NORME INTERNATIONALE

INTERNATIONAL STANDARD

CEI
IEC
60099-5

Edition 1.1

2000-03

Edition 1:1996 consolidée par l'amendement 1:1999
Edition 1:1996 consolidated with amendment 1:1999

Parafoudres –

Partie 5:
Recommandations pour le choix et l'utilisation

Surge arresters –

Part 5:
Selection and application recommendations



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 60099-5:1996+A1:1999

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

Numéros des publications

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

Publications consolidées

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

Validité de la présente publication

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

Des renseignements relatifs à la date de reconfirmation de la publication sont disponibles dans le Catalogue de la CEI.

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

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

Terminologie, symboles graphiques et littéraux

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

Pour les symboles graphiques, les symboles littéraux et les signes d'usage général approuvés par la CEI, le lecteur consultera la CEI 60027: *Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique,* la CEI 60417: S*ymboles graphiques utilisables sur le matériel. Index, relevé et compilation des feuilles individuelles,* et la CEI 60617: *Symboles graphiques pour schémas.*

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

Numbering

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

Consolidated publications

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

Validity of this publication

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

Information relating to the date of the reconfirmation of the publication is available in the IEC catalogue.

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

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

Terminology, graphical and letter symbols

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

For graphical symbols, and letter symbols and signs approved by the IEC for general use, readers are referred to publications IEC 60027: *Letter symbols to be used in electrical technology*, IEC 60417: *Graphical symbols for use on equipment. Index, survey and compilation of the single sheets* and IEC 60617: *Graphical symbols for diagrams.*

* See web site address on title page.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

NORME INTERNATIONALE

INTERNATIONAL STANDARD

CEI
IEC
60099-5

Edition 1.1

2000-03

Edition 1:1996 consolidée par l'amendement 1:1999
Edition 1:1996 consolidated with amendment 1:1999

Parafoudres –

Partie 5:
Recommandations pour le choix et l'utilisation

Surge arresters –

Part 5:
Selection and application recommendations

© IEC 2000 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

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

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

International Electrotechnical Commission 3, rue de Varembé Geneva, Switzerland
Telefax: +41 22 919 0300 e-mail: inmail@iec.ch IEC web site http://www.iec.ch

Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE CK

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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS

Not for Resale

SOMMAIRE

Pages

AVANT-PROPOS 4
INTRODUCTION 6

Articles

SECTION 1: GÉNÉRALITÉS

1.1 Domaine d'application 8
1.2 Références normatives 8
1.3 Principes généraux d'utilisation des parafoudres 8
1.4 Méthode générale pour le choix des parafoudres 10
1.5 Tenue à la pollution de l'enveloppe du parafoudre 14

SECTION 2: PARAFOUDRES À RÉSISTANCE VARIABLE AVEC ÉCLATEURS SELON LA CEI 60099-1

2.1 Caractéristiques des parafoudres avec éclateurs 16
2.2 Choix des parafoudres avec éclateurs, connectés entre phase et terre 18

SECTION 3: PARAFOUDRES À OXYDE MÉTALLIQUE SANS ÉCLATEUR SELON LA CEI 60099-4

3.1 Données caractéristiques des parafoudres à oxyde métallique sans éclateur 28
3.2 Choix des parafoudres à oxyde métallique sans éclateur, connectés entre phase et terre 32

SECTION 4 UTILISATION DES PARAFOUDRES

4.1 Principe de la coordination des isolements 44
4.2 Protection contre les surtensions à front lent 44
4.3 Protection contre les surtensions de foudre 48

SECTION 5: PARAFOUDRES DESTINÉS À UNE UTILISATION SPÉCIALE

5.1 Parafoudres pour neutres de transformateurs 60
5.2 Parafoudres entre phases 62
5.3 Parafoudres pour machines tournantes 64
5.4 Autres utilisations particulières des parafoudres 64
5.5 Parafoudres pour conditions de service anormales 66

SECTION 6: INDICATEURS DE DIAGNOSTIC SUR SITE DE PARAFOUDRES À OXYDE DE ZINC

6.1 Généralités 66
6.2 Mesure du courant de fuite total 80
6.3 Mesure du courant de fuite résistif ou des pertes actives 82
6.4 Informations sur le courant de fuite fournies par le constructeur du parafoudre 90
6.5 Résumé des méthodes de diagnostic 94

Annexe A (informative) Détermination des surtensions temporaires causées par des défauts à la terre 96
Annexe B (informative) Pratique courante 108
Annexe C (informative) Bibliographie 110

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

CONTENTS

Page

FOREWORD 5
INTRODUCTION 7

Clause

SECTION 1: GENERAL

1.1 Scope 9
1.2 Normative references 9
1.3 General principles for the application of surge arresters 9
1.4 General procedure for the selection of surge arresters 11
1.5 Polluted housing arrester withstand 15

SECTION 2: NON-LINEAR RESISTOR TYPE GAPPED SURGE ARRESTERS ACCORDING TO IEC 60099-1

2.1 Characteristic data of gapped surge arresters 17
2.2 Selection of gapped surge arresters phase-to-earth 19

SECTION 3: GAPLESS METAL-OXIDE SURGE ARRESTERS ACCORDING TO IEC 60099-4

3.1 Characteristic data of gapless metal-oxide surge arresters 29
3.2 Selection of gapless metal-oxide surge arresters phase-to-earth 33

SECTION 4: APPLICATION OF ARRESTERS

4.1 Principle of insulation co-ordination 45
4.2 Protection from slow-front overvoltages 45
4.3 Protection from lightning overvoltages 49

SECTION 5: SURGE ARRESTERS FOR SPECIAL APPLICATION

5.1 Surge arresters for transformer neutrals 61
5.2 Surge arresters between phases 63
5.3 Surge arresters for rotating machines 65
5.4 Further special applications of surge arresters 65
5.5 Surge arresters for abnormal service conditions 67

SECTION 6: DIAGNOSTIC INDICATORS OF METAL-OXIDE SURGE ARRESTERS IN SERVICE

6.1 General 67
6.2 Measurement of the total leakage current 81
6.3 Measurement of the resistive leakage current or the power loss 83
6.4 Leakage current information from the arrester manufacturer 91
6.5 Summary of diagnostic methods 95

Annex A (informative) Determination of temporary overvoltages due to earth faults 97
Annex B (informative) Current practice 109
Annex C (informative) Bibliography 111

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

_____

PARAFOUDRES –

Partie 5: Recommandations pour le choix et l'utilisation

AVANT-PROPOS

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

La Norme internationale CEI 60099-5 a été établie par le comité d'études 37 de la CEI: Parafoudres.

Le texte de la présente norme annule et remplace la CEI 60099-1A, publiée en 1965.

La présente version consolidée de la CEI 60099-5 comprend la première édition (1996) [documents 37/123/FDIS et 37/144/RVD], son corrigendum d'avril 1996 et son amendement 1 (1999) [documents 37/224/FDIS et 37/230/RVD].

Le contenu technique de cette version consolidée est donc identique à celui de l'édition de base et à son amendement; cette version a été préparée par commodité pour l'utilisateur.

Elle porte le numéro d'édition 1.1.

Une ligne verticale dans la marge indique les textes modifiés par l'amendement 1 et le corrigendum.

Les annexes A, B et C sont données uniquement à titre d'information.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

SURGE ARRESTERS –

Part 5: Selection and application recommendations

FOREWORD

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

International Standard IEC 60099-5 has been prepared by IEC technical committee 37: Surge arresters.

The text of this standard cancels and replaces IEC 60099-1A, published in 1965.

This consolidated version of IEC 60099-5 consists of the first edition (1996) [documents 37/123/FDIS and 37/144/RVD], corrigendum of April 1996, and its amendment 1 (1999) [documents 37/224/FDIS and 37/230/RVD].

The technical content is therefore identical to the base edition and its amendment and has been prepared for user convenience.

It bears the edition number 1.1.

A vertical line in the margin shows where the base publication has been modified by amendment 1 and corrigendum.

Annexes A, B and C are for information only.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

INTRODUCTION

La présente partie de la CEI 60099 est destinée à permettre un choix et une mise en oeuvre optimale des parafoudres dont les caractéristiques sont spécifiées dans la CEI 60099-1 et la CEI 60099-4.

Des méthodes de calcul plus complexes que celles indiquées ici peuvent être utilisées pour obtenir une détermination plus précise des impératifs du réseau considéré; il convient que ces méthodes soient, cependant, conformes aux principes exposés dans la présente norme.

Les caractéristiques des parafoudres résultant de l'application de la présente norme seront différentes d'un réseau à l'autre. Aucune application numérique particulière ne peut être privilégiée. Il est probable, cependant, que pour certains réseaux, ou pour certains pays, les exigences de fiabilité et la conception des réseaux sont assez uniformes pour que les recommandations de la présente norme puissent se traduire par la définition de gammes limitées de parafoudres. Les utilisateurs de parafoudres ne seront alors pas tenus de reprendre pour chaque nouvelle installation toute la démarche exposée dans le présent document et pourront se contenter de reproduire les choix relevant de la pratique antérieure. Les valeurs chiffrées correspondantes pourront être introduites par les comités nationaux à l'annexe B.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

INTRODUCTION

This part of IEC 60099 is intended to allow optimal selection and application of surge arresters specified according to IEC 60099-1 and IEC 60099-4.

More complex calculation methods than those indicated here may be used in order to obtain more precise determination of the requirement for the system concerned; however, these calculations should be performed in accordance with the principles given in this standard.

The characteristics of surge arresters derived from the application of this standard are different for different systems. No particular numerical value may be favoured. It is likely, however, that for some systems, or in some countries, the system reliability requirements and design are sufficiently uniform that the recommendations of the present standard may lead to the definition of narrow ranges of arresters. The user of surge arresters will, in that case, not be required to apply the whole process introduced here, to any new installation and he may reproduce the selection of characteristics resulting from prior practice. Corresponding numerals may be introduced by national authorities in annex B.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

PARAFOUDRES –

Partie 5: Recommandations pour le choix et l'utilisation

Section 1: Généralités

1.1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 60099 comporte des recommandations pour le choix et l'emploi des parafoudres à utiliser sur des réseaux triphasés de tension nominale supérieure à 1 kV. Elle concerne les parafoudres à résistance variable avec éclateurs conformes à la CEI 60099-1, ainsi que les parafoudres à oxyde métallique sans éclateur conformes à la CEI 60099-4.

1.2 Références normatives

Les documents normatifs suivants contiennent des dispositions qui, par suite de la référence qui y est faite, constituent des dispositions valables pour la présente partie de la CEI 60099. Pour les références datées, les amendements ultérieurs ou les révisions de ces publications ne s'appliquent pas. Toutefois, les parties prenantes aux accords fondés sur la présente partie de la CEI 60099 sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des documents normatifs indiqués ci-après. Pour les références non datées, la dernière édition du document normatif en référence s'applique. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des Normes internationales en vigueur.

CEI 60071-1:1993, *Coordination de l'isolement – Partie 1: Définitions, principes et règles*

CEI 60071-2:1976, *Coordination de l'isolement – Partie 2: Guide d'application*

NOTE La troisième édition de cette norme est actuellement en cours de révision.

CEI 60099-1:1991, *Parafoudres – Partie 1: Parafoudres à résistance variable avec éclateurs pour réseaux à courant alternatif*

CEI 60099-3:1990, *Parafoudres – Partie 3: Essais de pollution artificielle des parafoudres*

NOTE Ce Rapport Technique s'applique aux parafoudres avec éclateurs conformément à la CEI 60099-1.

CEI 60099-4:1991, *Parafoudres – Partie 4: Parafoudres à oxyde métallique sans éclateur pour réseaux à courant alternatif*

CEI 600507:1991, *Essais sous pollution artificielle des isolateurs pour haute tension destinés aux réseaux à courant alternatif*

CEI 60815:1986, *Guide pour le choix des isolateurs sous pollution.*

1.3 Principes généraux d'utilisation des parafoudres

La CEI 60071-1 spécifie des tensions de tenue pour les deux gammes suivantes de tensions les plus élevées pour le matériel:

– gamme I: tension supérieure à 1 kV et inférieure ou égale à 245 kV

– gamme II: tension supérieure à 245 kV

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

SURGE ARRESTERS –

Part 5: Selection and application recommendations

Section 1: General

1.1 Scope

This part of IEC 60099 provides recommendations for the selection and application of surge arresters to be used in three-phase systems with nominal voltages above 1 kV. It applies to non-linear resistor type gapped surge arresters as defined in IEC 60099-1 and to gapless metal-oxide surge arresters as defined in IEC 60099-4.

1.2 Normative references

The following normative documents contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this part of IEC 60099. For dated references, subsequent amendments to, or revisions of, any of these publications do not apply. However, parties to agreements based on this part of IEC 60099 are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent editions of the normative documents indicated below. For undated references, the latest edition of the normative document referred to applies. Members of IEC and ISO maintain registers of currently valid International Standards.

IEC 60071-1:1993, *Insulation co-ordination – Part 1: Definitions, principles and rules*

IEC 60071-2:1976, *Insulation co-ordination – Part 2: Application guide*

NOTE The third edition of this standard is presently under revision.

IEC 60099-1:1991, *Surge arresters – Part 1: Non-linear resistor type gapped surge arresters for a.c. systems*

IEC 60099-3:1990, *Surge arresters – Part 3: Artificial pollution testing of surge arresters*

NOTE This Technical Report applies to gapped surge arresters according to IEC 60099-1.

