 0.027 \Omega.$$

$$I'_e \text{ at point D} = 260/0.027 = 9.6 \text{ kA.}$$

Il est clair que dans ce cas, il n'est pas nécessaire d'utiliser la formule 16, mais de fixer  $I_{ac} = 11$  kA (parce que  $I'' - I'$  est très petit), ce qui ferait une valeur maximale de  $11 \sqrt{2} = 15,5$  kA.  $I_{crête \max}$  doit être en accord avec la formule 17 :

$$I_{crête \max} = I_{ac} \sqrt{2} + I_{ac} \sqrt{2} e^{-t/2 T_{dc}}$$

La nouvelle constante de temps  $T_{dc}$  doit être calculée à l'aide de la formule 15 :

$$T_{dc} = \frac{T_{dc} + \frac{X_e}{\omega R_s}}{1 + \frac{R_e}{R_s}} = \frac{0,04 + \frac{0,0092 + \frac{1}{3}(0,00046)}{2 \pi 60 \times \frac{1}{3}(0,002)}}{1 + \frac{\frac{1}{3}(0,00065) + 0,013}{0,00065}} = 0,0037 \text{ s} = 3,7 \text{ ms}$$

La composante apériodique du courant asymétrique varie comme suit avec la constante de temps de 3,7 ms.

TABEAU IX

$T_{dc} (\text{moteur}) = 3,7 \text{ ms}$ . Pour décrément, voir figure 7, page 42.

| $t$<br>ms             | $I_{dc} = f(\text{temps})$ , au point D<br>kA |
|-----------------------|-----------------------------------------------|
| 0                     | $11 \sqrt{2} = 15,5$                          |
| $\frac{1}{2} T = 8,3$ | $15,5 \times 0,1 = 1,55$                      |
| $T = 16,6$            | $15,5 \times 0,01 = 0,15$                     |

$I_{crête}$  à  $\frac{1}{2} T$  au point D, sans contribution de moteur est égale à :

$$I_{ac} \sqrt{2} + I_{dc} = 15,5 + 1,55 \cong 17 \text{ kA}$$

On voit que la composante apériodique (constante de temps de quelques ms et amplitude faible) a pratiquement disparu.

#### 8.7 Contribution des moteurs aux points D et E :

En se référant à la discussion du paragraphe 4.1 qui traite du cas d'une puissance motrice concentrée raccordée ou non aux barres principales, on suppose, comme indiqué à la figure 5, page 30, qu'un des gros moteurs (250 kVA) est connecté au tableau divisionnaire.

Pour simplifier, on prend pour ce moteur de 250 kVA les mêmes paramètres que pour le moteur imaginaire de 1 500 kVA. Tous les chiffres donnés dans les tableaux VI et VII sont donc valables à condition d'être divisés par six.

Ainsi, pour ce moteur de 250 kVA connecté au tableau divisionnaire, avec un court-circuit en D ou E, on a (voir paragraphe 8.4) :

TABEAU X

$T'_d \text{ moteur} = 20,5 \text{ ms}$ . Pour le décrément, voir figure 7.

| $t$<br>ms             | $I_{ac} \text{ moteur } 250 \text{ kVA} = f(\text{temps})$<br>kA |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------|
| 0                     | 2                                                                |
| $\frac{1}{2} T = 8,3$ | $2 \times 0,64 = 1,28$                                           |
| $T = 16$              | $2 \times 0,42 = 0,84$                                           |
| $\frac{3}{2} T = 25$  | $2 \times 0,28 = 0,56$                                           |
| $2 T = 33,2$          | $2 \times 0,18 = 0,36$                                           |
| $3 T = 50$            | $2 \times 0,08 = 0,16$                                           |

It is clear that in this case, it is not necessary to use formula 16 but to state that  $I_{ac} = 11$  kA (because the value of  $(I'' - I')$  is very small).

This would be the maximum value of  $11\sqrt{2} = 15.5$  kA.  $I_{peak \max}$  should be in accordance with formula 17.

$$I_{peak \max} = I_{ac} \sqrt{2} + I_{ac} \sqrt{2} \varepsilon^{-t/2 T_{dc}}$$

New time constant  $T_{edc}$  has to be calculated with formula 15 :

$$T_{edc} = \frac{T_{dc} + \frac{X_e}{\omega R_s}}{1 + \frac{R_e}{R_s}} = \frac{0.04 + \frac{0.0092 + \frac{1}{3}(0.00046)}{2\pi 60 \times \frac{1}{3}(0.002)}}{1 + \frac{\frac{1}{3}(0.00065) + 0.013}{0.00065}} = 0.0037 \text{ s} = 3.7 \text{ ms}$$

The d.c. component of the asymmetrical current varies with a time constant of 3.7 ms as follows :

TABLE IX

$T_{edc (\text{motor})} = 3.7$  ms. For decrement see Figure 7, page 43.

| $t$<br>ms            | $I_{dc} = f(\text{time})$ at Point D<br>kA |
|----------------------|--------------------------------------------|
| 0                    | $11\sqrt{2} = 15.5$                        |
| $\frac{1}{2}T = 8.3$ | $15.5 \times 0.1 = 1.55$                   |
| $T = 16.6$           | $15.5 \times 0.01 = 0.15$                  |

$I_{peak}$  at  $t = \frac{1}{2}T$  for Point D and without motor contribution is equal to :

$$I_{ac} \sqrt{2} + I_{dc} = 15.5 + 1.55 \cong 17 \text{ kA}$$

From this calculation, it can be seen that the d.c. component (time constants of a few ms and small amplitude) has practically disappeared.

#### 8.7 Motor contribution in Points D and E :

Now referring to the discussion under Sub-clause 4.1 dealing with concentrated or not concentrated motor power on the main busbars, it is supposed as given in Figure 5, page 31, that one of the large motors (250 kVA) is connected to the section board.

To simplify the calculation, the same parameters have been taken for the motor 250 kVA as for the imaginary motor of 1 500 kVA. This means that all values given in Tables VI and VII are valuable if divided by six.

