

**RAPPORT
TECHNIQUE
TECHNICAL
REPORT**

**CEI
IEC
871-3**

Première édition
First edition
1996-02

**Condensateurs shunt pour réseaux
à courant alternatif de tension assignée
supérieure à 1 000 V –**

**Partie 3:
Protection des condensateurs shunt et
des batteries de condensateurs shunt**

**Shunt capacitors for a.c. power systems
having a rated voltage above 1 000 V –**

**Part 3:
Protection of shunt capacitors and
shunt capacitor banks**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 871-3: 1996

Validité de la présente publication

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

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

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

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

Terminologie

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

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

Symboles graphiques et littéraux

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

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

et pour les appareils électromédicaux,

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

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

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

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

Validity of this publication

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

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

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

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

Terminology

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

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

Graphical and letter symbols

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

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

and for medical electrical equipment,

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

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

IEC publications prepared by the same technical committee

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

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

**CEI
IEC
871-3**

Première édition
First edition
1996-02

**Condensateurs shunt pour réseaux
à courant alternatif de tension assignée
supérieure à 1 000 V –**

**Partie 3:
Protection des condensateurs shunt et
des batteries de condensateurs shunt**

**Shunt capacitors for a.c. power systems
having a rated voltage above 1 000 V –**

**Part 3:
Protection of shunt capacitors and
shunt capacitor banks**

© CEI 1996 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

T

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

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS.....	4
Articles	
1 Domaine d'application	8
2 Références normatives	8
3 Définitions.....	8
4 Fusibles internes.....	10
5 Fusibles externes.....	12
6 Détection de déséquilibre.....	20
7 Surintensité.....	26
8 Surtension et creux de tension	30
9 Autres protections	30
10 Sécurité	36
Annexe A – Bibliographie	50

CONTENTS

	Page
FOREWORD.....	5
Clause	
1 Scope	9
2 Normative references	9
3 Definitions.....	9
4 Internal fuses	11
5 External fuses	13
6 Unbalance detection.....	21
7 Overload current	27
8 Over and undervoltage	31
9 Other protection	31
10 Safety	37
Annex A – Bibliography	50

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

CONDENSATEURS SHUNT POUR RÉSEAUX À COURANT ALTERNATIF DE TENSION ASSIGNÉE SUPÉRIEURE À 1 000 V –

Partie 3: Protection des condensateurs shunt et des batteries de condensateurs shunt

AVANT-PROPOS

- 1) La CEI (Commission Electrotechnique Internationale) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI, entre autres activités, publie des Normes Internationales. Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI concernant les questions techniques, représentent, dans la mesure du possible un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les documents produits se présentent sous la forme de recommandations internationales. Ils sont publiés comme normes, rapports techniques ou guides et agréés comme tels par les Comités nationaux.
- 4) Dans le but d'encourager l'unification internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent à appliquer de façon transparente, dans toute la mesure possible, les Normes internationales de la CEI dans leurs normes nationales et régionales. Toute divergence entre la norme CEI et la norme nationale ou régionale correspondante doit être indiquée en termes clairs dans cette dernière.
- 5) La CEI n'a fixé aucune procédure concernant le marquage comme indication d'approbation et sa responsabilité n'est pas engagée quand un matériel est déclaré conforme à l'une de ses normes.
- 6) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Norme internationale peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

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

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

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

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**SHUNT CAPACITORS FOR AC POWER SYSTEMS HAVING
A RATED VOLTAGE ABOVE 1 000 V –****Part 3: Protection of shunt capacitors and
shunt capacitor banks**

FOREWORD

- 1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, the IEC publishes International Standards. Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. The IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, express as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested National Committees.
- 3) The documents produced have the form of recommendations for international use and are published in the form of standards, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.
- 5) The IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with one of its standards.
- 6) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this International Standard may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

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

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

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

La CEI 871-3, rapport technique de type 2, a été établie par le comité d'études 33 de la CEI: Condensateurs de puissance.

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

CD	Rapport de vote
33(Sec)167	33(Sec)197

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

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

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

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

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

IEC 871-3, which is a technical report of type 2, has been prepared by IEC technical committee 33: Power capacitors.

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

CD	Report on voting
33(Sec)167	33(Sec)197

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

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

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

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

Annex A is for information only.

CONDENSATEURS SHUNT POUR RÉSEAUX À COURANT ALTERNATIF DE TENSION ASSIGNÉE SUPÉRIEURE À 1 000 V –

Partie 3: Protection des condensateurs shunt et des batteries de condensateurs shunt

1 Domaine d'application

Le présent rapport technique donne des indications sur la protection des batteries équipées de relaiage de déséquilibre et autres dispositifs. Il s'applique aux condensateurs faisant l'objet de la CEI 871-1, et de son amendement 1.

2 Références normatives

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

CEI 99-4: 1991, *Parafoudres – Partie 4: Parafoudres à oxyde métallique sans éclateur pour réseaux à courant alternatif*

CEI 185: 1987, *Transformateurs de courant*
Modification n° 1 (1990)

CEI 186: 1987, *Transformateurs de tension*
Modification n° 1 (1988)

CEI 549: 1976, *Coupe-circuit à fusibles haute tension destinés à la protection externe des condensateurs de puissance en dérivation*

CEI 593: 1977, *Coupe-circuit internes et déconnecteurs internes à surpression pour condensateurs shunt*
Modification n° 2 (1986)

CEI 871-1: 1987, *Condensateurs shunt destinés à être installés sur des réseaux à courant alternatif de tension assignée supérieure à 1 000 V – Partie 1: Généralités – Caractéristiques fonctionnelles, essais et valeurs assignées – Règles de sécurité – Guide d'installation et d'exploitation*
Amendement 1 (1991)

3 Définitions

Pour les besoins du présent rapport technique, les définitions contenues dans les références normatives ci-dessus s'appliquent.

SHUNT CAPACITORS FOR AC POWER SYSTEMS HAVING A RATED VOLTAGE ABOVE 1 000 V –

Part 3: Protection of shunt capacitors and shunt capacitor banks

1 Scope

This technical report gives guidance on the protection of banks with unbalance relaying and other devices. It applies to capacitors according to IEC 871-1, and its amendment 1.

2 Normative references

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

IEC 99-4: 1991, *Surge arresters – Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems*

IEC 185: 1987, *Current transformers*
Amendment No. 1 (1990)

IEC 186: 1987, *Voltage transformers*
Amendment No. 1 (1988)

IEC 549: 1976, *High-voltage fuses for the external protection of shunt power capacitors*

IEC 593: 1977, *Internal fuses and internal overpressure disconnectors for shunt capacitors*
Amendment No. 2 (1986)

IEC 871-1: 1987, *Shunt capacitors for a.c. power systems having a rated voltage above 1 000 V – Part 1: General – Performance, testing and rating – Safety requirements – Guide for installation and operation*
Amendment 1 (1991)

3 Definitions

For the purposes of this technical report, the definitions contained in the above normative references apply.

4 Fusibles internes

4.1 Généralités

Les fusibles internes pour condensateurs shunt sont des fusibles limiteurs de courant, sélectifs, placés à l'intérieur d'un condensateur. Comme cela est défini dans la CEI 593, ils sont conçus pour isoler les éléments d'un condensateur ou le condensateur unitaire en défaut, et permettre ainsi le maintien en service de la partie saine de cette unité et de la batterie à laquelle celle-ci est raccordée.

Le fonctionnement d'un fusible interne est déclenché par le claquage d'un élément de condensateur. L'élément affecté est instantanément déconnecté par la fusion de son fusible, sans interrompre le fonctionnement du condensateur.

Il convient que le nombre de condensateurs extérieurs connectés en parallèle, ainsi que le courant de court-circuit délivré par le réseau, n'affectent pas la limitation de courant des fusibles internes.

Il convient de noter que les fusibles internes n'assurent pas la protection contre un court-circuit entre les connexions internes, ou contre un court-circuit entre les parties actives et la cuve, qui peuvent l'un ou l'autre provoquer la rupture de la cuve.

4.2 Caractéristiques des fusibles

4.2.1 Courant assigné

Il n'existe pas de définition ni de méthode d'essai concernant les fusibles des éléments.

Les fusibles des éléments sont généralement conçus pour des courants beaucoup plus élevés que le courant maximal admissible de l'élément. Ils sont supposés déconnecter les seuls éléments en défaut. Ces derniers, ainsi que leurs fusibles ne sont pas destinés à être remplacés.

4.2.2 Aptitude à la décharge assignée

La CEI 593 et la CEI 871-1 spécifient que le condensateur soit soumis à cinq décharges non amorties, à partir d'une charge sous tension continue de $2,5 U_N$. Pour des applications particulières, pour lesquelles les courants d'appel et/ou les tensions de crête sont limitées, des prescriptions de décharges plus faibles s'appliquent.

4.2.3 Aptitude à la déconnexion

Les prescriptions et les procédures d'essais sont données dans la CEI 593. Ces essais vérifient que le fusible a une action de limitation de courant.

4.2.4 Aptitude de tenue en tension après fonctionnement

Les prescriptions et les procédures d'essais sont données dans la CEI 593.

4.3 Influence de la configuration des éléments sur la vie du condensateur

4.3.1 Condensateur avec tous les éléments connectés en parallèle

Après le claquage d'un élément, le fusible correspondant fond en moins d'une milliseconde, du fait du courant de décharge provenant des éléments connectés en parallèle, des condensateurs et du courant à fréquence industrielle du réseau. Le condensateur peut, cependant, continuer à fonctionner avec une puissance réactive réduite en conséquence.

Si le condensateur fonctionne sous une tension fixe, aucune variation de la tension de fonctionnement ne se produit sur les éléments sains restants.

4 Internal fuses

4.1 General

Internal fuses for shunt capacitors are selective current-limiting fuses arranged inside a capacitor. As defined in IEC 593, they are designed to isolate faulted capacitor elements or capacitor unit, to allow operation of the remaining parts of that capacitor unit and the bank in which the capacitor unit is connected.

The operation of an internal fuse is initiated by the breakdown of a capacitor element. The affected element is instantaneously disconnected by the operation of the element fuse without interruption in the operation of the capacitor.

The number of externally parallel connected capacitors and the available short-circuit current of the supply system should not affect the current-limiting of internal fuses.

It should be noted that internal fuses do not provide protection against a short circuit between internal connections or a short circuit between active parts and casing, both of which may lead to case rupture.

4.2 Fuse characteristics

4.2.1 Rated current

There is no definition or test method existing for element fuses.

Element fuses are, in general, designed for much higher currents than the maximum permissible element current. They are meant to disconnect only faulty elements. The faulty elements and their fuses are not intended to be replaced.

4.2.2 Rated discharge capability

IEC 593 and IEC 871-1 specify that the capacitor be subject to five undamped discharges from a d.c. charge level of $2,5 U_N$. For special applications, where inrush currents and/or peak voltages are limited, lower discharge requirements are applicable.

4.2.3 Disconnecting capability

Requirements and test procedures are given in IEC 593. These tests verify that the fuse has a current-limiting action.

4.2.4 Voltage withstand capability after operation

Requirements and test procedures are given in IEC 593.