IEC 60099-4:1991, *Surge arresters – Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems*

IEC 60507:1991, *Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on a.c. systems*

IEC 60815:1986, *Guide for the selection of insulators in respect of polluted conditions*

1.3 General principles for the application of surge arresters

IEC 60071-1 specifies withstand voltages for two ranges of highest voltages for equipment:

– range I: above 1 kV to 245 kV included
– range II: above 245 kV

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Dans les réseaux aériens ou mixtes de la gamme I, les matériels sont surtout menacés par les coups de foudre induits et directs sur les lignes aériennes auxquelles ils sont raccordés. Dans les réseaux souterrains qui ne sont pas raccordés à des lignes aériennes, les surtensions les plus susceptibles de se produire sont occasionnées par des défauts ou des manoeuvres. Il est possible, cependant, que, dans des circonstances peu fréquentes, des surtensions soient induites par des coups de foudre. Dans les réseaux de la gamme II, en plus des facteurs cités pour la gamme I, les surtensions de manoeuvre deviennent importantes, et ce d'autant plus que la tension du réseau est élevée. Les surtensions peuvent provoquer des contournements et des dégâts sérieux aux matériels, et par là-même compromettre l'alimentation en énergie des usagers. Il est indispensable d'empêcher cela par une coordination appropriée entre les parafoudres et la tenue de l'isolation. Il est donc recommandé d'utiliser des parafoudres lorsqu'il peut se produire des surtensions de foudre ou de fortes surtensions de manoeuvre susceptibles d'être dangereuses pour le matériel.

Il est souhaitable que ces parafoudres soient des éléments fiables du réseau. Ils sont conçus de façon à pouvoir supporter les tensions et les courants qui s'écouleront à travers eux avec une fiabilité suffisamment grande qui prenne en compte la pollution et d'autres problèmes relatifs au site. Pour chaque catégorie de réseaux, ces contraintes de tension sont (voir la CEI 60071-1):

– la tension de service;
– les surtensions temporaires;
– les surtensions à front lent;
– les surtensions à front rapide;

les surtensions à front lent dues à des manoeuvres ayant une importance particulière pour les parafoudres protégeant des matériels de la gamme II.

D'une façon générale, une bonne protection des matériels et l'emploi de parafoudres de tensions assignées élevées sont des exigences contradictoires. Le choix d'un parafoudre convenable est donc un processus d'optimisation qui doit prendre en compte un grand nombre de paramètres relatifs au réseau et aux matériels.

Les parafoudres à oxyde métallique sans éclateur sont particulièrement bien adaptés pour les réseaux à neutre à la terre parce qu'ils offrent une meilleure protection contre les surtensions à front lent. Dans ces réseaux, l'utilisation de parafoudres a tendance à se porter essentiellement sur les parafoudres à oxyde métallique. Les parafoudres avec éclateurs peuvent offrir des avantages dans quelques réseaux à neutre isolé ou mis à la terre par bobine de compensation, pour lesquels les surtensions temporaires dues à un défaut à la terre peuvent être de longue durée et lorsqu'un bas niveau de protection est demandé. Outre le fait qu'il a été traditionnellement utilisé dans toutes les gammes de tensions, l'utilisation de ce type de parafoudre peut se révéler adaptée aux réseaux de la gamme I, en particulier pour les tensions les plus basses de la gamme.

1.4 Méthode générale pour le choix des parafoudres

La procédure itérative suivante, décrite dans l'organigramme de la figure 1, est recommandée pour le choix des parafoudres:

– déterminer la tension de régime permanent du parafoudre en fonction de la tension de service la plus élevée du réseau;
– déterminer la tension assignée du parafoudre en fonction des surtensions temporaires;

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

For range I systems containing overhead lines, the main risk to equipment arises from induced and direct lightning strokes to the connected overhead lines. In cable systems not connected to overhead lines, overvoltages due to faults or switching operations are most likely to occur. In rare cases, however, lightning induced overvoltages may also be generated. In systems of range II, in addition to range I factors, switching overvoltages become important, increasing with higher system voltages. Overvoltages may cause flashovers and serious damage to the equipment and thereby jeopardize the supply of power to users. It is essential to prevent this by the proper co-ordination of surge arresters with the insulation. It is, therefore, recommended to use surge arresters if there are possibilities of lightning overvoltages or high switching overvoltages which may be dangerous to the equipment.

These surge arresters should constitute a reliable part of the system. They are designed to withstand the voltages and the resulting currents through them with a sufficiently high reliability taking into account pollution and other site matters. In each system such voltage stresses are (see IEC 60071-1):

– operating voltage;
– temporary overvoltages;
– slow-front overvoltages;
– fast-front overvoltages;

where the slow-front overvoltages due to switching are of particular importance for arresters protecting range II equipment.

As a general principle, the best protection of equipment and high surge arrester rated voltages are contradicting requirements. Thus the selection of an adequate arrester constitutes an optimization process, which has to consider a great number of system and equipment parameters.

Gapless metal-oxide surge arresters are of particular advantage for earthed neutral systems, because they offer better protection against slow-front overvoltages. This arrester type is today widely installed in these systems and the application of arresters for such systems tends to concentrate on metal-oxide surge arresters. In some isolated or resonant earthed neutral systems, where earth fault temporary overvoltages may have long durations, gapped surge arresters may offer advantages, if protective levels are required to be low. While being the surge arrester traditionally used in all voltage ranges, the consideration of gapped arresters may be adequate for systems of range I, especially in the lower voltage range.

1.4 General procedure for the selection of surge arresters

The following iterative procedure, shown in the flow diagram of figure 1, is recommended for the selection of surge arresters:

– determine the continuous operating voltage of the arrester with respect to the highest system operating voltage;
– determine the rated voltage of the arrester with respect to the temporary overvoltages;

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

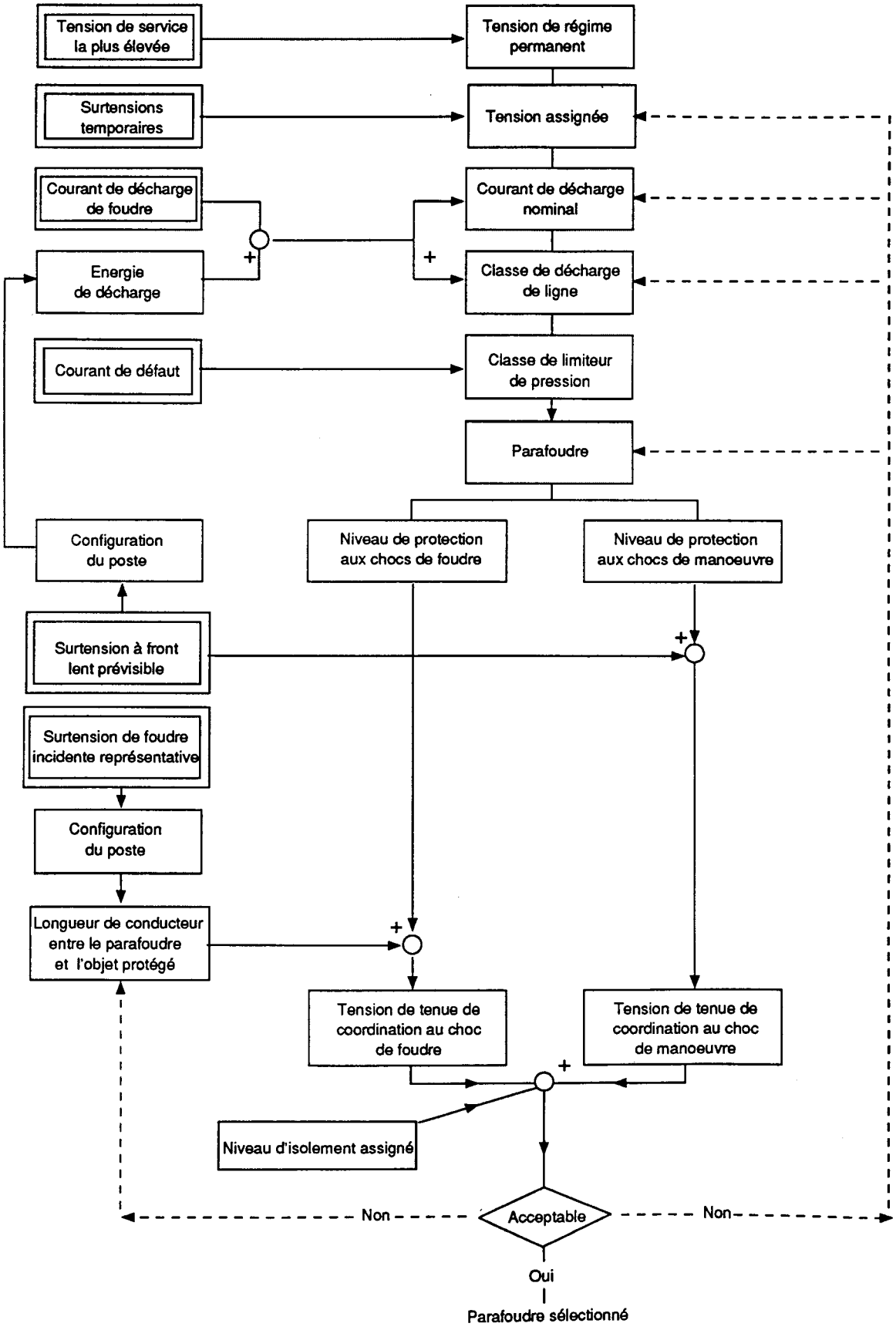


Figure 1 – Organigramme pour le choix des parafoudres

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

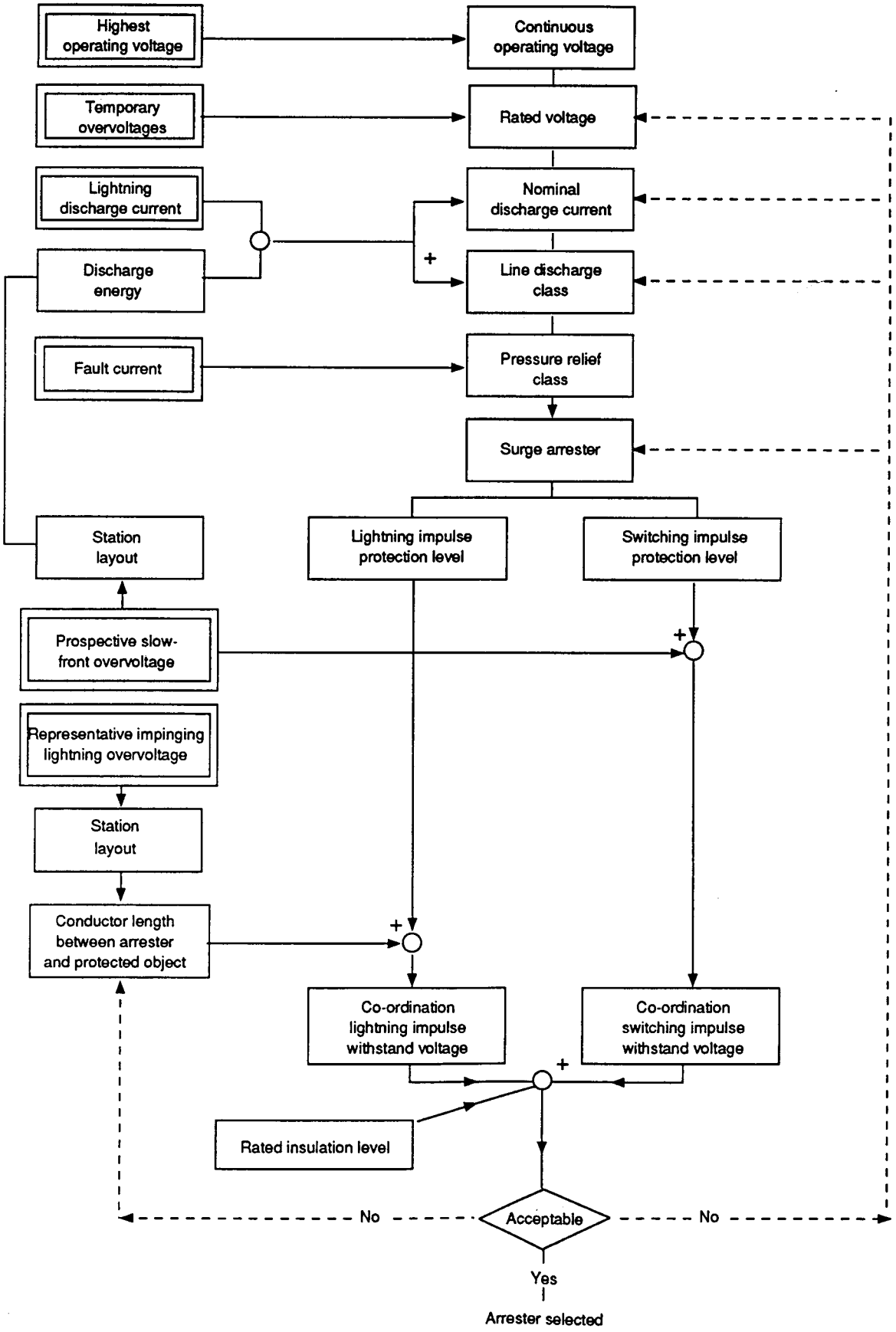


Figure 1 – Flow diagram for the selection of surge arresters

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

– estimer l'amplitude et la probabilité des courants de décharge de foudre prévisibles à travers le parafoudre, déterminer les contraintes liées à la décharge des lignes de transport et sélectionner le courant nominal de décharge, la valeur du choc de courant de grande amplitude et la classe de décharge de ligne du parafoudre;

NOTE Si des valeurs de courant de grande amplitude différentes des valeurs normalisées sont nécessaires (voir la note du tableau 6 de la CEI 60099-4), ces valeurs doivent être choisies en fonction du courant de décharge de foudre.