Thus for the motor contribution of one motor of 250 kVA connected to the section board and with a short-circuit in Point D or E, the following values count (see Sub-clause 8.4) :

TABLE X

$T'_d (\text{motor}) = 20.5$  ms. For decrement see Figure 7.

| $t$<br>ms            | $I_{ac \text{ motor } 250 \text{ kVA}} = f(\text{time})$<br>kA |
|----------------------|----------------------------------------------------------------|
| 0                    | 2                                                              |
| $\frac{1}{2}T = 8.3$ | $2 \times 0.64 = 1.28$                                         |
| $T = 16$             | $2 \times 0.42 = 0.84$                                         |
| $\frac{3}{2}T = 25$  | $2 \times 0.28 = 0.56$                                         |
| $2T = 33.2$          | $2 \times 0.18 = 0.36$                                         |
| $3T = 50$            | $2 \times 0.08 = 0.16$                                         |

TABLEAU XI

$T_{dc} \text{ (moteur)} = 10 \text{ ms}$ . Pour le décroissement, voir figure 7, page 42 et paragraphe 8.4b), page 28.

| $t$<br>ms             | $I_{dc} \text{ moteur } 250 \text{ kVA} = f(\text{temps})$<br>kA |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------|
| 0                     | 2,82                                                             |
| $\frac{1}{2} T = 8,3$ | $2,82 \times 0,43 = 1,2$                                         |
| $T = 16$              | $2,82 \times 0,2 = 0,56$                                         |
| $\frac{3}{2} T = 25$  | $2,82 \times 0,09 = \text{négligeable}$                          |
| $2 T = 33,2$          | $2,82 \times 0,01 = \text{négligeable}$                          |
| $3 T = 50$            |                                                                  |

$$I_{crête \text{ max}} = I_{ac} + I_{dc} = 1,28 \sqrt{2} + 1,2 = 3 \text{ kA}.$$

$I_{ac}$  avec court-circuit au point D ou E et contribution du moteur n'est donc pas : 11 kA mais  $11 + 1,28 = 12,28 \text{ kA}$ .

$I_{crête \text{ max}}$  avec contribution du moteur, au point D ou E est :  $17 + 3 = 20 \text{ kA}$ .

Etablissons finalement un calcul avec toute la puissance motrice de 1 500 kVA concentrée sur les barres principales, avec un court-circuit en D. La contribution des moteurs est alors fortement réduite par le long câble (100 m en  $3 \times 180 \text{ mm}^2$ ).

$T_{dc} \text{ moteur} = 0,01 \text{ s}$  avec un  $\cos \phi = 0,25$ . De plus :

$$\left. \begin{aligned} Z &= 0,0216 \Omega \\ X &= 0,0209 \Omega \\ R &= 0,0055 \Omega \end{aligned} \right\} \text{ moteur } 1\,500 \text{ kVA ;}$$

$$R_{\text{câble}} = 0,013 \Omega ;$$

$$X_{\text{câble}} = 0,0092 \Omega.$$

Selon la formule 15, la nouvelle valeur de  $T_{dc}$  est :

$$T_{dc} = \frac{0,01 + (0,0092/2\pi \times 60 \times 0,0055)}{1 + (0,013/0,0055)} = 0,0043 \text{ s} = 4,3 \text{ ms}$$

Avec une constante de temps très petite (environ 4 ms), la composante apériodique diminue si rapidement qu'on peut négliger  $I_{dc}$  (voir par exemple le Tableau IX).

Selon la formule 9 :

$$I_{ac} = \frac{V_N}{Z_b} \varepsilon^{-t/T'}$$

$Z_b$  avec câble est :

$$Z_b = \sqrt{0,0209^2 + 0,0092^2} + (0,0055 + 0,013)^2 = 0,0354 \Omega$$

$$I_{ac} = \frac{0,026}{35,4} \varepsilon^{-t/T'} = 7,35 \varepsilon^{-t/T'}$$

pour  $t = \frac{1}{2} T$ :

$$I_{ac} \text{ moteur} = 7,35 \varepsilon^{-t/2 T'} = 7,35 \times 0,64 = 4,7 \text{ kA}$$

Dans ce cas, le pouvoir de coupure des disjoncteurs, ayant un temps de coupure de  $\frac{1}{2} T$  et situés en D, devrait être de  $11 + 4,7 = 15,7 \text{ kA}$  symétrique (pas de valeur asymétrique).

Il apparaît par cet exemple que, généralement, il n'est pas question de composante apériodique loin des barres omnibus. On peut facilement voir, en appliquant la formule 15 pour calculer la nouvelle constante de temps  $T_{dc}$ , si on peut négliger ou non la composante apériodique. On la néglige si  $T_{dc}$  est plus petite que 5 ms.

TABLE XI

$T_{dc (motor)} = 10$  ms. For decrement see Figure 7, page 43 and Sub-clause 8.4b), page 29.

| $t$<br>ms            | $I_{dc \text{ motor } 250 \text{ kVA}} = f(\text{time})$<br>kA |
|----------------------|----------------------------------------------------------------|
| 0                    | 2.82                                                           |
| $\frac{1}{2}T = 8.3$ | $2.82 \times 0.43 = 1.2$                                       |
| $T = 16$             | $2.82 \times 0.2 = 0.56$                                       |
| $\frac{3}{2}T = 25$  | $2.82 \times 0.09 = \text{negligible}$                         |
| $2T = 33.2$          | $2.82 \times 0.01 = \text{negligible}$                         |
| $3T = 50$            |                                                                |

$$I_{\text{peak max}} = I_{ac} + I_{dc} = 1.28 \sqrt{2} + 1.2 = 3 \text{ kA.}$$

$I_{ac}$  with motor contribution and a short-circuit in D or E is as a result of this, not 11 kA, but  $11 + 1.28 = 12.28$  kA.

With motor contribution at Point D or E,  $I_{\text{peak max}} = 17 + 3 = 20$  kA.

Finally, a calculation with all the motor power of 1 500 kVA again concentrated on the busbars and a short-circuit in Point D. The motor contribution is then strongly reduced by the long cable (100 m in  $3 \times 180 \text{ mm}^2$ ).

$T_{dc \text{ motor}} = 0.01$  s. This corresponds with a  $\cos \varphi = 0.25$ . Further on :

$$\left. \begin{aligned} Z &= 0.0216 \Omega \\ X &= 0.0209 \Omega \\ R &= 0.0055 \Omega \end{aligned} \right\} \text{motor } 1 \text{ 500 kVA,}$$

$$R_{\text{cable}} = 0.013 \Omega,$$

$$X_{\text{cable}} = 0.0092 \Omega.$$

According to formula 15, the new value of  $T_{dc}$  is :

$$T_{dc} = \frac{0.01 + (0.0092/2\pi \times 60 \times 0.0055)}{1 + (0.013/0.0055)} = 0.0043 \text{ s} = 4.3 \text{ ms}$$

From Table IX it can be concluded that with a small time constant (about 4 ms) the d.c. component decreases so fast that  $I_{dc}$  can be neglected.