4.3 Influence of capacitor element configuration on capacitor life

4.3.1 Capacitor with all elements connected in parallel

After the breakdown of an element, the respective fuse will melt in less than a millisecond owing to the discharge current from the parallel connected elements and capacitors and the power frequency current from the supply. The capacitor may, however, continue operating with a correspondingly reduced output.

If the capacitor is operated at a fixed bus voltage, no variation in operating voltage on the remaining healthy elements will occur.

4.3.2 Condensateur avec des éléments connectés en série et en parallèle

Après le claquage d'un élément, tous les éléments connectés en parallèle déchargent dans l'élément en défaut tout ou partie de l'énergie qu'ils ont emmagasinée. Le courant à fréquence industrielle est limité par les éléments sains restants connectés en série.

Après la déconnexion de l'élément défaillant, le condensateur continue à fonctionner avec une puissance réduite en conséquence. Les éléments sains restants du groupe sont alors soumis à une contrainte dont la tension est approximativement $m \cdot n/[m(n-1) + 1]$ fois la tension initiale, où n est le nombre d'éléments connectés en parallèle par groupe et m le nombre de sections connectées en série par unité. Dans certains cas cette tension peut être plus élevée, par exemple en raison du déplacement du neutre dans un montage étoile à neutre isolé.

5 Fusibles externes

5.1 Généralités

Les fusibles externes pour condensateurs shunt sont définis dans la CEI 549 comme étant destinés à éliminer les défauts internes d'un condensateur unitaire, afin de permettre aux autres parties de la batterie à laquelle l'unité est connectée de continuer à fonctionner. Ils éliminent également l'amorçage externe des traversées du condensateur.

Le fonctionnement d'un fusible externe est généralement déterminé par le courant de défaut à fréquence industrielle et par l'énergie de décharge provenant des condensateurs connectés en parallèle avec le condensateur en défaut.

Le claquage initial est habituellement celui d'un élément individuel du condensateur. Inmanquablement, ce claquage se traduit par un court-circuit qui soustrait tous les éléments en parallèle avec lui et élimine un groupe série du condensateur. Si la cause de la défaillance initiale demeure, la défaillance des groupes séries successifs (qui subissent une augmentation de la tension à chaque élimination d'un groupe série) se produira. Cela occasionne une augmentation du courant dans le condensateur jusqu'au moment où le fusible externe fonctionne, éliminant le condensateur claqué du circuit.

Il convient de noter qu'en cas de défaut, en particulier dans le cas de condensateurs à diélectrique tout papier ou mixte (papier/film) la cuve du condensateur peut parfois se rompre. Cela se produit quand la défaillance de l'élément initial présente une grande résistance entre les électrodes court-circuitées, due à la présence du papier, et le maintien de l'arc génère du gaz qui gonfle la cuve jusqu'au moment où celle-ci peut se rompre avant que le fusible de protection puisse déconnecter le condensateur.

Les condensateurs à diélectrique tout film présentent des conséquences moindres en cas de rupture de la cuve car le film fond et provoque généralement un court-circuit de faible résistance entre les électrodes. Cependant, la rupture de la cuve peut se produire à cause de l'arc lorsqu'il y a rupture d'une connexion interne et que l'énergie emmagasinée dans les condensateurs en parallèle est excessive et/ou que le courant de défaut à fréquence industrielle est élevé.

5.2 Caractéristiques des fusibles

5.2.1 Courant assigné

Il convient que le courant assigné du fusible choisi soit compatible avec les critères utilisés pour choisir un interrupteur ou un disjoncteur de la même batterie. Dans les diverses normes nationales le courant assigné minimal accepté est égal à 1,35 fois le courant assigné du condensateur.

4.3.2 Capacitor with elements connected in series and parallel

After the breakdown of an element, all parallel connected elements discharge their stored energy or part of it into the faulty element. The power frequency current is limited by the remaining healthy elements connected in series.

After the disconnection of the faulty element, the capacitor continues operating with a correspondingly reduced output. The remaining healthy elements of the group are then stressed with a voltage approximately $m \cdot n / [m(n - 1) + 1]$ times the initial voltage, where n is the number of parallel connected elements per group and m the number of series-connected sections per unit. In certain cases the voltage may be higher, for example due to neutral shift with an ungrounded star configuration.

5 External fuses

5.1 General

External fuses for shunt capacitors are defined in IEC 549 as intended to clear faults inside a capacitor unit and to permit continued operation of the remaining parts of the bank in which the unit is connected. They will also clear an external capacitor bushing flashover.

The operation of an external fuse is generally determined by the power frequency fault current and by the discharge energy from capacitors connected in parallel with the faulty capacitor.

The initial breakdown is usually of an individual element within a capacitor. This invariably becomes a short circuit which removes all elements in parallel with it and eliminates one series section from the capacitor. Should the cause of the initial failure continue, failure of successive series sections (which see an increasing voltage with each series section removed) will occur. This causes an increase in the current through the capacitor to the point where the fuse operates removing the failed capacitor from the circuit.

It should be noted, particularly in the case of paper or paper/film dielectric capacitors, that the capacitor case may occasionally rupture in the event of failure. This occurs when the initial element failure has high resistance between the shorted electrodes due to the presence of paper and sustained arcing generates gas which swells the case to the point where it may rupture before the protecting fuse can disconnect the capacitor.

Capacitors with all-film dielectric have a lower incidence of case rupture because the film melts and generally allows a low resistance short between the electrodes. However, case rupture may still occur due to arcing when there is a broken internal connection and when there is excessive stored energy available in parallel capacitors and/or high power frequency fault current.

5.2 Fuse characteristics

5.2.1 Rated current

The rated current of the selected fuse should be consistent with the criteria used for the selection of a switch or circuit-breaker for the same bank. From the various national standards the minimum accepted rating is 1,35 times the rated capacitor current.

En régime permanent, il n'est pas nécessaire que le pouvoir de coupure du fusible dépasse celui de l'interrupteur ou du disjoncteur. Cependant, il y a lieu de prendre en compte les régimes transitoires, tels que les courants liés aux manoeuvres du réseau ou de la batterie. Il est courant d'utiliser un fusible ayant un courant assigné de 1,65 fois le courant assigné du condensateur.

La CEI 549 spécifie que le courant assigné du fusible soit au moins égal à 1,43 fois le courant assigné du condensateur. Cette valeur se trouve entre les deux valeurs 1,35 et 1,65 mentionnées ci-dessus. Pour certaines batteries, le courant assigné du fusible peut être supérieur à 1,65 fois le courant assigné du condensateur pour éviter un fonctionnement intempestif du fusible dû aux transitoires de manoeuvre et pour des raisons mécaniques. Par exemple, des condensateurs à haute tension peuvent exiger un fusible de 2 A seulement, mais la contrainte mécanique impose l'utilisation d'un fusible de 5 A.

NOTE – Le courant assigné permanent du fusible n'est pas nécessairement celui de sa plaque signalétique. Par exemple, un élément de remplacement à expulsion, avec un courant assigné beaucoup plus faible que le courant assigné de l'ensemble porteur, peut supporter en régime permanent 150 % du courant assigné indiqué sur sa plaque signalétique. Il est extrêmement important que le courant assigné réel de l'élément de remplacement du fusible soit connu. Typiquement, les ensembles porteurs sont disponibles avec deux plages de courants assignés, l'une jusqu'à 50 A et l'autre jusqu'à 100 A, alors que les éléments de remplacement utilisés dans ces ensembles porteurs sont de calibre 5 A à 100 A. La tension assignée de ces ensembles porteurs est également variable, par exemple jusqu'à 9 kV, de 9 kV à 16 kV et de 16 kV à 25 kV.

5.2.2 Tension assignée

Pour satisfaire aux prescriptions de la CEI 549, il convient que la tension assignée du fusible ne soit pas inférieure à 1,1 fois la tension assignée du condensateur auquel il est associé.

5.2.3 Caractéristiques temps-courant

Les caractéristiques temps-courant sont disponibles chez la plupart des fabricants pour aider à la coordination.

Cette information est parfois disponible sous forme de tableaux.

5.2.4 Aptitude à la décharge

Il convient que le fusible externe soit capable de supporter les transitoires et les courants d'appel dus aux courts-circuits externes. La CEI 549 spécifie les essais pour vérifier le I^2t auquel le fusible peut être soumis pour 5 et 100 décharges. Un essai de décharge en court-circuit d'un fusible en combinaison avec un condensateur n'est pas encore défini dans la norme, mais il est à l'étude.

5.3 Types de fusibles

Les différents types de fusibles sont indiqués à la figure 1 ci-dessous.

In a steady-state basis, there is no need for the fuse capability to exceed that for the switch or circuit-breaker. However, transient conditions such as currents associated with system or bank switching should be considered. It is common to use a fuse with a current rating of 1,65 times the rated capacitor current.

IEC 549 specifies that the fuse rated current be at least 1,43 times the capacitor rating. This falls between the two values mentioned above of 1,35 and 1,65. For some banks, the fuse rating may be higher than 1,65 times the capacitor rated current to avoid spurious fuse operation due to switching transients and for mechanical reasons. For example, high voltage capacitors may require only a 2 A fuse, but mechanical strength dictates use of a 5 A fuse.

NOTE – The continuous rating of the fuse is not necessarily its nameplate rating. For example, an expulsion fuse link with a rating much smaller than the rating of the fuse holder may carry 150 % of its nameplate rating on a continuous basis. It is extremely important that the actual current rating of the fuse link be known. Typically, fuse holders are available in two current ratings, one for up to 50 A and the other for up to 100 A, whereas fuse links used in these holders are rated from 5 A to 100 A. These holders also vary in voltage rating, e.g. up to 9 kV, 9 kV to 16 kV and 16 kV to 25 kV.

5.2.2 Rated voltage

The rated voltage of the fuse should be not less than 1,1 times the rated voltage of the capacitor with which it is associated in order to meet the requirements of IEC 549.

5.2.3 Time-current characteristics

Time-current characteristics are available from most fuse manufacturers to assist in coordination.

This information is sometimes available in table form.

5.2.4 Discharge capability

The external fuse should be capable of withstanding inrush transients and currents due to external short circuits. IEC 549 specifies tests to verify the I^2t to which the fuse may be subjected for 5 and 100 discharges. A short-circuit discharge test of the fuse in combination with a capacitor is not yet defined in the standard, but is under consideration.

5.3 Fuse types

The different types of fuse are indicated in figure 1 below.