– sélectionner la classe de limiteur de pression du parafoudre en fonction du courant de défaut prévisible;

– sélectionner un parafoudre adapté aux exigences formulées ci-dessus;

– déterminer les caractéristiques de protection aux chocs de manoeuvre et de foudre;

– placer le parafoudre aussi près que possible du matériel à protéger;

– déterminer la tension de tenue de coordination aux chocs de manoeuvre du matériel protégé, en tenant compte des surtensions à front lent représentatives et de la configuration du réseau;

– déterminer la tension de tenue de coordination aux chocs de foudre, en prenant en considération:

  • la surtension de foudre incidente représentative telle que définie par le comportement vis-à-vis de la foudre de la ligne aérienne à laquelle est raccordé le parafoudre et le taux de défaillance acceptable du matériel protégé;

  • la configuration du poste;

  • la distance entre le parafoudre et le matériel protégé;

– déterminer le niveau d'isolement assigné du matériel selon la CEI 60071-1;

– si l'on désire que le niveau d'isolement assigné du matériel soit moins élevé que celui obtenu, il est recommandé d'étudier des solutions telles que le choix d'une tension de régime permanent moins élevée, d'une tension assignée moins élevée, d'un courant nominal de décharge plus élevé, d'une classe de décharge de ligne plus élevée, d'une conception différente de parafoudre ou une réduction de la distance entre le parafoudre et le matériel protégé.

NOTE Une tension de service permanent ou une tension assignée moins élevée peut diminuer la fiabilité en service des parafoudres.

Cette procédure itérative est détaillée dans les sections 2, 3 et 4 de ce document.

1.5 Tenue à la pollution de l'enveloppe du parafoudre

Les dépôts de pollution sur l'enveloppe peuvent causer des amorçages ou une augmentation de température des dispositifs de répartition de tension dans les parafoudres avec éclateurs et une forte augmentation de température des varistances dans les parafoudres à oxyde métallique. Afin de se prémunir contre les défaillances de parafoudres dans les zones polluées, il faut choisir des parafoudres capables de supporter les conditions de pollution locales. Bien que cela ne soit pas spécifié de manière explicite dans la CEI 60099-1 et la CEI 60099-4, il convient que les parafoudres utilisés dans des conditions de service normales résistent aux contraintes du niveau de pollution II (pollution moyenne) définies dans la CEI 60071-2. Si l'endroit où le parafoudre est installé est soumis à un niveau de pollution plus élevé, ceci risque de diminuer l'efficacité du parafoudre. Si l'on utilise des parafoudres de conception inadéquate dans des zones fortement polluées (niveau III) ou très fortement polluées (niveau IV), un lavage ou un graissage périodique peut se révéler efficace pour se prémunir contre les effets mentionnés ci-dessus.

Lorsqu'on a l'intention d'effectuer un lavage sous tension, il est nécessaire de s'assurer que les parafoudres ont été conçus pour de telles conditions de fonctionnement.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

– estimate the magnitude and probability of the expected lightning discharge currents through the arrester, determine the transmission line discharge requirements and select the nominal discharge current, the high current impulse value and the line discharge class of the arrester;

  NOTE If high current impulse values different from the standardized values are necessary (see IEC 60099-4, table 6, note), these values should be selected according to the lightning discharge current.

– select the pressure relief class of the arrester with respect to the expected fault current;

– select a surge arrester that fulfils the above requirement;

– determine the lightning and switching impulse protection characteristics of the arrester;

– locate the arrester as close as possible to the apparatus to be protected;

– determine the co-ordination switching impulse withstand voltage of the protected equipment taking into account the representative slow-front overvoltages and system layout;

– determine the co-ordination lightning impulse withstand voltage considering:

  - the representative impinging lightning overvoltage surge as determined by the lightning performance of the overhead line connected to the arrester and the acceptable failure rate of the protected equipment;
  - the substation layout;
  - the distance between surge arrester and protected equipment;

– determine the rated insulation level of the equipment from IEC 60071-1;

– if a lower rated insulation level of the equipment is desired, then a lower continuous operating voltage, a lower rated voltage, a higher nominal discharge current, a higher line discharge class, a different arrester design or a reduced distance between arrester and protected object should be investigated.

  NOTE A lower continuous operating voltage or a lower rated voltage may reduce the service reliability of the arresters.

Details of this iterative procedure are given in sections 2, 3 and 4 of this document.

1.5 Polluted housing arrester withstand

Pollution on the arrester housing may cause sparkover or temperature increase of grading components in gapped arresters and high temperature increase of the varistors in metal-oxide arresters. To prevent arrester failures in polluted areas, arresters able to withstand the relevant polluted conditions have to be chosen. Although not explicitly specified in IEC 60099-1 and IEC 60099-4, arresters used in normal operating conditions should withstand the medium pollution stresses according to pollution level II of IEC 60071-2. If the arrester installation area is subjected to a higher pollution, the surge arrester performance may be adversely affected. If arresters of inadequate design are used in heavy (pollution level III) or very heavy (pollution level IV) polluted areas, periodic cleaning or greasing may be effective in preventing the events stated above.

When live washing of arresters is intended, arresters designed for such service conditions are required.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Section 2: Parafoudres à résistance variable avec éclateurs selon la CEI 60099-1

2.1 Caractéristiques des parafoudres avec éclateurs

2.1.1 Généralités

Les caractéristiques fondamentales des parafoudres avec éclateurs série sont leur tension assignée, leurs tensions d'amorçage, leurs courants nominaux de décharge et leurs tensions résiduelles à ces courants.

La protection est caractérisée par les tensions d'amorçage au choc sur front et au choc de foudre ainsi qu'aux chocs de manoeuvre lorsque cela est nécessaire; elle est aussi caractérisée par les tensions résiduelles au courant nominal de décharge et éventuellement aux courants de choc de manoeuvre. Pour une tension assignée donnée, il existe différents types de parafoudres et, par conséquent, différents niveaux de protection.

D'autres caractéristiques des parafoudres sont à prendre en considération: tension de régime permanent, classe de décharge de longue durée, classe de limiteur de pression, tenue sous pollution, aptitude au lavage sous tension et propriétés mécaniques particulières.

2.1.2 Tension assignée

Valeur maximale admissible de la tension efficace à fréquence industrielle entre les bornes du parafoudre, pour laquelle ce dernier a été conçu pour fonctionner correctement, suivant les conditions de l'essai de fonctionnement. La tension assignée est utilisée comme un paramètre de référence pour la spécification des caractéristiques de fonctionnement.

NOTE Certains parafoudres destinés aux réseaux de la gamme II sont conçus pour désamorcer à des tensions à fréquence industrielle supérieures à la tension assignée. Cette tension est généralement appelée «tension de désamorçage en surtension temporaire». La CEI 60099-1 ne spécifiant aucun essai susceptible de démontrer le fonctionnement correct de tels parafoudres, il est recommandé que les modalités d'essai et d'utilisation fassent l'objet d'un accord entre l'utilisateur et le fabricant.

Dans certains cas, par exemple pour l'essai de pollution selon la CEI 60099-3, il convient de connaître la valeur maximale de la tension efficace à fréquence industrielle qui peut être appliquée de manière permanente entre les bornes du parafoudre. Pour les parafoudres destinés à protéger les matériels de la gamme I selon la CEI 60071-1, cette tension peut être égale à la tension assignée du parafoudre. Elle lui est généralement inférieure dans le cas des parafoudres de la gamme II. La CEI 60099-1 ne spécifiant aucun essai pour fixer la valeur de cette tension, il convient de se procurer la valeur à utiliser auprès du fabricant.

2.1.3 Niveau de protection d'un parafoudre

Le niveau de protection aux chocs de foudre est la plus élevée des valeurs suivantes:

– tension d'amorçage au choc de foudre normal;

– tension résiduelle au courant nominal de décharge.

NOTE Lorsqu'on s'intéresse à la protection des matériels contre les surtensions à front rapide, on considère que l'isolation immergée dans l'huile des transformateurs a une tenue supérieure d'au moins 15 % à sa tenue au choc de foudre en onde pleine pour des surtensions de durée inférieure à 3 µs. Par conséquent, les tensions maximales spécifiées dans la CEI 60099-1, tableau 8, pour l'amorçage au choc sur front sont supérieures de 15 % à celles pour le choc de foudre normal.

D'autres types d'isolation, comme dans les transformateurs de mesure, les câbles ou les postes sous enveloppe métallique et à isolation gazeuse, peuvent avoir des caractéristiques de tenue différentes, et la tension d'amorçage au choc sur front peut alors nécessiter une attention particulière.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Section 2: Non-linear resistor type gapped surge arresters according to IEC 60099-1

2.1 Characteristic data of gapped surge arresters

2.1.1 General

Basic characteristics of surge arresters with series spark gaps are their rated voltage, their sparkover voltages, their nominal discharge currents and their residual voltages at these currents.

The protective performance is characterized by the sparkover voltages for front-of-wave, lightning impulse and, when applicable, switching impulses; and is also characterized by the residual voltages at nominal discharge current and, when applicable, at switching impulse currents. For a given rated voltage, different types of arresters and, therefore, different protection levels exist.

Additional characteristics of an arrester to be considered are continuous operating voltage, long duration discharge class, pressure relief class, pollution withstand capability, live washing capability and special mechanical properties.

2.1.2 Rated voltage

The maximum permissible r.m.s. value of the power frequency voltage between the arrester terminals, at which it is designed to operate correctly as established in the operating duty test. The rated voltage is used as a reference parameter for the specification of operating characteristics.

NOTE Some types of arresters to be used in range II are designed to reseal at power frequency voltages higher than the rated voltage. This voltage is generally called the "temporary overvoltage reseal voltage". Since IEC 60099-1 does not specify tests to assure the correct operation of such arresters, test details and application should be agreed between user and manufacturer.

In some cases, e.g. for the pollution test according to IEC 60099-3, the maximum r.m.s. value of power frequency voltage which can be applied continuously between the arrester terminals should be known. For arresters to be used in range I according to IEC 60071-1, this voltage may be equal to the rated voltage of the arrester. For arresters to be used in range II it is usually lower. As IEC 60099-1 does not specify tests to assure this voltage, the applicable value should be obtained from the manufacturer.

2.1.3 Protective levels

The lightning impulse protective level of the surge arrester is the maximum of the following values:

– the standard lightning impulse sparkover voltage;

– the residual voltage at nominal discharge current.

NOTE When considering the protection of equipment from fast front overvoltages it is assumed that the withstand strength of the oil-immersed insulation in the transformers is at least 15 % above its full lightning impulse withstand strength for voltage durations shorter than 3 μs. Therefore, the maximum voltages specified in IEC 60099-1, table 8, for the front-of-wave sparkover are 15 % higher than those for the standard lightning impulse.

Other types of insulation as in instrument transformers, cables or gas insulated substations (GIS) may have different withstand characteristics and the front-of-wave sparkover voltage may need special consideration.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Le niveau de protection au choc de manoeuvre s'applique à la protection des matériels contre les surtensions à front lent. C'est la plus élevée des valeurs de la tension d'amorçage au choc de manoeuvre et de la tension résiduelle au courant de choc de manoeuvre.

NOTE Lorsque la caractéristique d'amorçage au choc de manoeuvre d'un type de parafoudre n'est pas connue, seule une indication approximative peut être fournie par la tension d'amorçage à fréquence industrielle.

2.1.4 Courant nominal de décharge

Valeur de crête d'un courant de décharge de forme d'onde 8/20, utilisée pour définir un parafoudre. C'est également le courant de décharge qui est utilisé pour amorcer le courant de suite au cours de l'essai de fonctionnement et pour définir le niveau de protection du parafoudre pour les surtensions de foudre.

2.1.5 Classe de décharge de longue durée

Nombre relatif à la capacité d'absorption d'énergie d'un parafoudre lors de décharges de lignes de grande longueur. Des nombres croissants (voir le tableau 5 de la CEI 60099-1) correspondent à des tensions croissantes du réseau et à une longueur de ligne plus grande, ainsi qu'à des facteurs de surtensions et des impédances d'onde décroissantes.

2.1.6 Classe de limiteur de pression

Nombre relatif à la capacité d'un parafoudre à résister aux effets des courants de défaut internes, survenant après une défaillance, sans explosion violente de l'enveloppe (voir l'article 8.7 de la CEI 60099-1).

2.1.7 Tenue sous pollution

Pour les parafoudres destinés à être utilisés dans des zones polluées III et IV selon la CEI 60071-2, un essai de pollution selon la CEI 60099-3 est recommandé. Cet essai permet d'obtenir des renseignements sur les caractéristiques d'amorçage. La tenue au contournement de l'enveloppe peut être vérifiée conformément à la CEI 60507.

2.1.8 Aptitude au lavage sous tension

Le lavage sous tension peut nécessiter une conception spéciale des parafoudres. La tenue est vérifiée par des essais appropriés qui doivent être définis.

En ce qui concerne la conception des matériels de lavage, il convient de porter une attention particulière aux points suivants:

– on doit utiliser de l'eau ayant une résistivité convenable;
– la pression et la disposition des pulvérisateurs doivent être telles que la totalité du parafoudre, sur sa longueur comme sur sa circonférence, soit arrosée le plus uniformément possible et au même moment. Pour cette raison, il faut tenir compte de la limite admissible pour la vitesse du vent.

2.2 Choix des parafoudres avec éclateurs, connectés entre phase et terre

2.2.1 Tension assignée

Il est courant de considérer qu'un parafoudre doit supporter les contraintes dues aux surtensions temporaires résultant d'un défaut à la terre sur une phase entraînant une montée de la tension sur les phases saines au moment où un fonctionnement du parafoudre se produit sur l'une de ces phases. Des surtensions temporaires peuvent se produire pour d'autres raisons et il est recommandé de choisir la tension assignée du parafoudre en

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

The switching impulse protective level is applicable to the protection of equipment from slow-front overvoltages. It is the maximum of the switching impulse sparkover voltage and the switching impulse residual voltage.