According to formula 9 :

$$I_{ac} = \frac{V_N}{Z_b} \varepsilon^{-t/T'}$$

$Z_b$  with cable is :

$$Z_b = \sqrt{(0.0209 + 0.0092)^2 + (0.0055 + 0.013)^2} = 0.0354 \Omega$$

$$I_{ac} = \frac{0.026}{35.4} \varepsilon^{-t/T'} = 7.35 \varepsilon^{-t/T'}$$

for  $t = \frac{1}{2} T$  :

$$I_{ac \text{ motor}} = 7.35 \varepsilon^{-t/2T'} = 7.35 \times 0.64 = 4.7 \text{ kA}$$

In this case, the breaking capacity of the breakers, having an opening time of  $\frac{1}{2} T$  and situated in Point D should be  $11 + 4.7 = 15.7$  kA symmetrical (no asymmetrical value).

From this example, it appears that generally at a distance from the main busbars there is no question of a d.c. component.

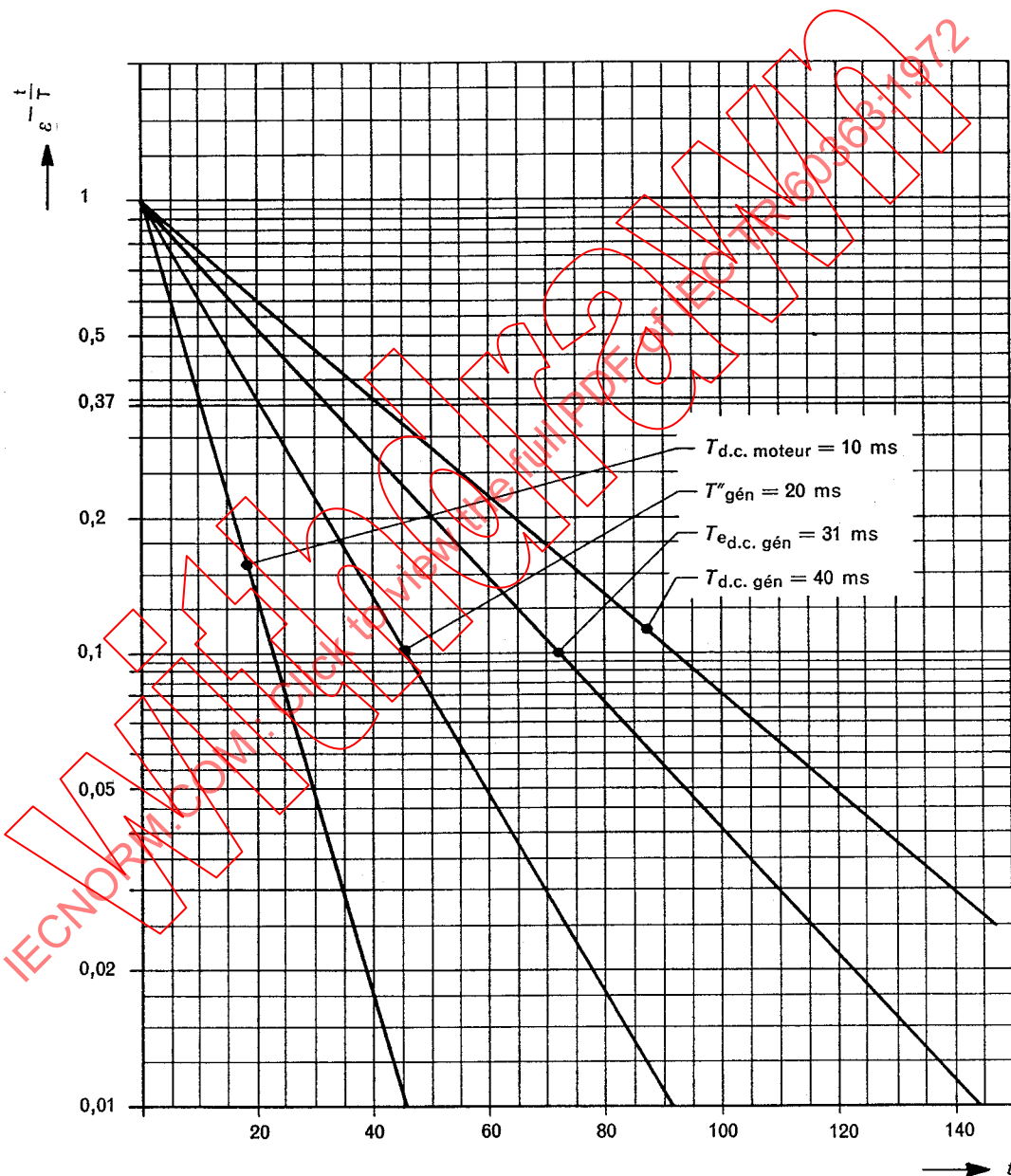
Whether or not there is a d.c. component can be easily established by using formula 15 to calculate the new time constant  $T_{dc}$ . If this value is smaller than 5 ms the d.c. component can certainly

A l'aide des formules données dans ce Rapport, on peut calculer à n'importe quel endroit, n'importe quel courant symétrique ou asymétrique.

Note. — Les valeurs de  $\varepsilon^{-t/T}$  sont lues sur un diagramme semi-logarithmique ( $t$  en abscisse linéaire,  $\varepsilon^{-t/T}$  en ordonnée logarithmique). Les courbes sont donc des lignes droites dont on connaît deux points :

- pour  $t = 0$  :  $\varepsilon^{-t/T} = 1$  ;
- pour  $t = T$  :  $\varepsilon^{-t/T} = 1/\varepsilon = 0,368$ .

La figure 7 représente un faisceau de droites  $\varepsilon^{-t/T} = f(\text{temps})$  pour le générateur et peut être tracée pour toute valeur  $T$  désirée.



Décrément  $\varepsilon^{-t/T} = f(t)$ .

FIG. 7. — Valeurs du décrément en fonction du temps.