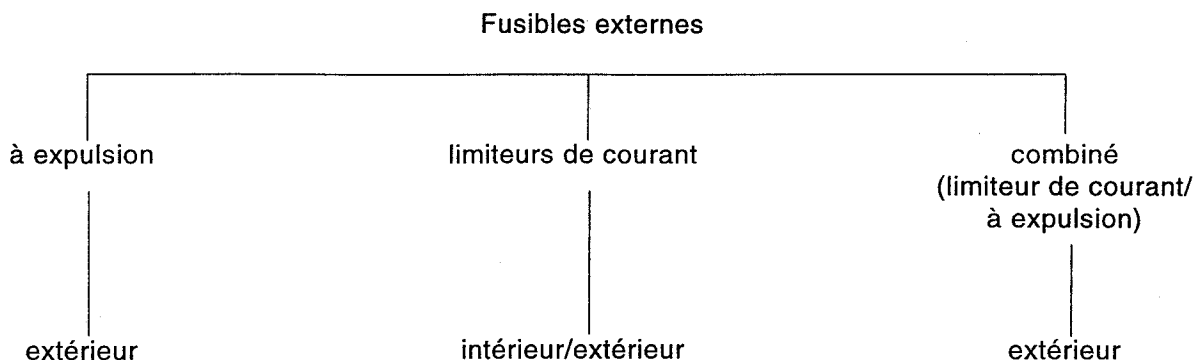


Figure 1 – Types de fusibles

5.3.1 Fusibles à expulsion

a) Les fusibles à expulsion sont normalement utilisés dans des applications extérieures, à cause du bruit et des gaz dégagés pendant le fonctionnement du fusible.

b) Les fusibles à expulsion ont une capacité limitée vis-à-vis du courant de défaut à fréquence industrielle. Par conséquent, consulter le fabricant du fusible quand le courant de défaut au niveau du fusible dépasse 1 800 A, ou utiliser des fusibles limiteurs de courant.

Les batteries connectées en étoile à neutre isolé et celles à plusieurs groupes séries minimisent l'importance de l'aptitude à la coupe à fréquence industrielle du fusible.

c) Les fusibles à expulsion ont un pouvoir de coupe limité vis-à-vis de l'énergie de décharge des condensateurs connectés en parallèle avec un condensateur en court-circuit. Les fusibles standards sont généralement calibrés jusqu'à 15 kJ ou moins; consulter le fabricant du fusible.

En cas de défaillance d'un condensateur, les enveloppes des fusibles et les cuves des condensateurs peuvent se rompre à cause de l'énergie disponible. En cas de défaut d'un condensateur, la probabilité de rupture de la cuve est généralement jugée acceptable pour les condensateurs tout-film quand l'énergie en parallèle est limitée à 15 kJ. Cette limite est calculée sur la base d'une tension aux bornes du condensateur égale à 1,1 fois la valeur de crête de la tension assignée (lorsque des surtensions à fréquence industrielle plus élevées sont prévues, il convient que l'énergie en parallèle soit réduite en conséquence). A la tension assignée, cette limite équivaut à 4 650 kvar de condensateurs connectés en parallèle à 60 Hz, et à 3 900 kvar à 50 Hz. Pour les condensateurs tout papier ou papier/film, l'énergie est typiquement limitée à 10 kJ.

Pour une énergie en W.s (joules) on a:

$$\text{Energie} = C \cdot (U_{\text{eff}})^2$$

en remplaçant la capacité par sa valeur:

$$C (\mu\text{F}) = \frac{\text{kvar} \cdot 1000}{2\pi \cdot f_N \cdot U_N^2}$$

on obtient alors:

$$\text{Energie} = 159 \cdot \text{kvar/fréquence}$$

d) Des éléments de remplacement de fusibles à expulsion type T et type K sont indiqués dans la norme ANSI (voir annexe A). La différence de performance est dans la durée minimale de fusion de l'élément de remplacement, comme indiqué dans les tableaux 1 et 2.

5.3.2 Fusibles limiteurs de courant

a) Les fusibles limiteurs de courant peuvent être utilisés pour des applications intérieures et extérieures.

b) Les fusibles limiteurs de courant limitent le courant de court-circuit à fréquence industrielle à une valeur inférieure à la valeur présumée et annulent le courant avant son passage naturel à zéro à la fréquence de fonctionnement.

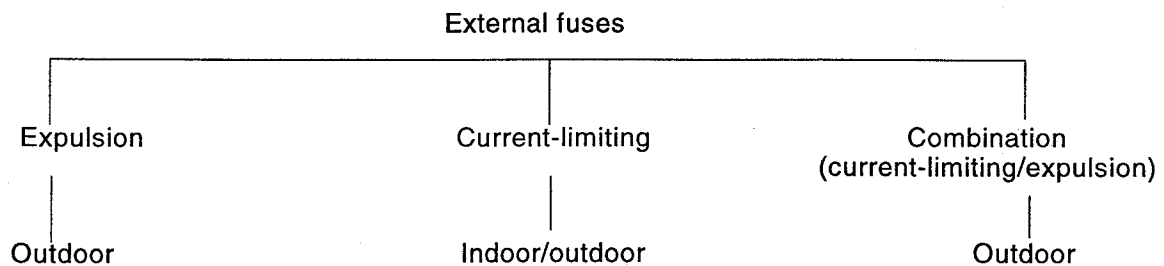


Figure 1 - Fuse types

5.3.1 *Expulsion fuses*

a) Expulsion fuses are normally used in outdoor applications due to noise and gases released during fuse operation.

b) Expulsion fuses have limited power frequency fault current capability. Therefore consult with the fuse manufacturer when fault current at the fuse exceeds 1 800 A, or use current-limiting fuses.

Floating star-connected banks and those with multiple series sections minimize the importance of the power frequency interrupting capability of the fuse.

c) Expulsion fuses have limited ability to clear against the discharge energy of capacitors connected in parallel with a shorted capacitor. Standard fuses are generally rated at 15 kJ or less; consult the fuse manufacturer.

Both fuse tubes and capacitor cases may rupture due to energy available in the event of a capacitor failure. The probability of case rupture in the event of capacitor failure is generally considered acceptable with all-film capacitors when the parallel energy has generally been limited to 15 kJ. This limit is calculated on the basis that the capacitor voltage is at 1,1 times the peak value of rated voltage (when higher power frequency overvoltages are anticipated, the parallel energy should be reduced accordingly). At rated voltage, this limit is equivalent to 4 650 kvar of parallel connected capacitors at 60 Hz and 3 900 kvar at 50 Hz. For all-paper and film/paper capacitors, the energy is typically limited to 10 kJ.

From: energy in W.s. (joules) = $C \cdot (U_{rms})^2$

Substituting: capacitance C (μF) = $\frac{kvar \cdot 1000}{2\pi \cdot f_N \cdot U_N^2}$

It follows then that: energy = 159 · kvar/frequency

d) Expulsion fuse links are available in ANSI Type T and Type K (see annex A). The difference in performance is in the time for melting of the link, as shown in tables 1 and 2.

5.3.2 *Current-limiting fuses*

a) Current-limiting fuses may be used for indoor and outdoor applications.

b) Current-limiting fuses will limit the power frequency short-circuit current to less than the prospective value and will reduce the current to zero before the normal working frequency current zero.

c) Généralement, les fusibles limiteurs de courant n'imposent pas de limite supérieure à l'énergie emmagasinée en parallèle disponible d'un condensateur en court-circuit. Cependant, quelques fusibles limiteurs de courant ont une limite maximale vis-à-vis de l'énergie en parallèle. Il convient de consulter le fabricant du fusible sur le pouvoir de coupure vis-à-vis de l'énergie de décharge.

d) Il convient de noter que certains fusibles ne fonctionnent pas pour le courant à fréquence industrielle. Il convient de consulter le fabricant du fusible sur le pouvoir de coupure vis-à-vis du courant à fréquence industrielle.

5.3.3 Fusibles combinés limiteurs de courant/à expulsion

Comme leur nom l'indique, ces fusibles constituent la combinaison d'un fusible limiteur de courant à fusion enfermée et d'un fusible à expulsion.

a) Comme les fusibles à expulsion, ces fusibles combinés sont normalement utilisés dans des applications extérieures en raison du bruit et des gaz dégagés pendant leur fonctionnement.

b) Comme les fusibles limiteurs de courant, ces fusibles combinés limitent le courant de court-circuit à fréquence industrielle à une valeur inférieure à la valeur présumée et annulent le courant avant son passage naturel au zéro à la fréquence de fonctionnement.

c) Comme les fusibles limiteurs de courant, ces fusibles combinés n'ont généralement pas de limite supérieure vis-à-vis de l'énergie emmagasinée en parallèle disponible d'un condensateur en court-circuit. Cependant, certains fusibles combinés ont une limite maximale vis-à-vis de l'énergie en parallèle. Il convient de consulter le fabricant du fusible sur le pouvoir de coupure vis-à-vis de l'énergie de décharge.

d) Il convient de noter que certains fusibles ne fonctionnent pas pour le courant à fréquence industrielle. Il convient de consulter le fabricant du fusible sur le pouvoir de coupure vis-à-vis du courant à fréquence industrielle.

5.4 Influence de la configuration de la batterie de condensateurs sur le choix du fusible

5.4.1 Batteries en étoile à un groupe série avec neutre à la terre et batteries en triangle

Les fusibles combinés ou limiteurs de courant sont normalement prescrits car un condensateur en court-circuit est soumis à des courants de défaut élevés qui peuvent provoquer la rupture de l'ensemble porteur ou de la cuve du condensateur.

5.4.2 Batteries en étoile à un groupe série avec neutre isolé

L'énergie disponible des condensateurs connectés en parallèle est probablement le facteur déterminant pour choisir un fusible à expulsion ou une des options de fusibles limiteurs de courant.

5.4.3 Batteries à plusieurs groupes séries

Le courant de court-circuit disponible n'est pas un facteur déterminant dans ces batteries car les nombreux groupes séries limitent le courant de défaut circulant à travers le condensateur en court-circuit. Dans les batteries de forte puissance ayant plusieurs condensateurs en parallèle par groupe série, les fusibles à expulsion peuvent souvent être utilisés si la configuration de la batterie est modifiée, par exemple en double étoile afin de limiter l'énergie en parallèle.

5.5 Coordination avec les courbes de rupture de la cuve

En plus des considérations déjà traitées pour choisir un fusible, il convient que le fusible soit coordonné vis-à-vis des courbes de rupture de la cuve pour les condensateurs unitaires de la batterie.

c) Generally, current-limiting fuses impose no upper limit on the parallel stored energy available to a shorted capacitor. However, some current-limiting fuses have a maximum limit for parallel energy. The fuse manufacturer should be consulted regarding the discharge energy interrupting rating.

d) It should be noted that some fuses will not clear on power frequency current. The fuse manufacturer should be consulted regarding the interrupting rating for power frequency current.

5.3.3 *Combination current-limiting/expulsion fuses*

As the name implies, these fuses combine a totally enclosed current-limiting fuse with an expulsion fuse.

a) As with expulsion fuses, combination fuses are normally used in outdoor applications due to noise and gases released during fuse operation.

b) As with current-limiting fuses, combination fuses will limit the power frequency short-circuit current to less than the prospective value and will reduce the current to zero before the normal working frequency current zero.

c) As with current-limiting fuses, combination fuses generally have no upper limit on the parallel stored energy available to a shorted capacitor. However, some combination fuses have a maximum limit for parallel energy. The fuse manufacturer should be consulted regarding the discharge energy interrupting rating.

d) It should be noted that some fuses will not clear on power frequency current. The fuse manufacturer should be consulted regarding the interrupting rating for power frequency current.

5.4 *Influence of capacitor bank configuration on fuse selection*

5.4.1 *Single series section grounded star and delta banks*

Current-limiting or combination fuses are normally required because a shorted capacitor is subjected to high fault currents that may cause the fuse holder or capacitor case to rupture.

5.4.2 *Single series section ungrounded star banks*

The available energy from parallel connected capacitors will probably be the determining factor in selecting either expulsion or one of the current-limiting options.