NOTE When the switching impulse sparkover characteristic of an arrester type is not known, only approximate information about this is obtained from the power frequency sparkover voltage.

2.1.4 Nominal discharge current

The peak value of a discharge current having a 8/20 shape, which is used to classify an arrester. It is also the discharge current which is used to initiate the follow current in the operating duty test and to establish the protective level of the arrester for lightning overvoltages.

2.1.5 Long duration discharge class

A number related to the energy absorption capability of an arrester to discharge long lines. Increasing class numbers (see IEC 60099-1, table 5) indicate increasing system voltages and line length and decreasing surge impedance and overvoltage factors.

2.1.6 Pressure relief class

A number related to the capability of an arrester to withstand internal fault currents after a failure without violent shattering of the housing. Reference is made to clause 8.7 of IEC 60099-1.

2.1.7 Pollution withstand characteristics

For arresters to be used in polluted areas according to IEC 60071-2, pollution levels III and IV, a pollution test according to IEC 60099-3 is necessary. From this test, information about the sparkover performance is obtained. The flashover performance of the housing can be checked in accordance with IEC 60507.

2.1.8 Live washing characteristics

Application of live washing may require a special arrester design and suitable tests have to be defined.

In the design of the washing equipment, care should be taken on the following points:

– water with an adequate resistivity must be used;
– the pressure and the nozzle configuration should be arranged so that the arrester in its whole length and circumference is wetted as uniformly and simultaneously as possible. For this it is necessary to consider the maximum permissible wind speed.

2.2 Selection of gapped surge arresters phase-to-earth

2.2.1 Rated voltage

It has been common practice to select an arrester to withstand the stresses due to the temporary overvoltages resulting from an earth fault on one phase causing a voltage rise on unfaulted phases at a time when an arrester operation occurs on one of these phases. Other causes of temporary overvoltages have to be considered and the voltage rating of the arrester should be chosen on the basis of the highest of these overvoltage conditions. In some cases

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

considérant la surtension la plus élevée. Dans certains cas, il peut également être nécessaire de considérer les surtensions temporaires résultant de l'apparition simultanée de différents phénomènes comme une perte soudaine de la charge et un défaut à la terre, en tenant compte de leur probabilité d'apparition.

Il est toujours recommandé de prendre en compte les causes de surtensions temporaires suivantes:

– Défauts à la terre:

  Ces surtensions se produisent dans une grande partie du réseau. Des directives concernant la détermination des amplitudes des surtensions temporaires sont indiquées en annexe A. La durée des surtensions est égale à la durée du défaut (jusqu'à son élimination). Sur les réseaux avec neutre à la terre, cette dure est généralement inférieure à 1 s. Sur les réseaux à neutre mis à la terre par bobine de compensation avec élimination de défaut, elle est généralement inférieure à 10 s. Sur les réseaux exploités à défaut maintenu, cette durée peut atteindre plusieurs heures.

– Pertes de charge:

  Après avoir déconnecté des charges, la tension s'élève côté source du disjoncteur ayant fonctionné. L'amplitude de la surtension dépend des caractéristiques de la charge déconnectée et de la puissance de court-circuit du poste d'alimentation. Les amplitudes des surtensions temporaires sont particulièrement élevées après une perte totale de charge au niveau des transformateurs de groupes selon les conditions de magnétisation et de survitesse. L'amplitude des surtensions dues aux pertes de charge n'est généralement pas constante pendant leur durée. Dans le cas de calculs précis, de nombreux paramètres doivent être pris en compte.

Les valeurs typiques suivantes peuvent servir d'indication:

– En cas de perte d'une pleine charge sur des réseaux d'ampleur moyenne, la surtension temporaire est généralement inférieure à 1,2 p.u. Sa durée dépend du fonctionnement du matériel de régulation de la tension et peut atteindre plusieurs minutes.

– Sur les grands réseaux, en cas de perte de pleine charge, les surtensions phase-terre peuvent atteindre 1,5 p.u., voire davantage lorsque se produisent des effets Ferranti ou des phénomènes de résonance. Leur durée peut être de l'ordre de quelques secondes.

– Pour les pertes de charge au niveau des alternateurs, les amplitudes des surtensions temporaires peuvent atteindre des valeurs allant jusqu'à 1,4 p.u. pour les turbo-alternateurs et jusqu'à 1,5 p.u. pour les alternateurs de centrales hydrauliques. La durée est de l'ordre de 3 s.

Lorsqu'on connaît l'évolution de l'amplitude en fonction du temps, la surtension peut être convenablement représentée par l'amplitude maximale et une durée égale au temps pendant lequel les amplitudes sont supérieures à 90 % de cette valeur.

Sur certains réseaux, il est nécessaire de considérer les causes de surtensions temporaires suivantes:

– effets de résonance, par exemple, lors de la charge de longues lignes à vide, ou résonances entre réseaux;

– élévation de tension le long de lignes de grande longueur (effet Ferranti);

– surtensions harmoniques, par exemple lors de manoeuvres de transformateurs;

– transmission d'une surtension entre les enroulements d'un transformateur, par exemple dans le cas d'un poste de transformation à deux transformateurs avec un jeu de barres secondaire commun pendant l'élimination de défauts ou la manoeuvre monophasée d'un transformateur triphasé avec une charge déséquilibrée au secondaire.

Il est recommandé de ne pas fonder le choix des parafoudres sur des surtensions temporaires dues à des ferro-résonances, mais d'éviter l'apparition de ces surtensions.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

it may be necessary to consider temporary overvoltages arising from the simultaneous occurrence of different phenomena such as sudden loss of load together with an earth fault, taking into account their probability of occurrence.

The following causes for temporary overvoltages should always be considered:

– Earth faults:

  These overvoltages occur in a large part of the system. Guidance for the determination of temporary overvoltage amplitudes is given in annex A. The duration of the over-voltage corresponds to the duration of the fault (until fault clearing). In earthed neutral systems it is generally less than 1 s. In resonant earthed neutral systems with fault clearing it is generally less than 10 s. In systems without earth fault clearing the duration may be several hours.

– Load rejections:

  After disconnection of loads, the voltage rises at the source side of the operating circuit breaker. The amplitude of the overvoltage depends on the disconnected load characteristics and on the short-circuit power of the feeding substation. The temporary overvoltages have particularly high amplitudes after full load rejection at generator transformers depending on magnetizing and overspeed conditions. The amplitude of load rejection overvoltages is usually not constant during its duration. Accurate calculations have to consider many parameters.

As a guidance, the following typical values may be used:

– In moderately extended systems, a full load rejection can give rise to phase-to-earth overvoltages with amplitude usually below 1,2 p.u. The overvoltage duration depends on the operation of voltage-control equipment and may be up to several minutes.
– In extended systems, after a full load rejection, the phase-to-earth overvoltages may reach 1,5 p.u. or even more when Ferranti or resonance effects occur. Their duration may be in the order of some seconds.
– For load rejection of generator transformers the temporary overvoltages may reach amplitudes up to 1,4 p.u. for turbo generators and up to 1,5 p.u. for hydro generators. The duration is approximately 3 s.

When the time dependence of the amplitudes is known, a suitable representation of the overvoltage is the maximum amplitude, with a duration equal to the time while the amplitudes exceed 90 % of this value.

In some systems the following causes of temporary overvoltages need consideration:

– resonance effects, e.g. when charging long unloaded lines or resonances between systems;
– voltage rise along long lines (Ferranti effect);
– harmonic overvoltages, e.g. when switching transformers;
– backfeed through interconnected transformer windings, e.g. dual transformer station with common secondary bus during fault clearing or single-phase switched three-phase transformer with an unbalanced secondary load.

Temporary overvoltages due to ferro-resonances should not form the basis for the surge arrester selection, but should be eliminated.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

La combinaison de causes telles que des défauts à la terre et une perte de charge peut conduire à des valeurs de surtensions temporaires plus élevées que dans le cas d'événements simples. Lorsqu'on considère que de telles combinaisons sont suffisamment probables, les facteurs de surtensions de chacune des causes doivent être combinés, en prenant en compte la configuration de réseau existante.

NOTE 1 Le choix de la tension assignée du parafoudre correspondant aux surtensions temporaires les plus élevées du réseau est fondé sur l'hypothèse que la tension la plus élevée du réseau n'est pas dépassée dans les conditions normales d'exploitation. Si des tensions anormales sont susceptibles d'apparaître sur le réseau, augmentant ainsi la probabilité de fonctionnement du parafoudre dans de telles conditions, il peut être nécessaire d'utiliser un parafoudre de tension assignée supérieure à celle recommandée ci-dessus, en fonction de ces conditions particulières.

NOTE 2 L'emploi des parafoudres sur des réseaux de fréquences autres que 50 Hz ou 60 Hz peut demander une attention particulière lors de la fabrication ou de l'utilisation et devra faire l'objet de discussions entre le fabricant et l'utilisateur.

Les parafoudres destinés aux réseaux à neutre isolé ou mis à la terre par bobine de compensation, sans dispositif d'élimination automatique des défauts à la terre devront être choisis de manière à pouvoir supporter l'application permanente de la tension assignée, du fait de la longue durée possible de la surtension temporaire. Les parafoudres devant être installés sur des réseaux comportant un dispositif d'élimination automatique des défauts à la terre doivent seulement pouvoir supporter en permanence la tension maximale phase-terre du réseau. Cette valeur réduite peut être obtenue auprès du fabricant.

2.2.2 Courant nominal de décharge

2.2.2.1 Facteurs influençant les courants de décharge de foudre

En règle générale, les courants dans les parafoudres dus à des coups de foudre sont moins élevés que le courant de foudre. Dans le cas de coups de foudre directs sur les lignes, des ondes se propagent de part et d'autre du point d'impact. L'amorçage de l'isolation de la ligne établit un chemin parallèle à la terre qui détourne une partie du courant du coup de foudre. Dans le cas de coups de foudre frappant plus d'un conducteur, ou d'amorçages entre conducteurs, deux parafoudres ou plus peuvent fonctionner et se partager le courant. Le seul cas où le parafoudre est amené à décharger la majeure partie du courant du coup de foudre se produit lorsqu'un coup de foudre direct tombe très près de l'extrémité du parafoudre et qu'aucun amorçage ne se produit avant que le parafoudre ne fonctionne. Il est possible de réduire de manière significative la probabilité d'un tel événement par une protection adéquate par câble de garde. Des informations concernant les paramètres de foudre peuvent être obtenues à partir de données statistiques générales ou locales. La relation entre les courants de foudre et les courants de décharge dans les parafoudres peut alors être obtenue à partir de simulations numériques de propagation d'ondes.

Les lignes aériennes peuvent être protégées contre les coups de foudre directs sur les conducteurs en utilisant des câbles de garde, qui sont positionnés de manière à intercepter les coups de foudre et écouler leur courant à la terre via des poteaux ou des pylônes métalliques. Lorsque des poteaux en bois sont utilisés, les câbles de garde sont reliés à la terre par des conducteurs de faible impédance.

La plupart des coups de foudre directs sur les conducteurs de lignes sont éliminés grâce à l'utilisation de câbles de garde. Lorsqu'un coup de foudre direct se produit (défaut d'écran), l'amorçage de la ligne est quasiment certain dans les réseaux de la gamme I. Le nombre de défauts d'écran et leur sévérité peuvent être limités en optimisant le nombre et la localisation de ces câbles. Lorsqu'un coup de foudre tombe sur un câble de garde, le courant de foudre est écoulé à la terre par les supports auxquels sont raccordés les conducteurs. Compte tenu de l'impédance du chemin emprunté par le courant, incluant l'impédance d'onde du sol, une tension apparaît au sommet du support de la ligne. Une partie de cette tension apparaît par couplage sur le conducteur de phase. L'isolation de la ligne est soumise à une tension égale à la différence entre le potentiel du conducteur de phase et le potentiel du sommet du support, qui peut provoquer un amorçage. Ce type d'amorçage est appelé amorçage en retour.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Combination of causes such as earth faults and load rejection may result in higher temporary overvoltage values than those from the single events. When such combinations are considered sufficiently probable, the overvoltages for each cause have to be compounded, taking into account the actual system configuration.

NOTE 1 The selection of the arrester rated voltage corresponding to the highest system temporary overvoltages is based on the assumption that the highest system voltage is not exceeded under normal operating conditions. If abnormal system voltages are likely to occur, thereby increasing the probability of arrester operations during such conditions, it may be necessary to use an arrester with a higher rated voltage than that recommended above.

NOTE 2 Operating voltages with frequencies other than 50 Hz or 60 Hz may require special consideration in the manufacture or application of surge arresters and should be a subject of discussion between manufacturer and user.

Arresters for isolated or resonant earthed neutral systems without automatic earth fault clearing should be able to withstand the rated voltage continuously due to the possible long duration of the temporary overvoltage. Arresters for systems with automatic earth fault clearing need only withstand the maximum phase-to-earth system voltage. This reduced value can be obtained from the manufacturer.

2.2.2 Nominal discharge current

2.2.2.1 Factors influencing the lightning discharge currents

As a general rule, arrester currents due to lightning strokes are less than the stroke current. In the case of direct strokes to lines, travelling waves propagate in opposite directions from the point of impact. Flashover of line insulation provides a parallel path to ground, which diverts a portion of the stroke current. In the case of strokes to more than one conductor, or flashovers between conductors, two or more surge arresters may operate and share the current. Only in the case of a direct stroke very near to the terminal of the arrester, where no flashover occurs before arrester operation, is the arrester called upon to discharge most of the lightning stroke current. The probability of such an occurrence can be significantlyreduced by proper shielding. Information concerning lightning surge parameters can be obtained from general statistical data or from local statistical data. The relationship between lightning surges and surge arresters discharge currents may be obtained from travelling wave calculations.