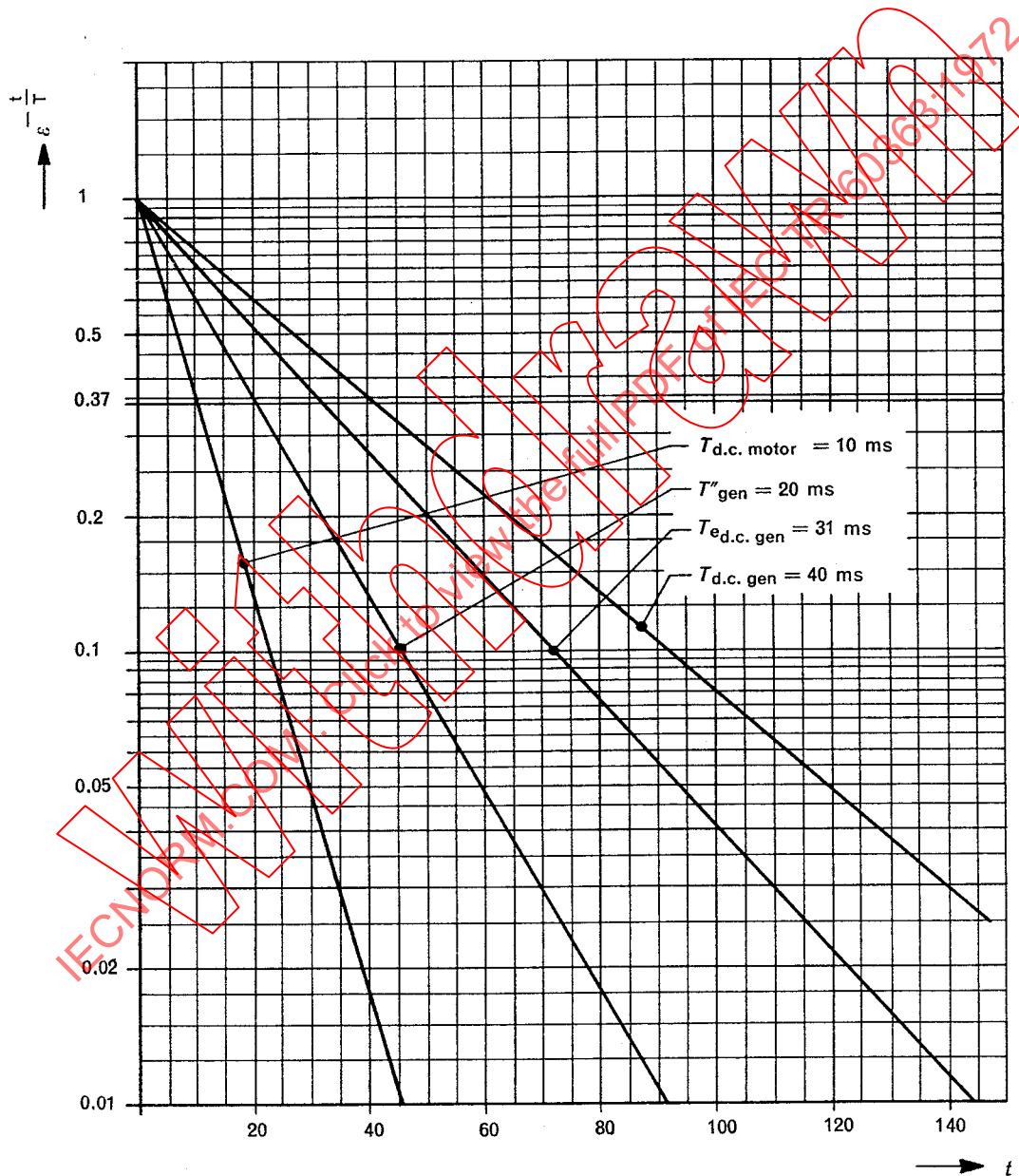
be neglected. By means of the formulae given in this Report any symmetrical or asymmetrical current at any place can be calculated.

*Note.* — The values of all the  $\varepsilon$  functions are read from a diagram. From the form  $\varepsilon^{-t/T} = f(t)$  can be inferred that  $\log \varepsilon^{-t/T}$  decreases proportionally to  $t$ .

When  $\varepsilon^{-t/T}$  is plotted to a logarithmic scale and  $t$  to a linear scale, the function  $\varepsilon^{-t/T} = f(t)$  can be represented by a straight line, of which two points are known :

- for  $t = 0$  :  $\varepsilon^{-t/T} = 1$ ,
- for  $t = T$  :  $\varepsilon^{-t/T} = 1/\varepsilon = 0.368$ .

This function can be plotted in a simple way to the above scale. This is done for the generator in Figure 7, and can be done for every value of  $T$  required.



Decrement  $\varepsilon^{-t/T} = f(t)$

FIG. 7. — Values of the decrement with the time.

## SECTION DEUX — INSTALLATIONS A COURANT CONTINU

### 9. Liste des symboles littéraux principaux

#### 9.1 Installation en général

|            |                                                                                                        |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $P$        | puissance de base, en kilowatts.                                                                       |
| $V_N$      | tension nominale, en volts.                                                                            |
| $I_N$      | courant nominal, en ampères.                                                                           |
| $i_N$      | courant nominal, en pour-cent.                                                                         |
| $I_a$      | courant de court-circuit au temps $t$ , en ampères.                                                    |
| $i_{a.r.}$ | courant de court-circuit au temps $t$ , en pour-cent.                                                  |
| $I_p$      | pointe du courant de court-circuit, en ampères.                                                        |
| $I_{p.r.}$ | pointe du courant de court-circuit, en pour-cent.                                                      |
| $L'$       | inductance initiale, en henry.                                                                         |
| $l'$       | inductance initiale, en pour-cent.                                                                     |
| $R'$       | résistance, en ohms.                                                                                   |
| $r'$       | résistance, en pour-cent.                                                                              |
| $R_e$      | résistance des connexions, en ohms.                                                                    |
| $r_e$      | résistance des connexions, en pour-cent.                                                               |
| $L_e$      | inductance des connexions, en henry.                                                                   |
| $l_e$      | inductance des connexions, en pour-cent.                                                               |
| $T_e$      | constante de temps, en secondes.                                                                       |
| $t$        | temps à partir de l'instant 0, en fonction duquel on calcule le courant de court-circuit, en secondes. |

#### 9.2 Machines

|                               |                                                                          |
|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| $P_N$                         | puissance nominale, en kilowatts.                                        |
| $E_o$                         | force électromotrice, en volts.                                          |
| $e_o = E_o/V_N$               | tension interne réduite, en pour-cent.                                   |
| $R'_d$                        | résistance transitoire de l'induit, en ohms *.                           |
| $r'_d$                        | résistance transitoire de l'induit en valeur réduite (ou en %) *.        |
| $L'_a$                        | inductance initiale de l'induit (donc non saturé), en henry.             |
| $l'_a$                        | inductance initiale de l'induit (donc non saturé) réduite, en pour-cent. |
| $T_a = L'_a/R'_d = l'_a/r'_d$ | constante de temps de l'induit, en secondes.                             |

*Note.* — On emploie la formule suivante pour obtenir la valeur réduite en pour-cent à partir des valeurs actuelles des résistances  $R$  :

$$r = R \frac{P}{V_N^2}, \text{ en pour-cent}$$

$$\text{de même pour l'inductance : } l = L \frac{P}{V_N^2}$$

On obtient le courant de court-circuit en multipliant le courant réduit à l'unité par le courant nominal  $I_N$ .  
On passe de l'une à l'autre des valeurs réduites à l'unité par la relation :

$$r_{II} = r_I \frac{P_{II}}{P_I}$$

où les indices I et II indiquent respectivement la valeur connue et celle à calculer, à partir de la puissance de base.