5.4.3 *Multiple series section banks*

Available short-circuit current is not a factor in these banks since the multiple series sections will limit the fault current through a shorted capacitor. In large banks having many capacitors in parallel per series section, expulsion type fuses may often be used if the bank configuration is changed, e.g. to double star, to limit the parallel energy.

5.5 *Coordination with case rupture curves*

In addition to the considerations in fuse selection already dealt with, the fuse should coordinate with the rupture curves for the bank capacitor units.

Ces courbes sont disponibles dans certaines normes nationales et chez les fabricants de condensateurs. La figure 2 illustre des exemples de ces courbes. Une méthode d'essai pour la rupture de la cuve n'est pas définie dans ce rapport, mais elle est à l'étude.

Pour minimiser le risque de rupture de la cuve, il convient que les fusibles choisis assurent une coordination prévue dans la zone de «probabilité faible». Se référer aux paragraphes 5.3.1, 5.3.2 et 5.3.3 pour des commentaires sur l'énergie provenant de condensateurs connectés en parallèle.

6 Détection de déséquilibre

6.1 Fonctionnement

Chaque fois qu'un élément interne de condensateur présente une défaillance, il se produit une légère modification de la répartition de la tension et de la circulation du courant dans la batterie de condensateurs. L'importance de ces modifications dépend du nombre d'éléments présentant une défaillance et de leur emplacement dans la batterie. Si un condensateur à fusible externe est déconnecté par son fusible, des variations de la tension et du courant obtenues sont plus importantes que celles dues à de simples éléments déconnectés par leur fusible interne.

Par l'utilisation de divers schémas de connexions de la batterie et de systèmes de relaying, le déséquilibre de tension ou de courant peut être mesuré et utilisé à des fins de protection. Le but principal de la protection de déséquilibre est de produire une alarme ou de déconnecter la totalité de la batterie de condensateurs quand les surtensions traversant les condensateurs sains, adjacents à un condensateur en défaillance, sont excessives. Normalement il est recommandé d'autoriser une surtension n'excédant pas 10 % (limite de surtension selon la CEI 871-1).

Une autre fonction de la protection de déséquilibre est de retirer du service la batterie pour un défaut qui n'est pas éliminé par un fusible ou de protéger les batteries qui n'ont pas de fusibles internes ou externes. La protection de déséquilibre n'est pas une substitution de la protection de court-circuit.

6.2 Types de protection de déséquilibre

6.2.1 Courant du neutre (figure 3)

Les condensateurs sont connectés en étoile (neutre à la terre) avec un transformateur de courant entre le neutre et la terre. Un déséquilibre dans la batterie produit la circulation d'un courant entre le neutre et la terre.

Ce système de protection est sensible aux déséquilibres des phases du réseau et dépend du mode de mise à la terre du réseau. Il convient que les réglages tiennent compte des variations normales et, par conséquent, la sensibilité de la protection peut être affectée. Les courants d'harmoniques (en particulier le troisième harmonique) traverseront le transformateur de courant; un filtre est parfois nécessaire pour éviter les perturbations.

6.2.2 Tension du neutre (figure 4)

Les condensateurs sont connectés en étoile (neutre isolé) avec un transformateur de tension entre le neutre et la terre. Une différence de potentiel entre le neutre et la terre est mesurée en cas de déséquilibre.

La sensibilité est relativement médiocre à cause des déséquilibres des phases et le schéma dépend du mode de mise à la terre du réseau. Il convient que les réglages tiennent compte des variations normales et, par conséquent, la sensibilité de la protection peut être affectée. La méthode convient mieux aux condensateurs avec fusibles externes.

These curves are available in some national standards and from manufacturers of capacitors. Figure 2 illustrates examples of these curves. A test method for case rupture is not defined in this report but is under consideration.

To minimize risk of case rupture, selected fuses should provide coordination in the "low probability" region. Refer to 5.3.1, 5.3.2 and 5.3.3 for comments on energy from capacitors connected in parallel.

6 Unbalance detection

6.1 Operation

Each time an internal capacitor element fails, a slight change of voltage distribution and current flow within the capacitor bank is encountered. The magnitude of these changes depends upon the number of failed elements and their location within the bank. If an externally fused capacitor is disconnected by its fuse, a larger voltage and current change is obtained than if single elements are disconnected by internal fuses.

By the use of various bank connections and relaying schemes, the voltage or current unbalance may be measured and utilized for protection. The main purpose of the unbalance protection is to give an alarm or to disconnect the entire capacitor bank when overvoltages across healthy capacitors, adjacent to a failed capacitor, are excessive. Normally not more than 10 % overvoltage should be allowed (overvoltage limit according to IEC 871-1).

Another function of the unbalance protection is to remove the bank from service for a fault not isolated by a fuse or to protect banks that are not internally or externally fused. Unbalance protection is not a replacement for short-circuit protection.

6.2 Types of unbalance protection

6.2.1 Neutral current (figure 3)

The capacitors are star-connected (grounded) with a current transformer between neutral and ground. An unbalance in the bank will cause current to flow from neutral to ground.

This protection scheme is sensitive to phase unbalances in the network and depends upon the system being effectively grounded. The settings should allow for normal variations and the sensitivity of the protection may therefore be impaired. Harmonic currents (3rd harmonic in particular) will pass through the current transformer; a filter may sometimes be necessary to avoid disturbances.

6.2.2 Neutral voltage (figure 4)

The capacitors are star-connected (ungrounded) with a voltage transformer between neutral and ground. A voltage difference between neutral and ground will be measured at unbalance.

The sensitivity is relatively poor due to influence by phase unbalances and the scheme depends upon the system being effectively grounded. The settings should allow for normal variations and the sensitivity of the protection may therefore be impaired. The method is most suitable in combination with external fuses.

Il convient que les transformateurs de tension utilisés dans cette application soient dimensionnés pour la pleine tension du réseau. La tension du neutre augmentera d'une manière significative pendant l'enclenchement et le transformateur peut être saturé s'il n'est pas correctement dimensionné. Des diviseurs résistifs et des relais statiques peuvent être utilisés à la place des transformateurs de tension pour surmonter les problèmes de saturation, de surtensions transitoires à l'enclenchement et du coût élevé d'un transformateur de tension dimensionné pour la pleine tension du réseau.

6.2.3 Déséquilibre de courant entre les neutres (figure 5)

Les condensateurs sont disposés en double étoile (neutre isolé) avec un transformateur de courant entre les neutres. Il n'est pas nécessaire que les étoiles soient de même puissance. Un déséquilibre dans la batterie produit l'écoulement d'un courant dans le neutre.

Cette protection n'est pas affectée par le déséquilibre du réseau et elle n'est pas particulièrement sensible aux harmoniques. Le schéma peut être utilisé à la fois pour des fusibles internes et externes. Comme la sensibilité est bonne, la méthode est spécialement utile pour les fusibles internes. Il convient que le transformateur de courant soit dimensionné pour la pleine tension du réseau.

6.2.4 Déséquilibre de tension de phase (figure 6)

Les condensateurs sont connectés en étoile (neutre isolé) et on utilise trois transformateurs de tension entre les phases et le neutre, avec leur secondaire connecté en triangle ouvert. Un déséquilibre dans la batterie modifie la tension du neutre et produit en conséquence un signal de sortie provenant du triangle ouvert. Il convient que ces transformateurs de tension aient un isolement dimensionné pour les tensions assignées entre primaire et terre, et entre primaire et secondaire.

Du fait de la sommation des trois phases, l'amplitude de sortie est supérieure à celle qui existerait dans le cas d'une mesure entre le neutre et la terre (figure 4). La sensibilité est, par conséquent, améliorée. L'influence du déséquilibre de phase reste un inconvénient.

6.2.5 Différence de tension (figure 7)

Les condensateurs sont connectés en étoile à neutre isolé ou à la terre. La modification de la tension en chaque point milieu de phase (ou à proximité du point milieu) est mesurée par rapport à sa tension phase-neutre au moyen de transformateurs de tension. Les signaux sont obtenus séparément à partir de chaque phase où se produisent des défaillances du condensateur.

La méthode convient pour des batteries de forte puissance puisque la totalité de la batterie est divisée en trois zones de protection distinctes. Cela peut avoir de l'importance vis-à-vis de la sensibilité globale. La méthode n'est pas affectée par le déséquilibre de la tension de phase.

Pour les batteries de très forte puissance, un schéma en double étoile peut être utilisé, dans lequel des comparaisons sont effectuées entre les points milieux des deux branches de chaque phase.

6.2.6 Déséquilibre de courant dans un schéma en pont (figure 8)

Les condensateurs dans chaque phase sont disposés dans deux branches avec un transformateur de courant connecté entre les points milieux des deux branches, ou à proximité de ceux-ci. Quelque soit le lieu de défaillances dans les branches, il se produit un déséquilibre de courant circulant à travers le transformateur de courant.

Voltage transformers used in this application should be rated for full system voltage. The neutral voltage will rise significantly during switching and the transformer may be saturated if not correctly rated. Resistive dividers and static relays may be used instead of voltage transformers to overcome the problems with saturation, transient overvoltages on switching and the high cost of a voltage transformer rated for full system voltage.

6.2.3 *Current unbalance between neutrals* (figure 5)

The capacitors are arranged in two parallel stars (ungrounded) with a current transformer between the neutrals. The stars do not have to be equal in size. An unbalance in the bank will cause current to flow in the neutral.

This protection is not affected by unbalance in the network and it is not particularly sensitive to harmonics. The scheme may be used for both internal and external fuses. As the sensitivity performance is good the method is especially useful for internal fuses. The current transformer should be rated for full system voltage.

6.2.4 *Phase voltage unbalance* (figure 6)

The capacitors are star-connected (ungrounded) and three line-to-neutral voltage transformers are used with their secondaries connected in open delta. An unbalance in the bank will cause a neutral shift voltage and thus an output signal from the open delta. These voltage transformers should have insulation rated for primary to ground and primary to secondary voltages.

Due to three-phase summation the output magnitude is higher than would be the case with the neutral to ground measurement (figure 4). The sensitivity performance is therefore improved. The influence by phase unbalances is still a concern.

6.2.5 *Voltage difference* (figure 7)

The capacitors are connected ungrounded or grounded star. The voltage shift of each phase midpoint (or close to midpoint) is measured relative to its line-to-neutral voltage by means of voltage transformers. Signals will be obtained separately from each phase where capacitor failures occur.

This method is suitable for large capacitor banks since the total bank will be divided into three separate protection zones. This may be of importance for overall sensitivity. The method is not influenced by phase voltage unbalance.

For very large capacitor banks a double star-connection may be used where comparisons are made between the midpoints of the two branches of each phase.

6.2.6 *Current unbalance in bridge connection* (figure 8)

The capacitors in each phase are arranged in two branches with a current transformer connected between midpoints or close to midpoints of the two branches. Failures anywhere in the branches will cause an unbalance current to flow through the current transformer.

Cette méthode convient pour des batteries de forte puissance puisque la totalité de la batterie est divisée en trois zones de protection distinctes. La méthode n'est pas affectée par les déséquilibres de tension de phase. Elle peut être utilisée dans les batteries en triangle ou en étoile avec neutre isolé ou à la terre.