Overhead lines may be protected against direct lightning strokes to the conductors by the use of shield (overhead ground) wires, which are positioned to intercept lightning strokes and to direct the stroke current to ground via metallic tower or pole structures. Where wood-pole structures are used, low-impedance conductors are used to connect the shield wires to ground.

Almost all direct strokes to line conductors are eliminated by the use of shield wires. When such a direct stroke (shielding failure) does occur, line flashover is almost certain in range I. The number of shielding failures and their severity can be controlled by number and location of the shield wires. When a lightning stroke terminates on a shield wire, the stroke current is diverted to ground through the structure-connecting conductors. The impedance of the current path, including the ground surge impedance, results in a voltage at the top of the line structure. A portion of this voltage is coupled to the phase conductors. The difference between the phase conductor potential and structure top potential is impressed directly across line insulation and may result in flashover. This type of flashover is called a back-flashover.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Le taux d'amorçages en retour est limité par le choix d'un niveau d'isolement adéquat, en maintenant la résistance de terre du support à une valeur suffisamment faible, en maintenant une distance suffisante entre le conducteur et le support, entre le conducteur et le câble de garde et entre conducteurs, ainsi qu'en optimisant la géométrie des pylônes.

Pour la protection des postes, il est possible de suivre des dispositions analogues à la protection des lignes. Les méthodes de protection utilisent des conducteurs aériens à la terre, des mâts métalliques et des paratonnerres installés sur la structure du poste. La mise en oeuvre de ces méthodes peut donner lieu à maintes combinaisons.

Dans le cas d'installations qui ne sont pas protégées contre les coups de foudre directs, par exemple les transformateurs de distribution ou les jonctions aéro-souterraines sur les lignes supportées par des poteaux en bois, à la fois l'isolation et le parafoudre peuvent être sujets à des coups de foudre directs qui produisent des courants de décharge extrêmement élevés. De manière générale, le courant de foudre et un courant de décharge correspondant doivent être choisis en fonction de leurs probabilités d'apparition.

Dans le cas des postes, le but de la protection est de réduire le risque de défaut d'isolement à un niveau acceptable. Dans certains cas, ce but peut être atteint en protégeant seulement le poste. Dans d'autres cas, il peut s'avérer nécessaire de protéger toutes les arrivées du poste. La protection des lignes par câble de garde sur une distance relativement courte du poste offre les mêmes avantages pour la protection du poste que la protection complète de la ligne.

Avec une conception adéquate de la protection par écran, de l'isolement et des mises à la terre, la probabilité de coups de foudre directs sur les conducteurs de phase est réduite à un niveau faible. De plus, les tensions supportées par l'isolation en cas de coups de foudre sur le système de protection par écran sont réduites en-dessous des niveaux d'amorçage. Par conséquent, les courants de décharge du parafoudre sont réduits, permettant de ce fait à ce dernier de mieux protéger l'isolation des matériels et de réduire la contrainte subie par le parafoudre.

2.2.2.2 Choix du courant nominal de décharge

En général, le courant nominal de décharge est choisi, en prenant en compte:

– l'importance et le degré de protection désiré. Le fait de déterminer les niveaux de protection en se basant sur de plus fortes valeurs d'amplitude de courants et de raideur de front augmente la fiabilité de la protection;

– le nombre de lignes raccordées lors du fonctionnement du parafoudre. Du fait des réflexions d'ondes, le courant de décharge du parafoudre est affecté par l'impédance d'onde des lignes et des câbles raccordés en parallèle;

– l'isolation de la ligne. Lorsque l'isolement de la ligne est plus fort (par exemple, poteaux bois entièrement isolés), les courants de décharge de foudre sont potentiellement plus élevés, à moins que le coup de foudre ne tombe si près du parafoudre que l'impédance et l'isolement de la ligne ne puissent influencer la surtension. Lorsque les parafoudres sont utilisés dans un poste auquel sont raccordées des lignes sur poteaux en bois avec armements non mis à la terre, il convient qu'au moins un poteau, de préférence le dernier de cette ligne, ait des armements mis à la terre avec une faible impédance. En cas de fortes impédances de terre, plusieurs poteaux doivent être mis à la terre sur une distance au poste d'environ cinq portées;

– la probabilité d'apparition des courants de foudre les plus élevés. L'amplitude des courants de foudre varie dans une grande gamme de valeurs. Les lignes se trouvant dans des endroits où la densité de coups de foudre à la terre est élevée ont de plus grandes chances de recevoir un coup de foudre d'amplitude de courant élevée;

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

The rate of occurrence of back-flashovers is controlled by selection of a proper insulation level, by keeping the structure ground resistance to an acceptably low value by providing adequate clearance from conductor to structure, conductor to shield wire and conductor to conductor and by optimizing tower geometry.

Procedures analogous to those used for shielding lines may also be used for shielding stations. Shielding methods include overhead ground wires, metallic masts, and lightning rods supported from the station structure. These methods may be used in many combinations.

In installations not shielded against direct lightning strokes, for example at distribution transformers or cable junctions on wood-pole lines, both the insulation and the arrester can be subjected to direct strokes producing extremely high discharge currents. In general the lightning current and a representative discharge current shall be based on their probability of occurrence.

The purpose of shielding in station applications is to reduce the risk of insulation failure to an acceptable level. In certain applications this may be achieved by shielding the station alone. In other cases it may be necessary to shield all incoming lines to the station. Shielding of the lines for a relatively short distance from the station affords the same benefits for station protection as complete line shielding.

With well-designed shielding, insulation, and grounding systems, the probability of direct strokes to phase conductors is reduced to a low level and the voltages across insulation in the event of strokes to the shielding system are reduced below flashover levels. As a result, arrester discharge currents are reduced, thereby permitting the arrester to provide better protection to equipment insulation and reducing arrester duty.

2.2.2.2 Selection of the nominal discharge current

As a general rule, the nominal discharge current of an arrester is selected after considering:

– the importance and degree of protection desired. Basing protection levels on higher current magnitudes and rates-of-rise increases the reliability of protection;

– the number of lines connected during arrester operation. Owing to reflections of travelling waves, the discharge current of the arrester is affected by the parallel-connected surge impedance of lines and cables;

– the line insulation. The prospective lightning discharge currents increase with higher line insulations (e.g. fully insulated wood-poles), unless the stroke occurs so close to the arrester that the impedance and insulation of the line cannot influence the surge. When arresters are used in a station to which wood-pole lines with unearthed crossarms or insulator pins are connected, then at least one pole, preferably the last one in this line, should have earthed crossarms or pins, with low earthing impedance. In case of high earthing impedances several poles within a distance of about five spans from the station should be earthed;

– the probability of occurrence of the higher stroke currents. The magnitude of lightning currents varies over a wide range of values. Lines in areas of high lightning ground flash density have an increased chance of being struck by lightning with high current magnitudes;

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

– les caractéristiques de la ligne et des phénomènes de foudroiement. Les courants de décharge de foudre et les raideurs de front sont fonctions des taux d'amorçages en retour et des défauts d'écran des lignes (ou des taux d'amorçages des lignes sans câble de garde) qui se trouvent à une distance limitée du poste. Des taux de défauts d'écran plus (moins) élevés augmentent (réduisent) l'amplitude et la raideur de front probables du courant de décharge de foudre.

En ce qui concerne les courants nominaux de décharge normaux selon la CEI 60099-1, l'expérience montre qu'un niveau de protection satisfaisant est atteint si les recommandations suivantes sont appliquées:

Gamme I (au-dessus de 1 kV et jusqu'à 245 kV): 5 kA ou 10 kA

Sur les réseaux de la gamme I de la CEI 60071-1, dans lesquels les longueurs des lignes qui séparent les parafoudres sont courtes (inférieures à 5 km), les parafoudres de courant nominal de décharge de 5 kA qui protègent les transformateurs de distribution sont suffisamment fiables, même lorsque les transformateurs sont raccordés à des lignes sur poteaux en bois avec des armements non mis à la terre.

Dans le cas des réseaux dont la tension la plus élevée est inférieure ou égale à 72,5 kV, des parafoudres dont le courant nominal de décharge est de 5 kA peuvent suffire dans les régions où la densité de coups de foudre au sol est peu élevée, et où les lignes aériennes sont bien protégées avec des impédances de mise à la terre des pylônes peu élevées. Les parafoudres dont le courant nominal de décharge est de 10 kA peuvent être préférables pour les installations importantes (besoin de la meilleure protection), particulièrement dans des régions qui ont une densité de coups de foudre élevée ou un sol présentant une forte résistance.

Il est généralement recommandé d'utiliser des parafoudres de courant nominal de décharge de 10 kA pour les réseaux dont la tension la plus élevée est supérieure à 72,5 kV.

Gamme II (au-delà de 245 kV): 10 kA ou 20 kA

Les parafoudres dont le courant nominal de décharge est de 10 kA sont généralement suffisants pour les réseaux dont la tension la plus élevée est inférieure ou égale à 420 kV.

Dans le cas de réseaux dont la tension la plus élevée est supérieure à 420 kV, il peut être nécessaire d'utiliser des parafoudres 20 kA.

2.2.3 Pouvoir d'écoulement des ondes de courant de longue durée

Dans le cas d'installations auxquelles sont raccordées des lignes ou des câbles de grande longueur ou des capacités de forte valeur, le parafoudre doit pouvoir supporter le courant de décharge et l'énergie dus aux surtensions de manoeuvre. Pour les parafoudres 10 kA à service intensif, les paramètres des essais ont donc été fixés pour chaque gamme de tensions de réseau (voir 8.5.3 de la CEI 60099-1); ils sont représentatifs de la dissipation d'énergie à travers les parafoudres du réseau concerné. On utilise généralement des parafoudres à service intensif pour des matériels de la gamme II. Pour les matériels de la gamme I, on utilise des parafoudres à service intensif dans le cas des postes importants, lorsqu'il est demandé un bas niveau de protection ou lorsque des lignes de grande longueur, des câbles ou des bancs de condensateurs sont raccordés au jeu de barres. Dans les autres cas, par exemple lorsque les arrivées sont relativement courtes (moins de 100 km), on utilise généralement des parafoudres 10 kA à service non intensif ou des parafoudres 5 kA.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

– line performance and lightning environment. Lightning discharge currents and rates-of-rise are functions of the back-flashover and shielding failure rates of the lines (or flashover rates of unshielded lines) which are within some limiting distance from the station. Higher (lower) failure rates increase (decrease) the probable lightning discharge current magnitude and rate-of-rise.

For the standard nominal discharge currents according to IEC 60099-1, experience indicates that a satisfactory degree of protection is achieved if the following recommendations are observed.

Range I (above 1 kV to 245 kV): 5 kA or 10 kA

In systems in range I of IEC 60071-1 where the line distances between arresters are small (below 5 km), surge arresters at distribution transformers with a nominal discharge current of 5 kA have proven sufficiently reliable, even when the transformers are connected to wood-pole lines with unearthed cross-arms.

In systems with highest voltages of 72,5 kV and below, surge arresters with a nominal discharge current of 5 kA may be sufficient for areas with low ground flash density and effectively shielded incoming overhead-lines with low tower footing impedances. Arresters with a nominal discharge current of 10 kA may be preferable for important installations (need for the best protection) particularly in areas with high lightning flash density or high earth resistances.

In systems with highest voltages above 72,5 kV, surge arresters with a nominal discharge current of 10 kA are generally recommended.

Range II: (above 245 kV): 10 kA or 20 kA

For systems with highest voltages of 420 kV and below, surge arresters with a nominal discharge current of 10 kA are generally sufficient.

For systems with highest voltages above 420 kV, 20 kA arresters may be required.

2.2.3 Long duration discharge capability

In installations where long lines or cables or high capacitances are connected, the arrester must be capable of withstanding the discharge current and energy due to switching overvoltages. For heavy duty 10 kA arresters, therefore, test data have been specified for various ranges of system voltages (see 8.5.3 of IEC 60099-1), which represent typical energy dissipation through arresters in the system concerned. Heavy duty arresters are generally used for equipment of range II. For equipment of range I, heavy duty arresters are used in case of important stations, in case of required low protective levels or in case of long overhead lines, cables or capacitor banks connected to the busbar. For other cases, e.g. where incoming lines are relatively short (less than 100 km), 10 kA light duty arresters or 5 kA arresters are generally used.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---
Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

2.2.3.1 Parafoudres à service intensif

Les prescriptions d'essais données dans le tableau 5 de la CEI 60099-1 sont déterminées par la contrainte liée à la décharge des lignes de transport dans un parafoudre de tension assignée égale à 1,4 fois la tension phase-terre la plus élevée du réseau.

Normalement, la classe de décharge de longue durée correspond à la tension du réseau; voir tableau 1. Cependant, lorsque les caractéristiques de la ligne s'écartent sensiblement de celles du tableau 1, l'énergie dissipée par le parafoudre dans les conditions de service doit être comparée à celle dissipée pendant l'essai conforme au tableau 1. Lorsque cela est nécessaire, des parafoudres d'une classe de décharge correspondant à une tension du réseau différente peuvent être utilisés. En pareil cas, une étude est recommandée.

Tableau 1 – Relation entre la classe de décharge de ligne et les caractéristiques des lignes de transport (voir tableau C.1 de la CEI 60099-1)

Classe de décharge de longue durée	Gamme approximative des tensions de réseaux les plus élevées kV	Longueur approximative de la ligne km	Valeur approximative de l'impédance d'onde de la ligne Ω	Facteur de surtension approximatif (rapport)*
1	Jusqu'à 245	300	450	3,0
2	Jusqu'à 300	300	400	2,6
3	Jusqu'à 420	360	350	2,6
4	Jusqu'à 525	420	325	2,4
5	Jusqu'à 765	480'	300	2,2

* Le dénominateur de ce rapport est la valeur de crête de la tension la plus élevée du réseau entre phase et terre.