\* La résistance transitoire qui correspond à la pointe du courant de court-circuit comprend toutes les résistances de la machine qui limitent le courant et tient compte du décretement du flux d'entrefer jusqu'au moment de la pointe de court-circuit. Ainsi  $V_N$  peut être considéré comme constant jusqu'au moment de la pointe de court-circuit.

## SECTION TWO — D.C. PLANTS

### 9. List of main letter symbols

#### 9.1 Plants in general

|            |                                                                                                                  |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $P$        | basic power, in kilowatts.                                                                                       |
| $V_N$      | rated voltage, in volts.                                                                                         |
| $I_N$      | rated current, in amperes.                                                                                       |
| $i_N$      | rated current, in percent.                                                                                       |
| $I_a$      | short-circuit current at time $t$ , in amperes.                                                                  |
| $i_{a.r.}$ | short-circuit current at time $t$ , in percent.                                                                  |
| $I_p$      | short-circuit current peak value, in amperes.                                                                    |
| $I_{p.r.}$ | short-circuit current peak value, in percent.                                                                    |
| $L'$       | initial inductance, in henry.                                                                                    |
| $l'$       | initial inductance, in percent.                                                                                  |
| $R'$       | resistance, in ohms.                                                                                             |
| $r'$       | resistance, in percent.                                                                                          |
| $R_e$      | resistance of connections, in ohms.                                                                              |
| $r_e$      | resistance of connections, in percent.                                                                           |
| $L_e$      | inductance of connections, in henry.                                                                             |
| $l_e$      | inductance of connections, in percent.                                                                           |
| $T_e$      | time constant, in seconds.                                                                                       |
| $t$        | time taken from the instant zero, in correspondence of which the short-circuit current is calculated in seconds. |

#### 9.2 Machines

|                               |                                                             |
|-------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| $P_N$                         | rated power in kilowatts.                                   |
| $E_o$                         | internal voltage, in volts.                                 |
| $e_o = E_o/V_N$               | internal voltage, in percent.                               |
| $R'_d$                        | armature transient resistance, in ohms *.                   |
| $r'_d$                        | armature transit resistance per unit (or in %) *.           |
| $L'_a$                        | initial (or non-saturated) armature inductance, in henry.   |
| $l'_a$                        | initial (or non-saturated) armature inductance, in percent. |
| $T_a = L'_a/R'_d = l'_a/r'_d$ | armature time constant, in seconds.                         |

*Note.* — The following formula is used to obtain the per cent value from the actual values of resistances  $R$  :

$$r = R \frac{P}{V_N^2} \text{ in percent,}$$

$$\text{similarly for inductance } l = L \frac{P}{V_N^2}$$

The short-circuit current is obtained by multiplying the current per unit values by the rated current  $I_N$ . By means of the following formula, it is possible to obtain one per unit value from another :

$$r_{II} = r_I \frac{P_{II}}{P_I}$$

where I and II in symbols indicate respectively the known per unit value and the per unit value to be calculated, referred to the base power.

\* The transient resistance is that value of resistance which occurs at the short-circuit peak current, includes all the various resistances of the machines limiting the current flow, and takes into account the decrement of the air gap flux up to the instant of the peak of short-circuit current. Thus the voltage  $V_N$  may be regarded as constant up to the instant of the peak of short-circuit current.

## 10. Court-circuit aux bornes du générateur c.c.

Les caractéristiques et la crête de courant de court-circuit du générateur qui fonctionnait sous charge nominale \* sont exprimées par les formules données plus loin.

Le décrétement qui se produit après que le courant a atteint sa valeur de crête n'a pas d'intérêt en ce qui concerne le choix des disjoncteurs de l'installation.

### 10.1 Valeur de crête du courant de court-circuit

$$I_{pr} = \frac{e_o}{r_d}, \% \quad (21)$$

### 10.2 Valeurs du courant de court-circuit jusqu'à la valeur de crête \*\*

$$i_{a.r.} = I_{p.r.} (1 - e^{-t/T_a}), \% \quad (22)$$

où :

$$T_a = \frac{L'_a}{R'_d} = \frac{l'_a}{r_d}, \text{ en secondes} \quad (23)$$

## 11. Court-circuit aux bornes d'un moteur

On utilise les mêmes formules 21, 22 et 23 que pour les générateurs c.c.

## 12. Court-circuit éloigné des bornes des machines électriques

Quand un court-circuit se produit loin des bornes d'une machine électrique (génératrice et moteur), on doit ajouter aux valeurs internes les résistances et les inductances externes.

On utilise alors les formules 24, 25 et 26, au lieu de 21, 22 et 23.

### 12.1 Valeur de crête du courant de court-circuit

$$I_{p.r.} = \frac{e_o}{r_d + r_e}, \% \quad (24)$$

### 12.2 Valeurs du courant de court-circuit jusqu'à la valeur de crête

$$i_{a.r.} = I_{p.r.} (1 - e^{-t/T_e}), \% \quad (25)$$

où :

$$T_e = \frac{L'_a + L_e}{R'_d + R_e} = \frac{l'_a + l_e}{r_d + r_e} \text{ s} \quad (26)$$

## 13. Court-circuit dans une installation

Le cas de court-circuit le plus complexe se produit quand ce court-circuit est alimenté par un certain nombre de générateurs et de moteurs de l'installation.