6.3 Transformateurs de courant et de tension

6.3.1 Transformateurs de courant

Le courant assigné est déterminé à partir du courant de déséquilibre calculé selon divers modes de claquage. Dans la détermination de ce courant, il convient de tenir compte des courants harmoniques. Pour les condensateurs à fusibles internes, le courant peut être très faible et il convient de choisir les transformateurs en conséquence.

Pour les batteries à neutre isolé, il est recommandé que la tension assignée corresponde à celle du réseau. Des tensions assignées plus faibles peuvent être choisies si les batteries sont mises à la terre.

Il convient que le transformateur de courant puisse supporter les courants pendant des conditions anormales telles que les courts-circuits. De tels incidents peuvent donner lieu à des courants élevés en régime transitoire et de forts courants de défaut à fréquence industrielle pendant la temporisation de la protection contre les surintensités. Il convient également de tenir compte des courants transitoires de manoeuvre. Le transformateur de courant peut être protégé à son primaire par des éclateurs ou des parafoudres.

Le besoin en précision est généralement assez faible. Un transformateur de courant de classe 10 P est normalement suffisant, à condition que son erreur de mesure pour sa valeur de réglage soit inférieure à 5 % (voir la CEI 185). Si le courant de déséquilibre maximal est beaucoup plus faible que le courant assigné du transformateur, une classe de précision supérieure est nécessaire.

6.3.2 Transformateurs de tension

Il convient que la tension primaire assignée du transformateur de tension corresponde à la tension de déséquilibre maximale calculée.

Pour les batteries à neutre isolé, la classe d'isolement s'applique également au transformateur de tension. Pour les batteries mises à la terre, des transformateurs de tension à isolement réduit peuvent être utilisés.

Si l'enroulement primaire forme un circuit de décharge pour le condensateur, il faut prendre en compte son aptitude à résister à l'énergie de décharge et aux pics de courant au moment de la déconnexion du réseau.

Des transformateurs de tension standard de classe de précision 0,5 sont normalement employés (voir CEI 186). Pour les schémas selon les figures 6 et 7, il convient de porter une attention particulière à l'adéquation des transformateurs de tension aux différentes phases.

6.4 Réglage des relais et des dispositifs de protection

Pour éviter des fonctionnements intempestifs dus aux manoeuvres ou autres transitoires, il convient que le relais de déséquilibre ait une certaine temporisation. Les réglages typiques de temporisation se situent entre 0,1 s et 1 s; pour les fusibles externes, la coordination avec les fusibles est d'une grande importance. Si un tel système est utilisé, il convient que le relayage comprenne également des dispositifs de verrouillage pour le réenclencheur automatique.

This method is suitable for large capacitor banks since the total bank will be divided into three separate protection zones. The method is not influenced by phase voltage unbalances. It may be used in delta- or star-connected banks with the neutral grounded or ungrounded.

6.3 *Current and voltage transformers*

6.3.1 *Current transformers*

Rated current is based on the calculated unbalance at different failure modes. Harmonic current should be considered in determining the rating. For internally fused capacitors the current may be very low and current transformers should be chosen accordingly.

For ungrounded banks the rated voltage should correspond to the system voltage. Lower ratings may be used if the banks are grounded.

The current transformer should be capable of withstanding currents during abnormal conditions such as short circuits. Such failures may lead to a high peak transient and high power frequency currents during the delay of the overcurrent protection. Switching current transient should also be taken into account. The current transformer may be protected at its primary by means of spark gaps or surge arresters.

The accuracy requirement is generally quite low. Class 10 P would normally be sufficient providing the measuring error of the current transformer at the protection setting current is less than 5 % (see IEC 185). Should the maximum unbalance be much lower than the rated current of the current transformer, a better accuracy class is required.

6.3.2 *Voltage transformers*

The rated primary voltage of the voltage transformer should correspond to the calculated maximum unbalance.

For ungrounded banks the insulation class also applies to the voltage transformer. For grounded banks, voltage transformers with reduced insulation may be used.

When the primary winding forms a discharge path for the capacitor, the capability to withstand the discharge energy and peak current at disconnection from the line has to be considered.

Standard voltage transformers of accuracy class 0,5 are normally used (see IEC 186). For connection schemes according to figures 6 and 7, special attention should be paid to matching the voltage transformers in different phases.

6.4 *Relays and protection settings*

To avoid false operations due to switching or other transients, the unbalance relay should have a certain time delay. Typical delay-settings are about 0,1 s to 1 s; for external fuses, the coordination with fuses is of special importance. The relaying should also incorporate features for blocking of automatic reclosure if such a system is used.

Il est bon que les relais utilisés pour la protection de déséquilibre aient normalement une sensibilité moindre pour les fréquences autres que la fondamentale afin d'éviter un fonctionnement intempestif et pour simplifier le calcul du réglage des relais.

Quand on définit les réglages pour le relais de déséquilibre, il y a lieu de prendre en compte la limite de surtension (10 %) pour les condensateurs voisins, à savoir une alarme pour les surtensions inférieures à 10 %, déclenchement au-delà de 10 %. Pour les condensateurs à fusibles internes, il se peut que les limites de surtensions dans les éléments sains en parallèle des condensateurs soient différentes.

En fonction de la puissance de la batterie, on peut autoriser le fonctionnement d'un ou plusieurs fusibles avant le déclenchement d'une alarme. Il convient que le relai de protection déclenche la batterie lorsque la limite de surtension est dépassée.

6.5 Sensibilité

La sensibilité de la protection dépend de la puissance de la batterie de condensateurs ou de la partie de la batterie qui est incluse dans une zone de protection particulière. Pour les batteries de forte puissance, il est nécessaire d'avoir une méthode qui permette un relai distinct par phase (voire même plus dans des cas rares).

Lorsqu'on définit le nombre de relais sur la base des exigences de sensibilité, il y a lieu de tenir compte de l'influence de facteurs tels que des différences de température au sein de la batterie.

L'analyse de sensibilité, c'est-à-dire la relation entre le nombre d'éléments en défaillance, les fusibles et le courant ou la tension de sortie, est habituellement effectuée par le fabricant de condensateurs. Avec les condensateurs à fusibles internes on a généralement besoin d'une sensibilité plus grande qu'avec des condensateurs à fusibles externes. Des programmes informatiques spécifiques sont souvent disponibles pour ces analyses de sensibilité.

6.6 Déséquilibre initial

Du fait de la différence normale de capacité entre les condensateurs, un déséquilibre initial peut exister dans une batterie. Il convient de limiter ce déséquilibre à une amplitude qui permette une définition claire des critères de fonctionnement du relai, et qu'il ne dépasse normalement pas 10 % du courant de réglage du relai.

Comme alternative à l'équilibre initial des condensateurs, le déséquilibre peut être compensé par des relais appropriés.

7 Surintensité

7.1 Fonctionnement

Des courants excessifs dans les condensateurs peuvent provenir de perturbations de tensions, d'harmoniques ou de court-circuits sur le réseau. Pour protéger les condensateurs, des transformateurs de courant sont utilisés en association avec des relais afin de détecter les surcharges de courant et de prévoir le déclenchement de la batterie.

Dans le cas de batteries de puissance modérée, des fusibles de puissance peuvent également être utilisés comme protection contre les courts-circuits dus aux défauts entre phases ou entre phase et terre.

Relays used for unbalance protection should normally have reduced sensitivity for frequencies other than the fundamental to prevent undesired operation and to simplify calculation of the relay setting.

When defining settings for the unbalance relay, one has to consider the overvoltage limit (10 %) for adjacent capacitors, i.e. alarm for overvoltages less than 10 %, trip when in excess of 10 %. For internally fused capacitors there may be different restrictions on voltage rise across parallel non-failed internal elements.

Depending on bank size, one or more fuses may be allowed to operate before an alarm is initiated. The protective relaying should trip the bank once the overvoltage limit is exceeded.

6.5 Sensitivity

The sensitivity of the protection depends upon the size of the capacitor bank or that part of the bank which is incorporated in one particular protection zone. For large banks a method that allows one separate relay (in rare cases even more) per phase is necessary.

When defining the number of relays based on sensitivity requirements, the influence of factors such as temperature differences within the bank should be considered.

Sensitivity analysis, i.e. the relation between number of failed elements, fuses and current or voltage outputs, is usually made by the capacitor manufacturer. Higher sensitivity is generally needed with internally fused than with externally fused capacitors. Special computer programs are often available for sensitivity analysis.

6.6 Initial unbalance

Due to normal capacitance variation between capacitors, an initial unbalance may exist in a bank. This unbalance should be limited to a magnitude that allows for a clear definition of the criteria for relay operation and should normally not exceed 10 % of the relay setting.

As an alternative to initial balancing of capacitors, the unbalance may be compensated by means of suitable relays.

7 Overload current

7.1 Operation

Excessive capacitor currents may be obtained in connection with system voltage disturbances, harmonics and short-circuit failures. To protect the capacitors, current transformers with associated relays are used to detect current overloads and provide tripping operation of the bank.

As protection for short-circuit currents due to line-to-line and line-to-ground faults in moderately sized banks, power fuses may also be used.

7.2 Constitution des protections

Pour les batteries dont la mise à la terre est directe, la protection est normalement constituée d'un transformateur de courant et de son relais dans chacune des phases (figure 9). S'il s'agit d'une batterie à neutre isolé, la protection de deux phases sur trois est suffisante (figure 10).

Pour des batteries plus petites (typiquement inférieures à 10 Mvar) sans autres groupes connectés en parallèle, où les courants d'appel transitoires sont de courte durée, un relais commun pour la protection contre les surcharges et les courts-circuits peut être employé. Le réglage provoque le déclenchement immédiat pour une intensité relativement faible.

Les courants transitoires obtenus avec des batteries de plus forte puissance ou des batteries connectées en parallèle conduisent à séparer les protections contre les surcharges des protections contre les courts-circuits. Les réglages en courant sont considérablement plus élevés pour la protection contre les courts-circuits afin d'éviter des fonctionnements intempestifs lors de l'enclenchement de la batterie.

Dans le cas de protection distincte contre les courts-circuits, et s'il s'agit d'une batterie à neutre isolé, le courant de défaut entre phases peut ne pas être suffisant pour obtenir la protection instantanée de la batterie. Toutefois, la protection de déséquilibre détectera toujours ce genre de défaillance dans une temporisation raisonnable.

7.3 Transformateurs de courant

Il convient que les transformateurs de courant pour protection contre les surcharges aient une intensité assignée primaire d'au moins 1,4 fois celle de la batterie. Les classes de précision standard 5 P et 10 P sont en principe suffisantes pour cette application (voir CEI 185).

Si un transformateur de courant classique est utilisé à la fois pour la mesure et la protection, il aura deux enroulements secondaires, l'un pour les dispositifs de mesure, l'autre pour les relais.

7.4 Relais

Il convient que la précision des relais utilisés pour la protection contre les surintensités soit appropriée dans une gamme de fréquences comprise entre 50 Hz et 1000 Hz. Il est recommandé que le rapport de retour soit d'au moins 95 %; ce rapport définit le niveau de charge au-dessous du réglage de protection pour lequel le relais est remis à zéro si la charge diminue pendant la durée de la temporisation.