2.2.3.2 Parafoudres 10 kA à service non intensif et 5 kA

Pour les parafoudres 10 kA à service non intensif et 5 kA, aucune différenciation de la tension du réseau n'est faite; seul un courant d'essai en onde rectangulaire est spécifié.

2.2.4 Classe de limiteur de pression

En cas de défaut interne d'un parafoudre, il convient que le courant de défaut qui le traverse ne cause pas de destruction violente de son enveloppe. Par conséquent, il est recommandé que le courant de défaut que doit supporter le parafoudre soit supérieur ou égal au courant de défaut maximal à travers le parafoudre, à l'endroit où il est installé.

Au cas où des valeurs plus élevées que celles données par le tableau 7 de la CEI 60099-1 sont nécessaires, il convient que l'utilisateur consulte le fabricant.

Section 3: Parafoudres à oxyde métallique sans éclateur selon la CEI 60099-4

3.1 Données caractéristiques des parafoudres à oxyde métallique sans éclateur

3.1.1 Généralités

Les caractéristiques fondamentales des parafoudres à oxyde métallique sont la tension de régime permanent, la tension assignée, le courant nominal de décharge et les tensions résiduelles au courant nominal de décharge, au courant de choc de manoeuvre et au courant à front raide.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

2.2.3.1 Heavy duty arresters

The test requirements shown in table 5 of IEC 60099-1 are based on the duty involved in discharging transmission lines and on an arrester rating equal to 1,4 times the highest system voltage phase-to-earth.

Normally, the long duration discharge class is based on the corresponding system voltage, see table 1. However, where line characteristics vary appreciably from those in table 1, the energy dissipated in the arrester during service conditions has to be compared with that in the test according to table 1. In such cases, a study of the particular circumstances is recommended.

Table 1 – Relationship between long duration discharge class and transmission line characteristics (see table C.1 of IEC 60099-1)

Long duration discharge class	Approximate range of highest system voltages kV	Approximate line length km	Approximate line surge impedance Ω	Approximate overvoltage factor (p.u.)*
1	Up to 245	300	450	3,0
2	Up to 300	300	400	2,6
3	Up to 420	360	350	2,6
4	Up to 525	420	325	2,4
5	Up to 765	480'	300	2,2
* The base for the per unit values is the peak value of the highest system voltage phase-to-earth.				

2.2.3.2 Light duty 10 kA and 5 kA arresters

For light duty 10 kA and for 5 kA arresters, no differentation of system voltages is made but only one test current with rectangular wave shape is specified.

2.2.4 Pressure relief class

In case of internal failure of a surge arrester, the fault current through the arrester should not cause violent shattering of the arrester housing. Therefore the fault current withstand of the arrester should be equal to or greater than the maximum fault current through the arrester at the installation point of the arrester.

If higher values than those listed in table 7 of IEC 60099-1 are required, the user should consult the manufacturer.

Section 3: Gapless metal-oxide surge arresters according to IEC 60099-4

3.1 Characteristic data of gapless metal-oxide surge arresters

3.1.1 General

Basic characteristics of metal-oxide surge arresters are the continuous operating voltage, the rated voltage, the nominal discharge current and the residual voltages at nominal discharge current, at switching impulse current and at steep front current.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

A une tension de régime permanent et une tension assignée données correspondent plusieurs types de parafoudres et, par conséquent, plusieurs niveaux de protection.

D'autres caractéristiques qui doivent être prises en compte pour une utilisation particulière sont la classe de décharge de ligne, la classe de limiteur de pression, la tenue sous pollution, l'aptitude au lavage sous tension et les propriétés mécaniques spécifiques.

3.1.2 Tension de régime permanent

La tension de régime permanent correspond à la valeur admissible maximale d'une tension à fréquence industrielle sinusoïdale qui peut être appliquée de façon permanente entre les bornes du parafoudre.

La tension de régime permanent du parafoudre complet peut être moins élevée, par unité, que celle utilisée pour l'essai de fonctionnement, la procédure de vieillissement et la vérification de la stabilité thermique. Cette tension peut alors être adaptée aux caractéristiques de tenue de l'enveloppe du parafoudre sous pollution; elle peut aussi tenir compte de fortes non-linéarités dans la répartition de la tension le long de la colonne de varistances à cause de l'effet de proximité d'autres objets dont la présence rend moins efficace le dispositif de fixation des potentiels intermédiaires.

3.1.3 Tension assignée

La tension assignée correspond à la valeur maximale de la tension à fréquence industrielle appliquée pendant 10 s lors de l'essai de fonctionnement (voir l'article 2.8 de la CEI 60099-4). De plus, elle sert de paramètre de référence dans l'établissement de la caractéristique de tenue du parafoudre sous tension à fréquence industrielle en fonction du temps et pour la définition des exigences pour l'essai de décharge de ligne.

3.1.4 Courant nominal de décharge

Le courant nominal de décharge est utilisé dans la classification des parafoudres. C'est le paramètre principal pour les caractéristiques de protection et la capacité d'absorption d'énergie du parafoudre.

3.1.5 Niveaux de protection

Le niveau de protection au choc de foudre d'un parafoudre est la valeur maximale de la tension résiduelle au courant nominal de décharge. Ceci s'applique à la protection des matériels contre les surtensions à front rapide.

Le niveau de protection au choc de manoeuvre est la valeur maximale de la tension résiduelle aux courants de choc de manoeuvre spécifiés. Ceci s'applique à la protection des matériels contre les surtensions à front lent.

En ce qui concerne l'efficacité de protection des parafoudres à oxyde métallique contre les surtensions à front rapide, il est nécessaire de prendre en compte le temps de retard dans le mécanisme de conduction des varistances lorsqu'elles subissent l'essai de chocs de courant à front raide [2][1)].

NOTE Dans la première édition de la CEI 60099-4: 1991, la procédure permettant de déterminer de façon fiable la tension résiduelle au choc de courant à front raide a été spécifiée de façon sommaire. Une définition plus précise des conditions d'essais est à l'étude; celle-ci permettra de tenir compte des effets d'inductance et du retard intrinsèque dû au matériau.

---

1) Les numéros entre crochets renvoient à l'annexe C: Bibliographie.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

For given continuous operating and rated voltages, different types of arresters, and therefore different protection levels, exist.

Further characteristics which have to be considered in a particular application are line discharge class, pressure relief class, pollution withstand capability, live washing capability and special mechanical properties.

3.1.2 Continuous operating voltage

The continuous operating voltage is the maximum permissible value of a sinusoidal power frequency voltage, which may be continuously applied between the arrester terminals.

The continuous operating voltage of the complete arrester may be lower per section than that used in the operating duty test, for the ageing procedure, and for verifying thermal stability. The lower continuous operating voltage may be due to the pollution strength of the arrester housing or to large non-linearities in the voltage distribution along the varistor stack due to less effective grading caused by proximity effects of other objects.

3.1.3 Rated voltage

The rated voltage is the maximum power frequency voltage that is applied in the operating duty test for 10 s (see clause 2.8 of IEC 60099-4). It is, furthermore, the reference parameter to establish the power frequency voltage versus time characteristic of the arrester, and for defining the test requirements for the line discharge test.

3.1.4 Nominal discharge current

The nominal discharge current is used for the surge arrester classification. It is the main parameter for the protective characteristics and the energy absorption capability of the arrester.

3.1.5 Protective levels

The lightning impulse protective level of an arrester is the maximum residual voltage at nominal discharge current. It is applicable to the protection of equipment from fast-front overvoltages.

The switching impulse protective level is the maximum residual voltage at the specified switching impulse currents. It is applicable to the protection of equipment from slow-front overvoltages.

For the protection performance of metal-oxide surge arresters for fast-front overvoltages the time delay in the conduction mechanism of the varistors as tested in the steep current impulse test has to be considered [2][1)].

NOTE In the first edition of IEC 60099-4:1991, the necessary test procedure for a reliable determination of the residual voltage at steep current impulse has been incompletely specified. More precise specification of test conditions is under consideration which will take care of inductance effects and the intrinsic material time delay.

---

1) Numbers in brackets refer to annex C: Bibliography.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

3.1.6 Classe de décharge de ligne

Nombre relatif à la capacité d'absorption énergétique des parafoudres 10 kA et 20 kA pour la décharge de lignes de grande longueur. Il existe cinq classes, selon la CEI 60099-4, table 4, pour lesquelles un nombre croissant indique une capacité d'absorption d'énergie croissante.

Dans les cas de parafoudres de classe de décharge de ligne supérieure ou égale à 2, le courant de décharge résultant sert, lors de l'essai de fonctionnement, à vérifier la stabilité thermique après absorption d'énergie. Certains phénomènes se produisant sur le réseau peuvent engendrer dans les parafoudres des courants ayant des formes différentes; ils peuvent être évalués par comparaison à l'énergie et au courant d'une décharge de ligne équivalente.

3.1.7 Classe de limiteur de pression

Nombre relatif à la capacité d'un parafoudre à décharger des courants de défaut interne sans explosion violente de l'enveloppe. (Voir article 5.11 de la CEI 60099-4 et article 8.7 de la CEI 60099-1.)

3.1.8 Tenue à la pollution

Trois aspects sont concernés par la capacité de tenue à la pollution:

a) l'enveloppe du parafoudre doit résister aux contraintes de pollution sans contournement. Il est possible de le vérifier selon la CEI 60507 ou de le garantir par une conception conforme à la CEI 60815;

b) le parafoudre doit résister à la possible augmentation de température due à des modifications de la distribution de tension causées par l'activité de pollution à la surface de l'enveloppe. Il convient de prendre en considération le niveau de pollution ainsi que la fréquence et l'amplitude des surtensions dues à des défauts et à des réenclenchements dans des conditions de pollution. Des procédures d'essai adéquates sont à l'étude;

c) le parafoudre doit pouvoir résister à des décharges partielles internes causées par une répartition de tension sur l'enveloppe perturbée du fait de la pollution, sans détérioration des varistances ou des éléments d'assemblage internes. Des procédures d'essais adéquates sont à l'étude.

3.1.9 Aptitude au lavage sous tension

Lorsqu'on prévoit un lavage sous tension, il faut s'assurer qu'il n'y aura pas de contournement de l'enveloppe du parafoudre et que l'élévation de température des varistances reste en deçà de la température maximale spécifiée. Des procédures d'essais adéquates doivent être définies.

3.2 Choix des parafoudres à oxyde métallique sans éclateur, connectés entre phase et terre

3.2.1 Tension de régime permanent

L'exigence de base est que la crête de la tension de régime permanent du parafoudre soit plus élevée que la crête de la tension de service. La crête de la tension de service est déterminée par la tension à fréquence industrielle correspondant à la tension la plus élevée du réseau et par des tensions harmoniques éventuelles. Dans les réseaux habituels, l'augmentation de la valeur de crête de la tension due aux harmoniques peut être prise en compte par un facteur de sécurité de 1,05 appliqué à la tension à fréquence industrielle. En général, il convient que la tension de régime permanent soit:

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

3.1.6 Line discharge class

A number related to the energy absorption capability of 10 kA and 20 kA arresters for the discharge of long lines. Five classes exist according to IEC 60099-4, table 4, with an increasing number indicating increased energy absorption capability.

For arresters with line discharge class 2 and above, the resulting discharge current is used in the operating duty test to verify thermal stability after energy absorption. System events causing arrester currents with different shapes may be evaluated by comparison with energy and current of an equivalent line discharge.

3.1.7 Pressure relief class

A number related to the capability of an arrester to withstand internal fault currents without violent shattering of the housing. (Reference is made to clause 5.11 of IEC 60099-4 and clause 8.7 of IEC 60099-1.)

3.1.8 Pollution withstand characteristics

The pollution withstand capability of the arrester concerns three aspects:

a) the arrester housing has to withstand the pollution stresses without flashover. This can be verified according to IEC 60507 or is assured by a design according to IEC 60815;

b) the arrester has to withstand the possible temperature increase due to the changes in voltage distribution caused by the pollution activity on the surface of the housing. Consideration should be given to the pollution level and the frequency and amplitude of overvoltages caused by faults and reclosing operations during polluted conditions. Suitable test procedures are under consideration;

c) the arrester has to withstand internal partial discharges, caused by disturbed voltage grading on the housing due to pollution, without damage to the varistors or to the internal mounting elements. Possible test procedures are under consideration.

3.1.9 Live washing characteristics

When live washing of the arrester is foreseen, assurance is required that the arrester housing will not flash over and that the temperature increase of the varistors remains within the specified maximum temperature. Suitable test procedures have to be defined.

3.2 Selection of gapless metal-oxide surge arresters phase-to-earth

3.2.1 Continuous operating voltage

The basic requirement is that the peak of the continuous operating voltage of the surge arrester must be higher than the peak of the operating voltage. The peak of the operating voltage is determined by the power frequency voltage corresponding to the highest voltage of the system and by possible voltage harmonics. In usual systems, the increase of the peak voltage by harmonics can be taken into account by a safety factor of 1,05 to the power frequency voltage. As a general rule, the continuous operating voltage should be:

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

– dans les réseaux avec élimination automatique des défauts à la terre, supérieure ou égale à la valeur de crête de la tension de service phase-terre la plus élevée divisée par $\sqrt{2}$;

– dans les réseaux à neutre isolé ou mis à la terre par une bobine de compensation sans élimination automatique des défauts à la terre, supérieure ou égale à la tension de service la plus élevée.