On doit faire le calcul du courant de court-circuit aux différents points suivants de l'installation :

- aux bornes des machines (point A, figure 9, page 59) en prenant en considération les résistances transitoires et les inductances initiales des induits seulement ;
- sur les câbles de sortie de chaque machine (point A', figure 9) en considérant les inductances et résistances des machines et des câbles jusqu'au point considéré ;
- sur les câbles sortant du tableau principal juste après le disjoncteur de protection (point B, figure 9) en additionnant les contributions des moteurs et des générateurs (calculées séparément) figure 12, page 62 ;
- sur les câbles sortant des tableaux secondaires (point C, figure 9).

\* Pour le court-circuit, la charge nominale constitue la situation la plus défavorable. Les formules de ce rapport sont basées sur quelques simplifications et négligent l'action du régulateur, s'il y en a un.

\*\* Le courant transitoire dépend, en fait, de la constante de temps qui n'est que grossièrement égale à  $T_a$ .

## 10. Short-circuit at the terminals of a d.c. generator

The characteristics and the short-circuit current peak value of a d.c. generator previously running at rated load \* are expressed by means of the formulae given below.

The decrement which occurs after the current has attained the peak value is not of interest as regards the choice of the circuit-breakers in the installation.

### 10.1 Short-circuit current peak value

$$I_{pr} = \frac{e_o}{r'_d}, \% \quad (21)$$

### 10.2 Short-circuit current characteristics up to peak value \*\*

$$i_{a.r.} = I_{p.r.} (1 - e^{-t/T_a}), \% \quad (22)$$

where :

$$T_a = \frac{L'_a}{R'_d} = \frac{l'_a}{r'_d}, \text{ in seconds} \quad (23)$$

## 11. Short-circuit at the terminals of a motor

The characteristics and the short-circuit current peak value of a motor are also expressed by formulae (21), (22) and (23) used for a d.c. generator.

## 12. Short-circuit far from the terminals of electrical machines

When a short-circuit occurs at a distance remote from the terminals of electric machines (generators and motors), external resistances and inductances are to be added in the internal ones.

The formulae 24, 25 and 26 are used instead of 21, 22, 23 respectively.

### 12.1 Short-circuit current peak value

$$I_{p.r.} = \frac{e_o}{r'_d + r'_e}, \% \quad (24)$$

### 12.2 Short-circuit current characteristics up to peak value

$$i_{a.r.} = I_{p.r.} (1 - e^{-t/T_e}), \% \quad (25)$$

where :

$$T_e = \frac{L'_a + L_e}{R'_d + R_e} = \frac{l'_a + l_e}{r'_d + r_e} \text{ s} \quad (26)$$

## 13. Short-circuit in an installation

The most complex case of short-circuit occurs when a number of generators and motors exist in an installation all feeding the short-circuit.

The calculation of the short-circuit current at the different points of an installation is to be made :

- at the terminals of machines : (Point A, Figure 9, page 59) taking into consideration only transient resistances and initial inductances in the armature circuits ;
- on the outgoing feeders of each machine : (Point A', Figure 9) considering the inductances and resistances of the machines and feeders as far as the point involved ;
- on the main switchboard outgoing feeders just after the protection breaker (Point B, Figure 9) by adding the contribution of motors and generators (calculated separately) Figure 12, page 62 ;
- on the sub-switchboard outgoing feeders (Point C, Figure 9).

\* The rated load condition is taken to be the most unfavourable with respect to short-circuit. The formulae in this report are based on some simplifications and neglecting the action of voltage regulator, if any.

\*\* The transient current is in fact controlled by a time constant which can only roughly be supposed equal to  $T_a$ .

On peut faire ce calcul en supposant seulement que le courant total de ce court-circuit au point B correspond à celui d'un générateur équivalent de tension  $V_N$  et ayant un courant de court-circuit égal à la somme de la contribution de tous les générateurs et moteurs considérés (figure 12, page 62).

La résistance des connexions peut avoir un effet déterminant sur les valeurs à calculer ; d'autre part, on ne peut calculer la constante de temps de toute la partie amont de l'installation qu'avec des hypothèses simplificatrices.

Dans la plupart des cas, il est suffisant, en pratique, de calculer seulement la valeur de crête  $I_p$ , en déterminant la résistance totale  $R'_C$  ou  $r'_C$  comme la somme de  $R'_B$  ou  $r'_B$  (correspondant à la crête du courant de court-circuit au point B) et de la résistance des connexions  $R_e$  ou  $r_e$ .

S'il s'avère nécessaire de calculer la caractéristique du courant, on le fera comme pour l'exemple suivant.

#### 14. Calcul au moyen de coefficients

##### 14.1 Court-circuit aux bornes d'un générateur ou d'un moteur

Quand on ne dispose pas des valeurs de la résistance transitoire  $R'_d$  et de l'inductance  $L'_a$ , on peut faire le calcul à l'aide des valeurs des figures 10, 13 et 14, pages 60, 63 et 64.

##### 14.1.1 Valeur de crête

$$I_{p.r.} = \frac{e_0}{r'_d} \% \quad (27)$$

où :

$r'_d$  = la résistance transitoire, en pour-cent, extraite de la figure 10 en fonction du produit de la puissance nominale, en kilowatts, par la vitesse angulaire en tour/minute.

##### 14.1.2 Caractéristique jusqu'à la valeur de crête

$$I_{a.r.} = d I_{p.r.} \% \quad (28)$$

où :

$d = 1 - e^{-t/T_a}$  le facteur multiplicateur tiré, soit du tableau XII, ci-après, soit de la figure 11, page 61, en fonction du rapport  $\frac{t}{T_a}$ .

TABLEAU XII  
Facteur multiplicateur  $d$

| $\frac{t}{T_a}$ | 0 | 0,1   | 0,2   | 0,5   | 1,0   | 1,5   | 2     | 3    | 4     | 5     |
|-----------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| $d$             | 0 | 0,095 | 0,181 | 0,394 | 0,632 | 0,777 | 0,865 | 0,95 | 0,982 | 0,993 |

$$T_a = \frac{L'_a}{R'_d} = \frac{l'_a}{r'_d} \text{ constante de temps de l'induit, en secondes}$$

$$L'_a = C V_N^2 \text{ inductance initiale, en henry}$$

où  $C$  facteur multiplicateur tiré des figures 13 et 14, pages 63 et 64.

##### 14.2 Court-circuit loin des bornes des machines

On doit faire le calcul, comme indiqué aux articles 12 et 13.

This calculation can be made assuming only that the total short-circuit current at Point B corresponds to that of one equivalent generator having a voltage  $V_N$  and a short-circuit current equal to the sum of the contributions of all the generators and motors considered (Figure 12, page 62).