7.5 Réglage des protections

Pour les batteries de faible puissance (typiquement inférieures à 10 Mvar) avec une protection commune contre les surcharges et contre les courts-circuits, les réglages des relais se situent normalement entre 1,3 fois et 1,4 fois la valeur du courant assigné. La temporisation est réglée pour quelques périodes (au maximum 10 périodes).

Pour des batteries avec protections distinctes contre les surcharges et contre les courts-circuits, la protection contre les surcharges est normalement réglée entre 1,3 fois et 1,4 fois la valeur du courant assigné. La temporisation est réglée suffisamment longue pour éviter des déclenchements intempestifs pendant les manoeuvres. La protection contre les courts-circuits est réglée à une valeur supérieure à $3 I_N$ et à une temporisation de quelques périodes. Ces réglages doivent être choisis avec une attention particulière vis-à-vis des courants d'appel.

7.2 Protective arrangement

For effectively grounded banks, the protection is normally arranged with a current transformer and its relay in each phase (figure 9). If the bank is ungrounded, protection in two of the three phases is sufficient (figure 10).

For smaller banks (typically less than 10 Mvar) without switched parallel sections, where the inrush transients are of short duration, a common relay for overload protection and short-circuit protection may be used. The setting will be an immediate trip at a relatively low current magnitude.

The current transients obtained with larger single banks, or when parallel banks are switched, lead to separate overload and short-circuit protection being required. The current settings are considerably higher for the short-circuit protection to avoid false operations at switching.

In the case of separate short-circuit protection, and if the bank is ungrounded, the current for line-to-line faults may not be sufficient to obtain instantaneous protection of the bank. However, the unbalance protection will always detect this kind of failure within a reasonable time delay.

7.3 Current transformers

Current transformers for overload protection should have a rated primary of at least 1,4 times rated current of the bank. Standard accuracy classes 5 P and 10 P would normally be sufficient for this application (see IEC 185).

If a common current transformer is used for both metering and protection purposes, it will have two secondary windings, one for measuring devices and the other for relays.

7.4 Relays

The accuracy of the relays used for overload protection should be valid within the frequency range 50 Hz to 1 000 Hz. The resetting ratio should be at least 95 %; this ratio defines the load level below the protection setting at which the relay is reset if the load decreases during the delayed functioning time.

7.5 Protective settings

For small banks (typically less than 10 Mvar) with common overload and short-circuit protection, the relay settings are normally in the range of 1,3 and 1,4 times rated current. The operation delay is set for a few cycles (maximum of 10 cycles).

For banks with separate overload and short-circuit protection, the overload protection is normally set in the range of 1,3 and 1,4 times rated current. The operation delay is set long enough to avoid false trips during switching. The short-circuit protection is set above $3 I_N$ and a few cycles delay. These settings have to be chosen with special attention to the inrush currents.

8 Surtension et creux de tension

8.1 Fonctionnement

Pour des condensateurs de puissance modernes, la tenue en tension est souvent le facteur décisif plutôt que la limitation thermique. Il peut donc être nécessaire d'utiliser une protection contre les surtensions afin de compléter la protection classique contre les surcharges, basée sur la mesure du courant.

La protection contre les surtensions peut être assurée au moyen de relais de tension sensibles aux valeurs de crête, avec une caractéristique inverse tension-temps. On peut aussi utiliser des relais de courant avec fonctions d'intégration pour obtenir la tension de crête instantanée.

Le relais de protection contre les surtensions est aussi utilisé pour réaliser une protection contre les creux de tension et des fonctions de verrouillage au moment du réenclenchement.

Typiquement, la source de tension pour ce mode de protection est issue des transformateurs de tension raccordés côté jeu de barres en amont de l'interrupteur du condensateur. Il n'est pas conseillé d'utiliser les transformateurs de tension connectés entre phase et terre côté condensateurs en aval de l'interrupteur.

8.2 Protection contre les surtensions

Pour la protection contre les surtensions, il est recommandé de tenir compte des niveaux définis par la CEI 871-1, ainsi que de l'application particulière.

Si le taux d'harmoniques est élevé, il convient d'utiliser un relais particulier qui mesure la tension de crête. Pour éviter les fonctionnements intempestifs du relais, il est recommandé que le rapport de retour soit aussi élevé que possible.

8.3 Protection contre les creux de tension

Si la tension est nulle ou anormalement basse (par exemple $0,8 U_N$), il convient que le disjoncteur de la batterie de condensateurs soit ouvert et verrouillé jusqu'à ce que la tension retrouve un niveau normal. Cela parce qu'au cours de la remise sous tension, le courant magnétisant d'appel des transformateurs de puissance contient beaucoup d'harmoniques et le condensateur peut entrer en résonance avec le réseau à l'une de ces fréquences.

Les disjoncteurs des transformateurs de puissance et des batteries de condensateurs peuvent aussi être coordonnés pour éviter ces surtensions et ces surintensités.

8.4 Réenclenchement

Si une batterie de condensateurs n'est pas pourvue de réactances de décharge (cas habituel), il est bon de retarder la remise en service de la batterie après déconnexion du réseau, de la durée définie par le constructeur, habituellement de 3 min à 10 min. Avant la remise en service, il convient que la tension résiduelle soit inférieure à $0,1 U_N$.

9 Autres protections

9.1 Parafoudres

Les indications ci-dessous s'appliquent principalement aux parafoudres du type varistance à oxyde métallique (MOV) (voir CEI 99-4).

8 Over and undervoltage

8.1 Operation

For modern power capacitors, voltage withstand is often the decisive factor rather than thermal limitation. It may therefore be necessary to use overvoltage protection to complement the conventional overload protection based on current measurement.

Overvoltage protection may be arranged by means of peak value sensitive voltage relays with inverse voltage-time characteristics. Current relays with integrating functions to obtain the instantaneous peak voltage may also be used.

The voltage protection relay is also used to accomplish undervoltage protection and interlocking functions at reclosing.

Typically the voltage source for this protection system is derived from voltage transformers connected on the bus side of the capacitor switch. It should not be derived from voltage transformers connected line-to-earth on the capacitor side of the switch.

8.2 Overvoltage protection

Protection against overvoltage should take into account levels according to IEC 871-1 and the particular application.

If the harmonic content is high, a special relay that measures the peak voltage should be used. To avoid undesired relay operations, the resetting ratio should be as high as possible.

8.3 Undervoltage protection

If the voltage is zero or abnormally low (e.g. $0,8 U_N$), the circuit-breaker of the capacitor bank should be opened and interlocked until the voltage returns to normal level. This is because upon re-energization the magnetization inrush current of power transformers contains a lot of harmonics and the capacitor may be in resonance with the network at one of these frequencies.

The circuit-breakers of power transformers and capacitor banks may also be coordinated to avoid these overvoltages and surge currents.

8.4 Reclosing

If a capacitor bank is not provided with discharge reactors (most usual case), reconnection of the bank after disconnection from the network should be delayed for the period defined by the manufacturer, usually 3 min to 10 min. Before reconnection, the residual voltage should be less than $0,1 U_N$.

9 Other protection

9.1 Surge arresters

The guidelines below are applicable mainly to surge arresters of metal oxide varistor (MOV) types (see IEC 99-4).

9.1.1 *Fonctionnement*

Le but des parafoudres est de limiter les surtensions éventuelles à des niveaux acceptables pour l'équipement à protéger. Le parafoudre MOV est pourvu d'une résistance non linéaire dont la valeur diminue de plusieurs ordres de grandeur lorsque la tension atteint un certain niveau. Cela limite la tension instantanée au niveau de protection désiré.

9.1.2 *Transitoires de foudre*

Dans les réseaux d'énergie, les parafoudres sont traditionnellement raccordés entre phase et terre et/ou entre neutre et terre. Leur but est principalement la protection contre la foudre, et l'évaluation de la performance requise du parafoudre est basée sur la valeur de crête du courant de foudre et les caractéristiques du réseau telles que l'impédance, le niveau d'isolement, etc. Les parafoudres ne sont pas destinés principalement à la protection des condensateurs car les batteries de condensateurs elles-mêmes réduisent les tensions transitoires provoquées par les chocs de foudre.

9.1.3 *Transitoires de manoeuvre*

Lorsque les disjoncteurs réamorcent, ou lorsque des défaillances dans l'allumage se produisent dans des systèmes commandés par thyristors, les condensateurs peuvent subir des surtensions sévères. Dans ce cas, la protection par parafoudre sera bénéfique.

Si le risque de réamorçage lors des manoeuvres doit être considéré, il convient de mener une étude approfondie des conditions de tension et des performances du parafoudre avant de choisir les composants.

9.1.4 *Surtensions temporaires*

Les batteries de condensateurs exposées à des surtensions temporaires à fréquence industrielle (et aux harmoniques) peuvent être protégées par le branchement de parafoudres directement en parallèle avec chaque section de condensateurs.

Des surtensions temporaires peuvent provenir de défauts monophasés entre phase et terre ou d'oscillations provoquées par l'enclenchement des filtres accordés à basses fréquences. Elles sont caractérisées par une durée assez longue (plusieurs périodes). En général, il convient dans ces cas d'évaluer les tensions dynamiques et l'énergie auxquelles les composants du parafoudre seront soumis.

Des indications sur les surtensions temporaires admissibles en fonction du temps pour les varistances à oxyde métallique sont données par le fournisseur.

9.1.5 *Tension assignée*

La tension assignée d'un parafoudre est utilisée comme paramètre de référence pour corréler les caractéristiques de fonctionnement et de protection. Elle est définie par le niveau pour lequel un certain courant traverse le parafoudre. Cette condition est habituellement permise pour des durées de l'ordre de quelques minutes seulement.

Le choix des caractéristiques du parafoudre est un compromis entre le niveau de protection et l'aptitude à supporter des surtensions temporaires. En augmentant la tension assignée du parafoudre, la probabilité qu'il puisse supporter des surtensions est augmentée, mais la marge de protection est réduite.

Normalement, il convient que la tension de service en régime continu aux bornes de l'équipement ne dépasse pas 80 % de la tension assignée d'un parafoudre MOV. La durée et la fréquence des surtensions peuvent exiger une tension de fonctionnement en régime continu inférieure à 80 % de la tension assignée du parafoudre.

9.1.1 Operation

The purpose of the surge arresters is to limit possible overvoltages to levels not excessive to the protected equipment. The MOV arrester has a non-linear resistance that decreases several orders of magnitude when the voltage reaches a certain level. This limits the instantaneous voltage to a desired protective level.

9.1.2 Lightning transients

Surge arresters are traditionally used in power systems connected phase-ground and/or neutral-ground. Their purpose is mainly to protect against lightning surges, and the evaluation of necessary arrester performance is based on lightning peak current and system characteristics such as line impedance, line insulation level, etc. Surge arresters are not mainly intended for capacitor protection as a capacitor bank itself reduces transient voltages caused by lightning surges.

9.1.3 Switching transients

If circuit-breakers restrike or if misfiring failures occur in thyristor controlled systems, capacitors may experience severe overvoltages. In this case, arrester protection will be beneficial.