NOTE Pour ces réseaux, le facteur de sécurité de 1,05 est considéré comme couvert par la caractéristique de tenue du parafoudre sous tension à fréquence industrielle en fonction du temps en tenant compte, dans ces réseaux, de la durée limitée du défaut à la terre.

Au cas où la tension de service la plus élevée à l'emplacement du parafoudre ne serait pas connue avec précision, il faut la remplacer par la tension la plus élevée du réseau ou par la tension la plus élevée pour les matériels.

Si le parafoudre est installé plus près de pièces sous tension ou de mises à la terre que ce que recommande le fabricant, il faut vérifier si la répartition de tension le long du parafoudre est suffisamment linéaire pour la tension de service permanent choisie.

3.2.2 Tension assignée

La tension assignée du parafoudre doit être choisie en fonction des surtensions temporaires du réseau à l'endroit du parafoudre, en tenant compte de leurs amplitudes ainsi que de leurs durées. L'exigence de base est que la caractéristique de tenue du parafoudre sous tension à fréquence industrielle en fonction du temps soit plus élevée que la caractéristique d'amplitude de la surtension temporaire en fonction temps du réseau considéré. Il convient de prendre en compte la capacité de tenue sous pollution et l'aptitude au lavage sous tension le cas échéant.

Il est toujours recommandé de prendre en compte les causes de surtensions temporaires suivantes:

– Défauts à la terre

  Ces surtensions se produisent dans une grande partie du réseau. Des directives concertant la détermination des amplitudes des surtensions temporaires sont indiquées en annexe A. La durée des surtensions est égale à la durée du défaut (jusqu'à son élimination). Sur les réseaux avec neutre à la terre, cette durée est généralement inférieure à 1 s. Sur les réseaux à neutre mis à la terre par bobine de compensation avec élimination de défaut, elle est généralement inférieure à 10 s. Sur les réseaux exploités à défaut maintenu, cette durée peut atteindre plusieurs heures.

– Pertes de charge

  Après avoir déconnecté des charges, la tension s'élève côté source du disjoncteur ayant fonctionné. L'amplitude de la surtension dépend des caractéristiques de la charge déconnectée et de la puissance de court-circuit du poste d'alimentation. Les amplitudes des surtensions temporaires sont particulièrement élevées après une perte totale de charge au niveau des transformateurs de groupes selon les conditions de magnétisation et de survitesse. L'amplitude des surtensions dues aux pertes de charge n'est pas habituellement constante pendant leur durée. Dans le cas de calculs précis, de nombreux paramètres doivent être pris en compte.

Les valeurs typiques suivantes peuvent servir d'indication [1]

– En cas de perte d'une pleine charge sur des réseaux d'ampleur moyenne, la surtension temporaire est généralement inférieure à 1,2 p.u. Sa durée dépend du fonctionnement du matériel de régulation de la tension et peut atteindre plusieurs minutes.

– Sur les grands réseaux, en cas de perte de pleine charge, les surtensions phase-terre peuvent atteindre 1,5 p.u., voire davantage lorsque se produisent des effets Ferranti ou des phénomènes de résonance. Leur durée peut être de l'ordre de quelques secondes.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

– in systems with automatic earth fault clearing, equal to or higher than the peak value of the highest operating voltage phase-to-earth divided by $\sqrt{2}$;
– in resonant earthed or isolated neutral systems without automatic earth fault clearing, equal to or higher than the highest operating voltage.

NOTE For these systems the safety factor of 1,05 has been considered to be covered by the power frequency voltage versus time characteristic of the arrester taking into account the limited duration of the earth fault in these systems.

If the highest operating voltage at the arrester location is not accurately known, it should be replaced by the highest voltage of the system or by the highest voltage for equipment.

If the arrester is installed closer to live or earthed objects than recommended by the manufacturer, it has to be investigated whether the voltage distribution along the arrester is sufficiently linear for the selected continuous operating voltage.

3.2.2 Rated voltage

The rated voltage of the arrester is selected based on the temporary overvoltages in the system at the arrester location, considering their amplitudes as well as their durations. The basic requirement is that the power frequency voltage versus time characteristic of the arrester should be higher than the temporary overvoltage amplitude versus duration characteristic of the system. Pollution withstand capability and live washing capability should be considered when appropriate.

The following causes of temporary overvoltages should always be considered:

– Earth fault overvoltages

  These overvoltages occur in a large part of the system. Guidance for the determination of temporary overvoltage amplitudes is given in annex A. The duration of the overvoltage corresponds to the duration of the fault (until fault clearing). In earthed neutral systems it is generally less than 1 s. In resonant earthed neutral systems with fault clearing it is generally less than 10 s. In systems without earth fault clearing the duration may be several hours.

– Load rejections

  After disconnection of loads the voltage rises at the source side of the operating circuit breaker. The amplitude of the overvoltage depends on the disconnected load and on the short-circuit power of the feeding substation. The temporary overvoltages have particularly high amplitudes after full load rejection at generator transformers depending on magnetizing and overspeed conditions. The amplitude of load rejection overvoltages is usually not constant during its duration. Accurate calculations have to consider many parameters.

As a guidance the following typical values of such overvoltages may be used [1]

– In moderately extended systems, a full load rejection can give rise to phase-to-earth overvoltages with amplitude usually below 1,2 p.u. The overvoltage duration depends on the operation of voltage-control equipment and may be up to several minutes.
– In extended systems, after a full load rejection, the phase-to-earth overvoltages may reach 1,5 p.u. or even more when Ferranti or resonance effects occur. Their duration may be in the order of some seconds.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

– Pour les pertes de charges au niveau des alternateurs, les amplitudes des surtensions temporaires peuvent atteindre des valeurs allant jusqu'à 1,4 p.u. pour les turbo-alternateurs et jusqu'à 1,5 p.u. pour les alternateurs de centrales hydrauliques. La durée est de l'ordre de 3 s.

  Lorsqu'on connaît l'évolution de l'amplitude en fonction du temps, la surtension peut être convenablement représentée par l'amplitude maximale et une durée égale au temps pendant lequel les amplitudes sont supérieures à 90 % de cette valeur.

Sur certains réseaux, il est nécessaire de considérer les causes de surtensions temporaires suivantes:

– effets de résonance, par exemple, lors de la charge de longues lignes déchargées, ou résonances entre réseaux;
– élévation de tension le long de lignes de grande longueur (effet Ferranti);
– surtensions harmoniques, par exemple, lors de manoeuvres de transformateurs;
– transmission d'une surtension entre les enroulements d'un transformateur, par exemple dans le cas d'un poste de transformation à deux transformateurs avec un jeu de barres secondaire commun pendant l'élimination de défauts ou la manoeuvre monophasée d'un transformateur triphasé avec une charge déséquilibrée au secondaire.

Il est recommandé de ne pas fonder le choix des parafoudres sur des surtensions temporaires dues à des ferro-résonances, mais d'éviter l'apparition de ces surtensions.

Les séquences de causes de surtensions temporaires, par exemple les pertes de charge causées par un défaut à la terre, doivent être prises en considération lorsque les deux surtensions sont de sévérité analogue. Cependant, dans de tels cas, la charge perdue dépendant de la localisation du défaut, l'emplacement du parafoudre doit être étudié avec attention.

La combinaison de causes telles que des défauts à la terre et une perte de charge peut conduire à des valeurs de surtensions temporaires plus élevées que dans le cas d'événements simples. Lorsqu'on considère que de telles combinaisons sont suffisamment probables, les facteurs de surtensions de chacune des causes doivent être combinés, en prenant en compte la configuration de réseau existante.

Lorsque la caractéristique «amplitude de la surtension temporaire en fonction du temps» a été établie, une caractéristique «tension à fréquence industrielle en fonction du temps» supérieure doit être sélectionnée. En approximation, l'amplitude et la durée des surtensions temporaires, dont la durée est comprise entre 0,1 s et 100 s, peuvent être converties en une amplitude équivalente U_{eq} d'une durée de 10 s (correspondant à la durée de la tenue à la tension assignée dans l'essai de fonctionnement):

$$U_{eq} = U_t \left(\frac{T_t}{10} \right)^m \qquad (1)$$

où

U_t est l'amplitude de la surtension temporaire;

T_t est la durée de la surtension temporaire en s;

U_{eq} est l'amplitude de la surtension temporaire équivalente de 10 s; et

m est l'exposant décrivant la caractéristique de tension à fréquence industrielle en fonction du temps du parafoudre. Selon les conceptions de parafoudres, l'exposant varie entre 0,022 et 0,018; on peut prendre une valeur moyenne de 0,02.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

– For load rejection of generator transformers the temporary overvoltages may reach amplitudes up to 1,4 p.u. for turbo generators and up to 1,5 p.u. for hydro generators. The duration is approximately 3 s.

  When the time dependence of the amplitudes is known, a suitable representation of the overvoltage is the maximum amplitude, with a duration equal to the time while the amplitudes exceed 90 % of this value.

In some systems the following causes of temporary overvoltages need consideration:

– resonance effects, e.g. when charging long unloaded lines or resonances between systems;
– voltage rise along long lines (Ferranti effect);
– harmonic overvoltages, e.g. when switching transformers;
– backfeed through interconnected transformer windings, e.g. dual transformer station with common secondary bus during fault clearing or single-phase switched three-phase transformer with an unbalanced secondary load.

Temporary overvoltages due to ferro-resonances should not form the basis for the surge arrester selection and should be eliminated.

Sequences of causes for temporary overvoltages, e.g. load rejection caused by an earth fault, need consideration, when both overvoltages have comparable severity. In such cases, however, the amount of rejected load dependent on the fault location and the arrester location has to be carefully examined.

Combination of causes such as earth faults and load rejection may result in higher temporary overvoltage values than those from the single events. When such combinations are considered sufficiently probable, the overvoltages for each cause have to be compounded taking into account the actual system configuration.

The power frequency voltage versus time characteristic of the arrester should exceed the temporary overvoltage amplitude versus duration of the system. As an approximation, amplitude and duration of temporary overvoltages, the duration of which is between 0,1 s and 100 s, can be converted to an equivalent amplitude, U_{eq}, with a duration of 10 s (corresponding to the duration of the rated voltage in the operating duty test):

$$U_{eq} = U_t \left(\frac{T_t}{10} \right)^m \quad (1)$$

where

U_t is the amplitude of the temporary overvoltage;

T_t is the duration of the temporary overvoltage in s;

U_{eq} is the amplitude of the equivalent 10 s temporary overvoltage; and

m is the exponent describing the power frequency voltage versus time characteristic of the arrester. For different arrester designs the exponent varies between 0,022 and 0,018 and an average value of 0,02 may be used.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

La tension assignée du parafoudre doit être supérieure ou égale à la surtension temporaire équivalente la plus élevée obtenue.

NOTE 1 Pour certaines utilisations, on applique une marge de sécurité entre la surtension temporaire équivalente maximale et la tension assignée afin de couvrir des imprécisions éventuelles dans le calcul de la surtension. Les valeurs habituelles de ces marges sont entre 5 % et 15 %.

NOTE 2 Lorsqu'on désire des niveaux de protection moins élevés que ceux des parafoudres choisis, on peut choisir des tensions assignées inférieures aux surtensions temporaires équivalentes de durée 10 s, à condition que le parafoudre soit capable d'absorber l'énergie due aux événements de réseau. Dans ce cas, il convient d'effectuer des calculs d'absorption d'énergie en simulant les événements de réseau. En plus des modélisations précises du réseau, il convient de prendre en compte la dispersion de production de la caractéristique tension-courant du parafoudre.

NOTE 3 Dans certains cas, la tension assignée du parafoudre peut être choisie en tenant compte de la capacité d'absorption d'énergie pendant la décharge de ligne de transport, tout en acceptant un niveau de protection du parafoudre plus élevé.

3.2.3 Courant nominal de décharge et classe de décharge de ligne

3.2.3.1 Généralités

Dans la CEI 60099-4, la capacité d'absorption d'énergie du parafoudre est liée au courant nominal de décharge. Si la valeur du courant de grande amplitude n'est pas choisie dans le tableau 6 de la CEI 60099-4 (comme cela est autorisé selon la note 1 relative à ce tableau), la capacité d'absorption d'énergie du parafoudre dépend du courant nominal de décharge et du courant de grande amplitude. De plus, l'absorption d'énergie du parafoudre due à une contrainte de surtension transitoire du réseau dépend de la caractéristique «tension résiduelle-courant» du parafoudre et, donc, du courant nominal de décharge. Il est par conséquent nécessaire de suivre une méthode itérative pour la détermination du courant nominal de décharge et de la classe de décharge de ligne.

3.2.3.2 Courant nominal de décharge

Le courant nominal de décharge est choisi en fonction du courant de décharge de foudre traversant le parafoudre, pour lequel la protection du matériel est recherchée. On applique les mêmes considérations que dans le cas de parafoudres avec éclateurs en 2.2.2. Les valeurs suivantes sont généralement valables selon le courant de décharge de foudre prévu:

Gamme I (au-dessus de 1 kV et jusqu'à 245 kV): 5 kA ou 10 kA

Sur les réseaux de la gamme I de la CEI 60071-1, dans lesquels les longueurs des lignes qui séparent les parafoudres sont courtes (inférieures à 5 km), des parafoudres proches de transformateurs de distribution s'avèrent suffisamment fiables avec un courant nominal de décharge de 5 kA, même lorsque les transformateurs sont raccordés à des lignes sur poteau en bois avec des armements non mis à la terre.

Pour les réseaux dont la tension est inférieure ou égale à 72,5 kV, des parafoudres ayant un courant nominal de décharge de 5 kA peuvent suffire dans les régions à faible densité de coups de foudre, quand les lignes d'arrivée sont efficacement blindées et que l'impédance d'implantation des pylônes est faible. Les parafoudres dont le courant nominal de décharge est de 10 kA peuvent être préférables pour les installations importantes (besoin de la meilleure protection), particulièrement dans des régions qui sont le siège d'une densité élevée de coups de foudre ou dont le sol présente une forte résistance.