The resistance of connections can have a determining effect upon the values to be calculated ; also, the calculation of the time constant of the whole part of the installation located on the source side can only be made by means of simplifying assumptions.

In practice, it is sufficient in most cases to calculate only the peak value  $I_p$  by determining the total resistance  $R'_C$  or  $r'_C$  as the sum of resistance  $R'_B$  or  $r'_B$  (corresponding to the peak value of the short-circuit current at Point B) and of the resistance of connections  $R_e$  or  $r_e$ .

If it is necessary to determine also the current characteristic, the calculation could be made as shown in the following example.

#### 14. Calculation by means of coefficients

##### 14.1 Short-circuit at the terminals of a generator or of a motor

When the transient resistance  $R'_d$  and inductance  $L'_a$  values are not available, the calculation can be made using the values of the Figures 10, 13 and 14 on pages 60, 63 and 64 respectively.

##### 14.1.1 Peak value

$$I_{p.r.} = \frac{e_0}{r'_d} \% \quad (27)$$

where :

$r'_d$  = the armature transient resistance, in per cent, drawn from the diagram of Figure 10 in function of the product of rated power in kilowatts by angular velocity in revolutions per minute.

##### 14.1.2 Characteristics up to peak value

$$i_{a.r.} = d I_{p.r.} \% \quad (28)$$

where :

$d = 1 - e^{-t/T_a}$  is the multiplication factor drawn either from Table XII below, or from Figure 11, page 61 in function of ratio  $\frac{t}{T_a}$ .

TABLE XII  
Multiplying factor  $d$

| $\frac{t}{T_a}$ | 0 | 0.1   | 0.2   | 0.5   | 1.0   | 1.5   | 2     | 3    | 4     | 5     |
|-----------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| $d$             | 0 | 0.095 | 0.181 | 0.394 | 0.632 | 0.777 | 0.865 | 0.95 | 0.982 | 0.993 |

$$T_a = \frac{L'_a}{R'_d} = \frac{l'_a}{r'_d} \quad \text{armature time constant, in seconds}$$

$$L'_a = C V_N^2 \quad \text{initial armature inductance, in henry}$$

where  $C$  is a multiplying factor drawn from Figures 13 and 14, pages 63 and 64.

##### 14.2 Short-circuit far from the machine terminals

Calculation is to be made as described in Clauses 12 and 13.

## 15. Exemple de calcul

### 15.1 Données

L'exemple donné ici est hypothétique et ne représente aucune installation existante. Il ne sert qu'à expliquer comment on utilise les diverses formules pour calculer le courant de court-circuit aux points A, A', B, C de l'installation de la figure 9, page 59.

#### a) Pour les générateurs

|                                                 |                                     |
|-------------------------------------------------|-------------------------------------|
| — Nombre en parallèle                           | $N = 2$                             |
| — Puissance nominale                            | $P_g = 200 \text{ kW}$              |
| — Puissance *                                   | $P = 200 \text{ kW}$                |
| — Courant                                       | $I = 870 \text{ A}$                 |
| — Tension                                       | $V_N = 230 \text{ V}$               |
| — Force électromotrice                          | $e_o = 1,03\%$                      |
| — Courant nominal                               | $I_N = 870 \text{ A}$               |
| — Vitesse nominale de rotation                  | $n = 350 \text{ tr/min}$            |
| — Nombre de pôles                               | $p = 8$                             |
| — Enroulement de commutation                    | aucun                               |
| — Produit : puissance $\times$ vitesse          | $P_g n = 70\,000 \text{ kW tr/min}$ |
| — Résistance transitoire de l'induit            | $r'_d = 0,12\%$                     |
|                                                 | $R'_d = 0,0315 \Omega$              |
| — Inductance initiale (non saturée) de l'induit | $L'_a = 0,001 \text{ H}$            |
|                                                 | $l'_a = 0,00378\%$                  |

#### b) Pour les moteurs

|                                                                                                           |                                                   |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| — Puissance des moteurs supposés en service au moment du court-circuit égale à 60% de la puissance totale | $P_m = 255 \text{ kW}$                            |
| — Puissance moyenne des moteurs **                                                                        | $P_{ma} = 15 \text{ kW}$                          |
| — Tension interne (moyenne)                                                                               | $e_o = 0,93\%$                                    |
| — Courant total nominal                                                                                   | $I_m = 1\,100 \text{ A}$                          |
| — Vitesse nominale de rotation (valeur moyenne)                                                           | $n = 1\,500 \text{ tr/min}$                       |
| — Nombre de pôles                                                                                         | $p = 4$                                           |
| — Produit puissance $\times$ vitesse                                                                      | $P_{ma} n = 22\,500 \text{ kW tr/min}$            |
| — Résistance transitoire du circuit de l'induit                                                           | $r'_d = 0,127\% \dagger$                          |
|                                                                                                           | $R'_{dm} = r'_d \frac{V_N^2}{P_m} = 0,027 \Omega$ |
|                                                                                                           | $r'_m = r'_d \frac{P}{P_m} = 0,1\%$               |
| — Inductance initiale du circuit de l'induit                                                              | $L'_{am} = C V_N^2 = 0,000\,245 \text{ H}$        |
|                                                                                                           | $l'_{am} = 0,0012\% \dagger$                      |

#### c) Pour les connexions

|                      |                                                                   |
|----------------------|-------------------------------------------------------------------|
| — Câble 1 (figure 9) | $l'_m = 0,000\,94\% \dagger\dagger$                               |
| — Longueur           | $2 \times 15 \text{ m}$                                           |
| — Section            | 4 câbles en parallèle, de $1 \times 160 \text{ mm}^2$ (par phase) |

\* Cette valeur peut être choisie arbitrairement ; on la prend cependant habituellement égale à la puissance d'un générateur.

\*\* Quand on ne connaît pas les caractéristiques de chaque moteur, il est recommandé de définir la puissance moyenne afin de tirer les valeurs de  $r'_d$  des courbes de la figure 10, page 60.

$\dagger$  Rapporté à  $P_m$ .

$\dagger\dagger$  Rapporté à  $P = 200 \text{ kW}$ .