If the risk of restriking at switching is to be considered, a thorough investigation of voltage conditions and arrester capability should be carried out before selecting the components.

9.1.4 Temporary overvoltages

Capacitor banks exposed to temporary overvoltages of power frequency (and harmonics) may be protected by connection of arresters directly in parallel to each capacitor branch.

Temporary overvoltages may be caused by single-phase ground faults or switching in oscillations in low order tuned filters. They are characterized by fairly long duration (number of cycles). Generally detailed evaluation of dynamic voltages and energy loading of the arrester components should be carried out in these cases.

Data on permissible temporary overvoltages versus time for MOV's are given by the suppliers.

9.1.5 Rated voltage

The rated voltage of an arrester is used as a reference parameter to correlate operating and protective characteristics. It is defined as the level where a certain current flows through the arrester; this condition is usually permitted for durations in the order of minutes only.

The choice of the arrester rating is a compromise between protective level and temporary overvoltage capability. By increasing the rated voltage of the arrester, the probability to withstand overvoltage is increased, but the margin of protection is reduced.

Normally the continuous operating voltage across the equipment should not exceed 80 % of the rated voltage for a MOV arrester. Duration and frequency of the overvoltages may require the continuous operating voltage to be less than 80 % of the arrester rating.

9.1.6 Absorption d'énergie

Pour un choix correct des parafoudres MOV, il convient de vérifier l'énergie maximale développée pendant une décharge. Pour les chocs de foudre, l'évaluation est directement basée sur des estimations de charge de foudre et sur les caractéristiques de tension du parafoudre.

Pour les manoeuvres et les surtensions temporaires, une évaluation plus détaillée du développement de l'énergie dans le parafoudre sera faite. L'aptitude d'absorption de l'énergie est habituellement spécifiée par le fournisseur en termes de kilojoules par kilovolt de tension assignée.

9.2 Dispositifs d'amortissement

9.2.1 Manoeuvre d'un condensateur

Les dispositifs d'amortissement, réactances et/ou résistances, connectés en série avec une section de condensateurs, sont quelquefois utilisés pour limiter l'amplitude des transitoires de manoeuvre. Les phénomènes transitoires au moment de la mise sous tension d'une batterie de condensateurs sont caractérisés par un courant d'appel très élevé à travers le condensateur et une surtension transitoire pouvant atteindre le double de la tension assignée.

9.2.2 Courants d'appel

Les courants d'appel peuvent affecter la performance des condensateurs ou de l'appareillage de manoeuvre. Les condensateurs peuvent résister à des courants transitoires allant jusqu'à 100 fois le courant assigné mais les disjoncteurs sont souvent limités à des valeurs inférieures.

La valeur des réactances d'amortissement est normalement inférieure à 1 % de l'impédance de la batterie.

La valeur maximale de crête du courant d'appel lors du raccordement de la batterie à la source d'énergie peut être calculée comme indiqué dans la CEI 871-1:

$$\hat{I}_s \approx I_N \sqrt{\frac{2S}{Q}}$$

où

$\hat{I}_s$ est le courant d'appel de crête de la batterie, en ampères;

I_N est le courant assigné pour la batterie de condensateurs (valeur efficace), en ampères;

S est la puissance de court-circuit (MVA) au point où le condensateur sera connecté;

Q est la puissance de la batterie, en mégavars.

Pour le calcul du courant de crête lors de l'enclenchement de batteries en parallèle, la formule suivante peut être utilisée:

$$\hat{I}_s = \frac{U\sqrt{2}}{\sqrt{X_C X_L}} \quad \text{où} \quad X_C = 3U^2 \left(\frac{1}{Q_1} + \frac{1}{Q_2} \right) \cdot 10^{-6}$$

où

$\hat{I}_s$ est le courant d'appel de crête de la batterie, en ampères;

U est la tension entre phase et terre, en volts (efficace);

X_C est la réactance capacitive série par phase, en ohms;

X_L est la réactance inductive par phase entre les batteries, en ohms;

Q_1 est la puissance de la batterie à raccorder, en mégavars;

Q_2 est la somme des puissances des batteries déjà sous tension, en mégavars.

9.1.6 Energy absorption

For proper selection of MOV arresters, the maximum energy developed during a discharge should be checked. For lightning duties, the evaluation is directly based on estimates on lightning charges and arrester voltage characteristics.

For switching and temporary overvoltage conditions, a more detailed evaluation of arrester energy development should be carried out. The energy absorption capability is usually specified by the supplier in terms of kilojoules per kilovolt of rating.

9.2 Damping devices

9.2.1 Capacitor switching

Damping devices, reactors and/or resistors, connected in series with a capacitor branch, are sometimes used for limiting the magnitude of switching transients. The transient phenomena at energization of a capacitor bank are characterized by a very high inrush current through the capacitor and a transient overvoltage with a magnitude up to two times rated voltage.

9.2.2 Inrush currents

The inrush currents may affect performance of the capacitor or the switching device. Capacitors may withstand current surges up to 100 times rated current, but the circuit-breakers are often limited to lower values.

The reactance of current-limiting reactors is normally less than 1 % of the bank impedance.

The maximum inrush peak current when switching a bank to the power supply may be calculated as shown in IEC 871-1:

$$\hat{I}_s = I_N \sqrt{\frac{2S}{Q}}$$

where

$\hat{I}_s$ is the peak inrush bank current, in amperes;

I_N is the rated capacitor bank current (r.m.s.), in amperes;

S is the short-circuit power (MVA) at the point where the capacitor is to be connected;

Q is the output of the bank, in megavars.

For calculating peak current when switching parallel banks the following formula may be used:

$$\hat{I}_s = \frac{U\sqrt{2}}{\sqrt{X_C X_L}} \quad \text{where} \quad X_C = 3U^2 \left(\frac{1}{Q_1} + \frac{1}{Q_2} \right) \cdot 10^{-6}$$

where

$\hat{I}_s$ is the peak inrush bank current, in amperes;

U is the phase-to-earth voltage, in volts (r.m.s.);

X_C is the series-connected capacitive reactance per phase, in ohms;

X_L is the inductive reactance per phase between the banks, in ohms;

Q_1 is the output of the bank to be switched in, in megavars;

Q_2 is the sum of the output(s) of the bank(s) already energized, in megavars.

9.2.3 Tensions transitoires

Des réactances connectées en série et judicieusement choisies peuvent réduire l'amplitude des surtensions transitoires à des niveaux acceptables. D'autres moyens pour amortir les transitoires consistent à combiner des résistances et des réactances, ou à utiliser seulement des résistances d'amortissement.

9.2.4 Caractéristiques

En plus de la valeur d'inductance souhaitée, il convient de spécifier la valeur du courant permanent (efficace) ainsi que celle du courant de crête transitoire maximal pour la réactance d'amortissement.

Pour un fonctionnement en service continu, il convient de prendre en compte l'intensité maximale admissible du condensateur. D'après la CEI 871-1 ce maximum est de 1,3 fois à 1,5 fois le courant assigné du condensateur.

10 Sécurité

10.1 Dispositifs de décharge

Il est bon que chaque batterie de condensateurs soit pourvue de dispositifs pour décharger la batterie après déconnexion du réseau.

Les durées de décharge spécifiées peuvent être obtenues par des résistances de décharge internes (incorporées) dans chaque condensateur ou par des dispositifs de décharge externes conçus pour l'ensemble de l'équipement de condensateurs.

Avant de toucher une quelconque partie active, attendre au moins 10 min pour que la batterie s'autodécharge et ensuite mettre en court-circuit les bornes du condensateur et les mettre à la terre.

10.1.1 Résistances internes

Des résistances internes sont en général intégrées dans les condensateurs individuels. Elles sont conçues pour assurer la décharge de chaque condensateur, et donc de toute la batterie. Dans une batterie de condensateurs avec plusieurs sections de condensateurs en série, la tension résiduelle aux bornes de la batterie est égale à la somme des tensions résiduelles de chaque section.

10.1.2 Dispositifs de décharge externes

Des dispositifs de décharge externes sont utilisés dans des cas particuliers. Il convient que chaque dispositif soit adapté aux conditions existant sur le lieu d'implantation de l'équipement et qu'il ait une distance d'isolement, une ligne de fuite et un niveau d'isolement appropriés. Si les condensateurs n'ont pas de résistances de décharge internes, il convient qu'il n'y ait pas de dispositif d'isolement entre la batterie de condensateurs et le dispositif de décharge.

Des réactances de décharge peuvent être utilisées, connectées directement en parallèle avec les batteries de condensateurs. Habituellement deux réactances sont connectées entre phases pour des raisons économiques. En fonctionnement normal, seul le courant magnétisant traverse la réactance. Lorsque l'équipement de condensateurs est déconnecté, toute l'énergie emmagasinée s'écoule dans la bobine en quelques secondes. La majeure partie de l'énergie est dissipée dans la réactance. Il convient de limiter le nombre de décharges par unité de temps de manière telle qu'aucune surchauffe de la réactance ne se produise.

9.2.3 *Voltage transients*

Adequately selected series reactors may reduce the magnitude of transient overvoltages to acceptable levels. Other means for damping of transients are a combination of resistors and reactors or damping resistors only.

9.2.4 *Ratings*

Besides the desired inductance value, the continuous current load (r.m.s.) as well as maximum transient peak current should be specified for the damping reactor.

For continuous rating the maximum permissible current for the capacitor should be taken into account. According to IEC 871-1 this maximum is 1,30 to 1,50 times the rated capacitor current.

10 **Safety**

10.1 *Discharging devices*

Each capacitor bank should be provided with means for discharging the bank after disconnection from the network.

The specified discharging times may be met by applying either internal (incorporated) discharge resistors per capacitor or, external discharge devices rated for the entire capacitor equipment.

Before touching any live parts, allow at least 10 min for the bank to self-discharge and then short-circuit each capacitor terminal together and to ground.

10.1.1 *Internal resistors*

Internal resistors are generally built into the individual capacitors. They are designed to insure the discharge of each capacitor, and therefore the whole bank. In a bank with several sections of capacitors in series, the residual voltage on the bank terminal is equal to the sum of the residual voltage in each section.

10.1.2 *External discharge devices*

External discharge devices are used in special cases. Each device should be adapted to the conditions existing at the site of erection of the equipment and have suitable strike distance, creepage path and insulation level. If the capacitors have no internal discharge resistors, there should be no isolating device between the capacitor bank and the discharge device.

Discharge reactors may be used, connected directly in parallel with the capacitor banks. Usually two reactors are connected line-to-line across two phases because of economical reasons. Under operation conditions, only the magnetizing current flows in the reactor. When switching off the capacitor equipment, all the stored energy circulates through the coil in a few seconds. Most of the energy is dissipated in the reactor. The number of discharges per unit of time should be restricted so that no overheating of the discharge reactor occurs.

Les enroulements de transformateurs ou de moteurs sont considérés comme des impédances de décharges convenables, de même que le primaire des transformateurs de tension.

10.1.3 Décharge après déconnexion

Il convient que l'équipement de condensateurs déconnecté s'autodécharge complètement, quel que soit l'emplacement du dispositif de décharge, que celui-ci soit directement placé sur chaque condensateur ou aux bornes de l'équipement.