## 15. Example of calculation

### 15.1 Data

The example given below serves only to explain how the various formulae are used for the calculation of the short-circuit current at Points A, A', B and C of the installation shown in Figure 9, page 59. This example is hypothetical and does not represent any existing installation :

#### a) For the generators

|                                                     |                                                |
|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| — Number of generators running in parallel          | $N = 2$                                        |
| — Rated power                                       | $P_g = 200 \text{ kW}$                         |
| — Power *                                           | $P = 200 \text{ kW}$                           |
| — Current                                           | $I = 870 \text{ A}$                            |
| — Voltage                                           | $V_N = 230 \text{ V}$                          |
| — Internal voltage                                  | $e_o = 1.03\%$                                 |
| — Rated current                                     | $I_N = 870 \text{ A}$                          |
| — Rated speed of rotation                           | $n = 350 \text{ rev/min}$                      |
| — Number of poles                                   | $p = 8$                                        |
| — Polyphase winding                                 | none                                           |
| — Power $\times$ speed of rotation product          | $P_g n = 70\,000 \text{ kW rev/min}$           |
| — Armature circuit transient resistance             | $r'_d = 0.12\%$<br>$R'_d = 0.0315 \Omega$      |
| — Armature circuit initial non-saturated inductance | $L'_a = 0.001 \text{ H}$<br>$l'_a = 0.00378\%$ |

#### b) For the motors

|                                                                                                                                     |                                                                               |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| — Power of the motors assumed in service at the instant when the short-circuit occurs equal to 60% of the total power of generators | $P_m = 255 \text{ kW}$                                                        |
| — Average power of the motors **                                                                                                    | $P_{ma} = 15 \text{ kW}$                                                      |
| — Machine internal voltage (average value)                                                                                          | $e_o = 0.93\%$                                                                |
| — Total rated current                                                                                                               | $I_m = 1\,100 \text{ A}$                                                      |
| — Rated speed of rotation (average value)                                                                                           | $n = 1\,500 \text{ rev/min}$                                                  |
| — Number of poles                                                                                                                   | $p = 4$                                                                       |
| — Power $\times$ rev/min product                                                                                                    | $P_{ma} n = 22\,500 \text{ kW rev/min}$                                       |
| — Armature circuit transient resistance                                                                                             | $r'_d = 0.127\% \dagger$<br>$R'_{dm} = r'_d \frac{V_N^2}{P_m} = 0.027 \Omega$ |
|                                                                                                                                     | $r'_m = r'_d \frac{P}{P_m} = 0.1\%$                                           |
| — Armature circuit initial inductance                                                                                               | $L'_{am} = C V_N^2 = 0.000\,245 \text{ H}$<br>$l'_{am} = 0.0012\% \dagger$    |

#### c) For connections

|                      |                                                            |
|----------------------|------------------------------------------------------------|
| — Cable 1 (Figure 9) | $l'_m = 0.000\,94\% \dagger\dagger$                        |
| — Length             | $2 \times 15 \text{ m}$                                    |
| — Cross-section area | 4 parallel cables, $1 \times 160 \text{ mm}^2$ (per phase) |

\* This value can be chosen arbitrarily : usually, however, it is assumed equal to the power of one generator.

\*\* When the characteristics of each motor are not known it is advisable to define the average power value in order to obtain the value of  $r'_d$  from the curves on Figure 10, page 60.

$\dagger$  Referred to  $P_m$ .

$\dagger\dagger$  Referred to  $P = 200 \text{ kW}$ .

|                              |                                                         |
|------------------------------|---------------------------------------------------------|
| — Résistance                 | $R_{e_1} = 0,001\ 04\ \Omega$                           |
|                              | $r_{e_1} = R_{e_1} \frac{P}{V_N^2} = 0,0039\%$          |
| — Inductance                 | $L'_{e_1} = 0,002 \times 10^{-3}\ \text{H}$             |
| — Câble 2 (figure 9) page 59 | $l'_{e_1} = \frac{L_{e_1} P}{V_N^2} = 0,000\ 007\ 58\%$ |
| — Longueur                   | $2 \times 40\ \text{m}$                                 |
| — Section                    | $1 \times 160\ \text{mm}^2\ (\text{par phase})$         |
| — Résistance                 | $R_{e_2} = 0,011\ \Omega$                               |
|                              | $r_{e_2} = R_{e_2} \frac{P}{V_N^2} = 0,041\%$           |
| — Inductance                 | $L_{e_2} = 0,02 \times 10^{-3}\ \text{H}$               |
|                              | $l_{e_2} = 0,000\ 07\%$                                 |

## 15.2 Courant de court-circuit aux bornes du générateur au point A

Note. — Le calcul n'est mené que pour la contribution du générateur. S'il est nécessaire d'avoir le court-circuit total en A, il sera nécessaire d'ajouter la contribution des autres machines.

### 15.2.1 Valeurs de crête

On tire de la formule 1 :

$$I_{p.r.} = \frac{e_o}{r'_d} = \frac{1,03}{0,12} = 8,6\%$$

$$I_{p.A.} = I_{p.r.} I = 8,6 \times 0,87 \approx 7,5\ \text{kA}$$

### 15.2.2 Caractéristiques jusqu'à la valeur de crête

On tire de la formule 2 :

$$T_a = \frac{l_a}{r_a} = \frac{0,003\ 78}{0,12} = 0,032\ \text{s} = 32\ \text{ms}$$

$$i_{a.r.} = 8,6 (1 - e^{-t/0,032})\%$$

Cette valeur varie comme suit, en fonction du temps :

TABLEAU XIII

| $t$<br>s                | 0 | 0,001 | 0,002 | 0,005 | 0,010 | 0,02  | 0,04 | 0,06 | 0,08 | 0,10 | 0,12 | 0,14 | 0,16 |
|-------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\frac{t}{T_a} \approx$ | 0 | 0,031 | 0,063 | 0,156 | 0,312 | 0,624 | 1,25 | 1,87 | 2,50 | 3,12 | 3,75 | 4,37 | 5,00 |
| $i_{a.r.} \approx$<br>% | 0 | 0,266 | 0,525 | 1,25  | 2,30  | 4,00  | 6,15 | 7,25 | 7,90 | 8,20 | 8,35 | 8,50 | 8,55 |
| $i_a \approx$<br>kA     | 0 | 0,23  | 0,46  | 1,10  | 2,00  | 3,50  | 5,30 | 6,35 | 6,90 | 7,13 | 7,26 | 7,40 | 7,45 |

## 15.3 Court-circuit au point B

### 15.3.1 Contribution des générateurs au point B

a) Valeur de crête

$$I_{p.r.} = \frac{e_o}{r'_d + r_{e_1}} = \frac{1,03}{0,12 + 0,0039} = 8,3\%$$

$$I_{p.A.} = I'_{p.r.} I = 8,3 \times 0,87 \approx 7,2\ \text{kA}$$