Toutefois, un équipement de condensateur avec des connexions en série ou en étoile, dans lequel il y a eu des claquages d'éléments ou des amorçages internes ou externes, peut ne pas être déchargé complètement par un dispositif de décharge connecté aux bornes de l'équipement du condensateur. Bien qu'il n'y ait pas de tension mesurable aux bornes de l'équipement, il peut y avoir, dans l'équipement de condensateur, une quantité dangereuse d'énergie stockée, avec des charges opposées. Celles-ci, dénommées «charges piégées», peuvent persister pendant une période de quelques mois et ne peuvent être déchargées que par une décharge individuelle de chaque section de la batterie.

Tous les risques décrits ci-dessus sont normalement évités en utilisant des condensateurs avec des résistances de décharge internes. Toutefois, le risque existe qu'une résistance soit détruite pendant une défaillance du condensateur conduisant à une charge rémanente dans le condensateur.

Il est important de noter qu'un dispositif de décharge ne peut se substituer à la mise en court-circuit et à la terre des bornes avant et pendant la maintenance.

10.2 Parties métalliques hors tension

Il convient de fixer le potentiel de chaque partie métallique de la batterie (châssis et/ou cuve de condensateur). L'équipotentialité est obtenue en raccordant les cuves et le châssis avec un câblage de section appropriée.

Windings of transformers or motors are considered as suitable discharge impedances as well as the primary of voltage transformers.

10.1.3 *Discharging after disconnection*

Disconnected capacitor equipments should completely self-discharge, no matter where the discharge device is located, be it directly at each capacitor or at the connecting terminals of the equipment.

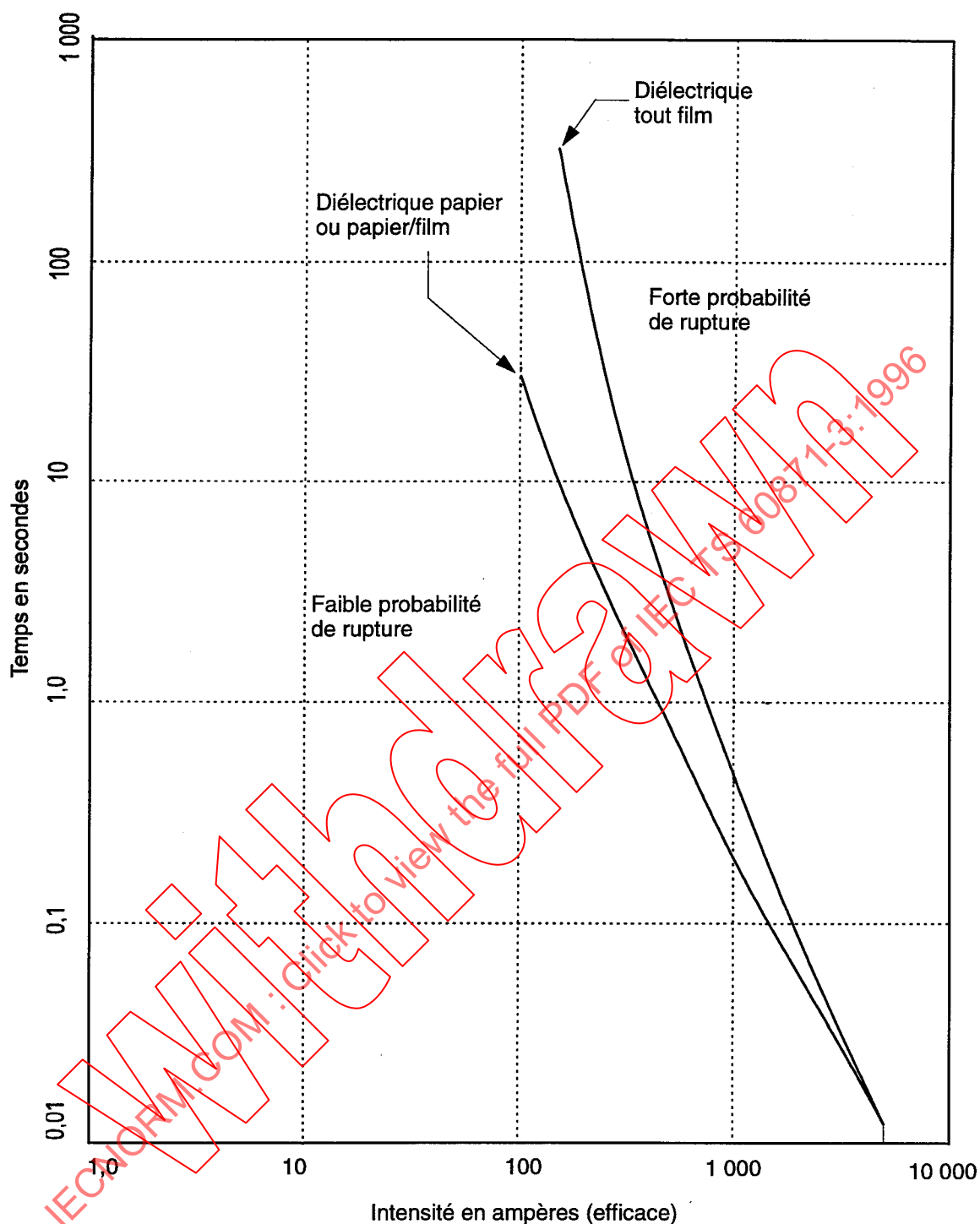
However, capacitor equipment comprising series connections and star connections, which have undergone puncturing of elements or internal or external arcing, may not be discharged completely through discharge devices connected to the terminals of the capacitor equipment. Although there is no voltage measurable at the equipment terminals, dangerous amounts of stored energy, with opposing charges, may exist in the capacitor equipment. These so-called "trapped charges" may persist over a period of several months and can only be discharged by individually discharging each section of the bank.

All the above-described risks are normally avoided by using capacitors with internal discharge resistors. However, there is a risk that a resistor may be destroyed during a capacitor failure leaving a charge on the capacitor.

It is important to note that a discharging device is not a substitute for short-circuiting the capacitor terminals together and to ground before and during handling.

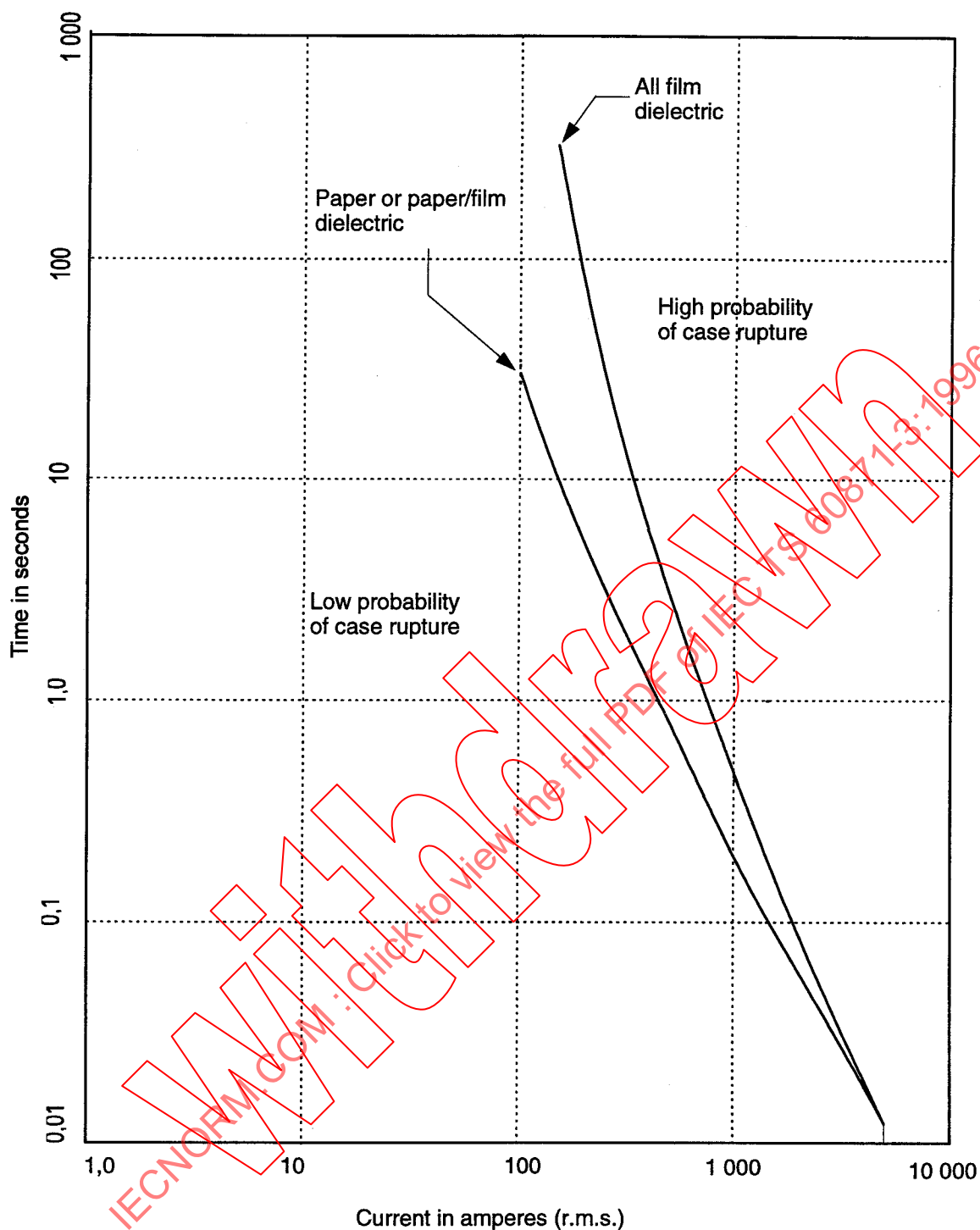
10.2 *Dead metallic parts*

The voltage of every metallic part of the bank (frame and/or capacitor container) should be fixed. The voltage continuity is obtained by connecting the containers and frame with conducting wire of adequate size.



NOTE – Les informations contenues dans la figure 2 sont extraites de la IEEE 18-1992 Standard for Shunt Power Capacitors, qui a fait l'objet d'un dépôt légal de l'Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc. (IEEE) en 1992. Ces informations ont été écrites dans le contexte de la norme IEEE 18-1992 de l'IEEE. L'IEEE n'engage pas sa responsabilité à propos de ces informations et ne saurait être tenue responsable de quelque dommage que ce soit, résultant tant de leur emplacement que de l'usage qui en serait fait dans la présente publication. Ces informations sont reproduites ici avec l'autorisation de l'IEEE.

Figure 2 – Courbes typiques en cas de rupture de la cuve pour un volume de cuve de 30 000 cm³ environ



NOTE – The information contained in figure 2 is copyrighted information of the IEEE extracted from IEEE standard 18-1992, IEEE standard for Shunt Power Capacitors copyright ©1992 by the Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc. (IEEE). This information was written within the context of IEEE standard IEEE 18-1992. The IEEE takes no responsibility or liability and will assume no liability for any damages resulting from the placement and context in this publication. Information is reproduced with the permission of the IEEE.

Figure 2 – Typical case rupture curves for approximately 30 000 cm³ case volume