Dans les réseaux de tension la plus élevée supérieure à 72,5 kV, il est généralement recommandé d'utiliser des parafoudres de courant nominal de décharge de 10 kA.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

The rated voltage of the arrester should be equal to or higher than the highest equivalent temporary overvoltage obtained.

NOTE 1 In some applications a safety margin is applied between maximum equivalent temporary overvoltage and rated voltage in order to cover possible inaccuracies in the determination of the overvoltage. Usual values of such margins are between 5 % and 15 %.

NOTE 2 When protective levels lower than that of the adopted arrester design are desired, rated voltages below the equivalent 10 s temporary overvoltages may be selected, provided the arrester is able to absorb the energy caused by system events. In this case energy absorption calculations should be carried out simulating the system events. Besides careful system representations the production dispersion of the voltage-current characteristic of the arrester should be considered.

NOTE 3 In some cases, the rated voltage of the arrester is also selected considering the energy absorption during the transmission line discharge with the disadvantage of a higher protective level of the arrester.

3.2.3 Nominal discharge current and line discharge class

3.2.3.1 General

In IEC 60099-4 the energy absorption capability of the arrester is linked to the nominal discharge current. If the high current impulse value is not chosen from table 6 of IEC 60099-4 (as is allowed according to note 1 to the table), the energy absorption capability of the arrester is related to the nominal discharge current and to the high current impulse. Furthermore, the energy absorption of the arrester, due to a system transient overvoltage stress, depends on the residual voltage-current characteristic of the arrester and thus on the nominal discharge current. Nominal discharge current and line discharge class, therefore, are determined in an iterative process.

3.2.3.2 Nominal discharge current

The nominal discharge current is selected according to the lightning discharge current through the arrester, for which protection of equipment is desired. The same considerations as for the gapped arrester in 2.2.2 apply. As a general rule, the following values are suitable depending on the expected lightning discharge current:

Range I (above 1 kV to 245 kV): 5 kA or 10 kA

In systems in range I of IEC 60071-1 where the line distances between arresters are small (below 5 km), surge arresters at distribution transformers with a nominal discharge current of 5 kA have proven sufficiently reliable, even when the transformers are connected to wood-pole lines with unearthed cross-arms.

In systems with highest voltages of 72,5 kV and below, surge arresters with a nominal discharge current of 5 kA may be sufficient for areas with low ground flash density and effectively shielded incoming overhead-lines with low tower footing impedances. Arresters with a nominal discharge current of 10 kA may be preferable for important installations (need for the best protection) particularly in areas with high lightning flash density or high earth resistances.

In systems with highest voltages above 72,5 kV, surge arresters with a nominal discharge current of 10 kA are generally recommended.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Gamme II (au-delà de 245 kV): 10 kA ou 20 kA

Les parafoudres dont le courant nominal de décharge est de 10 kA sont généralement suffisants pour les réseaux dont la tension la plus élevée est inférieure ou égale à 420 kV.

Dans le cas de réseaux dont la tension la plus élevée est supérieure à 420 kV, il peut être nécessaire d'utiliser des parafoudres 20 kA.

3.2.3.3 Capacité d'absorption d'énergie

Les parafoudres à oxyde métallique doivent pouvoir absorber l'énergie due à des surtensions transitoires sur le réseau. Les surtensions transitoires sévères sont celles provenant:

– de l'enclenchement ou du réenclenchement de lignes de grande longueur;
– de la déconnexion d'une batterie de condensateurs ou de câbles avec réamorçage des disjoncteurs;
– des coups de foudre sur les conducteurs de lignes à haut niveau d'isolement ou des amorçages en retour près de l'emplacement du parafoudre.

Il est possible d'évaluer l'énergie que doit absorber le parafoudre en connaissant les niveaux de protection de ce dernier en utilisant les formules suivantes [3, 4]:

– enclenchement et réenclenchement des lignes

$$W = 2U_{ps}\left(U_e - U_{ps}\right)\frac{T_w}{Z} \qquad (2)$$

où

W est l'énergie absorbée;

U_{ps} est le niveau de protection au choc de manoeuvre du parafoudre;

U_e est l'amplitude de la surtension évaluée par exemple selon la CEI 60071-2:

Z est l'impédance d'onde de la ligne ;

T_w est le temps de propagation le long de la ligne, égal à la longueur divisée par la vitesse de propagation de l'onde sur la ligne;

– manoeuvre de condensateur ou de câble

$$W = \frac{1}{2}C\left[(3U_o)^2 - \left(\sqrt{2}U_r\right)^2\right] \qquad (3)$$

où

C est la capacité du banc de condensateurs ou du câble;

U_o est la crête de tension de service entre phase et terre;

U_r est la tension assignée du parafoudre (valeur efficace).

L'énergie peut être répartie entre plusieurs parafoudres sur la même phase. Il convient d'étudier comment cette répartition s'effectue.

– foudre

$$W = \left[2U_f - NU_{pl}\left(1 + \ln\left(2\ U_f\ /\ U_{pl}\right)\right)\right]\frac{U_{pl}T_l}{Z} \qquad (4)$$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Range II (above 245 kV): 10 kA or 20 kA

For systems with highest voltages of 420 kV and below, surge arresters with a nominal discharge current of 10 kA are generally sufficient.

For systems with highest voltages above 420 kV, 20 kA arresters may be required.

3.2.3.3 Energy absorption capability

Metal-oxide surge arresters must be able to absorb the energy due to transient overvoltages in the system. Severe transient overvoltages are those arising from:

– closing or reclosing long lines;
– disconnection of capacitor banks or cables with restriking circuit breakers;
– lightning strokes to overhead line conductors with high insulation level or back-flashovers close to the arrester location.

With known protection levels of the arrester, the energy to be absorbed by the arrester can be estimated using the formulae below [3, 4]:

– closing and reclosing of lines

$$W = 2U_{ps}\left(U_e - U_{ps}\right)\frac{T_w}{Z} \qquad (2)$$

where

W is the energy absorption;
U_{ps} is the switching impulse protection level of the arrester;
U_e is the overvoltage amplitude, e.g. estimated according to IEC 60071-2;
Z is the surge impedance of the line;
T_w is the travel time along the line equal to length divided by wave velocity of the line;

– capacitor or cable switching

$$W = \frac{1}{2}C\left[(3U_o)^2 - \left(\sqrt{2}U_r\right)^2\right] \qquad (3)$$

where

C is the capacitance of the bank or the cable;
U_o is the phase-to-earth operating voltage peak;
U_r is the rated voltage of the arrester (r.m.s. value).

The energy may be shared with other arresters on the same phase. Degree of sharing should be studied.

– lightning

$$W = \left[2U_f - NU_{pl}\left(1 + \ln\left(2\ U_f\ /\ U_{pl}\right)\right)\right]\frac{U_{pl}T_l}{Z} \qquad (4)$$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

où

ln est le logarithme népérien;

U_{pl} est le niveau de protection au choc de foudre du parafoudre;

U_f est la tension d'amorçage en polarité négative de l'isolation de la ligne ;

Z est l'impédance d'onde de la ligne;

N est le nombre de lignes raccordées au parafoudre;

T_l est la durée équivalente du courant d'un arc de foudre comprenant le premier arc et les arcs subséquents.

Valeur typique: $3 \cdot 10^{-4}$ s.

Si les distances entre postes dans les réseaux de distribution sont courtes, l'énergie peut être divisée à cause de la répartition du courant.

NOTE La formule provient de l'intégration d'une surtension dont la queue décroît exponentiellement.

Dans certains cas, d'autres événements que ceux mentionnés peuvent conduire à une absorption d'énergie conséquente par le parafoudre sans éclateur. Un exemple typique est la manoeuvre de fusibles limiteurs de courants dans des applications inhabituelles, par exemple si la tension assignée du fusible est plus élevée que nécessaire pour l'application considérée ou si des parafoudres ayant des niveaux de protection très bas sont installés.

Dans l'essai de fonctionnement (article 7.5 de la CEI 60099-4), le parafoudre doit absorber l'énergie suivante avant l'application de la tension assignée:

– parafoudres 5 kA et 10 kA de classe de décharge de ligne 1:

  Ces parafoudres sont soumis à un essai de fonctionnement avec un choc de courant de grande amplitude. L'énergie produite par le choc de courant de forte amplitude peut être évaluée par [3]:

$$W = U_a \, I \, T \qquad (5)$$

  où

  U_a est la tension résiduelle à ce choc de courant de grande amplitude. Si cette valeur n'est pas connue, elle peut être évaluée à 1,5 fois la tension résiduelle au courant nominal de décharge;

  I est l'amplitude du choc de courant de grande amplitude spécifié;

  T est le temps effectif du choc de courant de grande amplitude = 6,5 µs;

– parafoudres 10 kA de classe de décharge de ligne supérieure ou égale à 2, et parafoudres 20 kA:

  Ces parafoudres sont soumis à un essai de fonctionnement aux surtensions de manoeuvre. L'énergie absorbée par choc est donnée dans l'annexe E de la CEI 60099-4. La capacité d'absorption d'énergie des parafoudres est égale à, ou plus grande que, deux fois cette valeur.

Pour une détermination plus exacte de l'absorption d'énergie, des études numériques détaillées devraient être menées en prenant en compte tous les paramètres des surtensions.

Si l'absorption d'énergie nécessaire en service est plus élevée que la capacité d'absorption d'énergie du parafoudre sélectionné, qui est vérifiée lors de l'essai de fonctionnement, il convient de choisir un courant nominal de décharge, une classe de décharge de ligne ou un courant de grande amplitude plus élevé. On peut aussi augmenter la tension assignée du parafoudre à condition que les niveaux de protection adéquats soient respectés.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

where

ln is the natural logarithm;

U_{pl} is the lightning impulse protection level of the arrester;

U_f is the negative flashover voltage of the line insulation;

Z is the line surge impedance;

N is the number of lines connected to the arrester;

T_l is the equivalent duration of the current of a lightning flash including first and subsequent strokes.

Typical value $3 \cdot 10^{-4}$ s.

If the distances between stations in distribution systems are small, the energy can be divided because of current sharing.

NOTE The formula has been derived from an integration of an exponentially decreasing overvoltage.

In some cases events other than those mentioned may result in a large energy absorption by the gapless arrester. A typical example is the operation of current limiting fuses in an unusual application, e.g. if the fuse rating is much higher than required for the system application, or if arresters with very low protective level are installed.

In the operating duty test (clause 7.5 in IEC 60099-4) the arrester has to absorb the following energy prior to the application of the rated voltage:

– 5 kA and 10 kA, line discharge class 1 arresters

These arresters are subjected to a high current impulse operating duty test. The energy produced by the high current impulse can be estimated by [3]:

$$W = U_a \; I \; T \qquad (5)$$

where

U_a is the residual voltage at this high current impulse. If this is not known, it may be estimated as 1,5 times the residual voltage at nominal discharge current;

I is the amplitude of the specified high current impulse;

T is the effective time of the high current impulse = 6,5 μs;

– 10 kA, line discharge class 2 or above, and 20 kA arresters.

These arresters are subjected to a switching surge operating duty test. The absorbed energy per impulse is given in annex E of IEC 60099-4. The energy absorption capability of the arrester is equal to or larger than twice this value.

For a more accurate determination of the energy absorption, detailed digital studies should be carried out considering all parameters of the overvoltages.

If the energy absorption required for service is higher than the energy absorption capability of the selected arrester proven by the operating duty test, a higher nominal discharge current or a higher line discharge class or a higher high current impulse value should be selected. Alternatively, the rated voltage of the arrester may be increased, provided adequate protection is achieved.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

3.2.4 Classe de limiteur de pression

En cas de défaut interne d'un parafoudre, il convient que le courant de défaut qui le traverse ne cause pas de destruction violente de son enveloppe. Par conséquent, il est recommandé que le courant de défaut que doit supporter le parafoudre soit supérieur ou égal au courant de défaut maximal à travers le parafoudre, à l'endroit où il est installé.

Au cas où des valeurs plus élevées que celles données dans le tableau 7 de la CEI 60099-1 et à l'article 5.11 de la CEI 60099-4 sont nécessaires, il convient que l'utilisateur consulte le fabricant.

Section 4: Utilisation des parafoudres

4.1 Principe de la coordination des isolements

Le principe de la coordination des isolements selon la CEI 60071-1 et la CEI 60071-2 nécessite la détermination des tensions de tenue assignées en quatre étapes:

a) Surtension représentative à l'emplacement du matériel.

b) Tension de tenue de coordination du matériel pendant sa durée de vie.

c) Tension de tenue spécifiée du matériel aux conditions d'essai normales. Celle-ci peut différer de la tension de tenue de coordination du fait du vieillissement de l'isolation ou de la dispersion de la production ou de l'assemblage. Ces différences sont compensées par un facteur de sécurité de 1,15. Pour une installation en altitude jusqu'à 1 000 m, ce facteur comprend aussi les corrections atmosphériques nécessaires pour l'isolation externe.

d) Tension de tenue assignée. Celle-ci prend en compte la possibilité d'une différence des formes d'onde des tensions spécifiées et assignées et comprend la sélection de valeurs dans des tableaux de tensions de tenue normalisées.

4.2 Protection contre les surtensions à front lent

La protection contre les surtensions à front lent est très importante dans la gamme II. Dans la gamme I, le niveau d'isolement assigné du matériel est habituellement tellement élevé que la protection contre les surtensions à front lent n'est généralement pas nécessaire. (Il y a exception pour les machines tournantes, voir article 5.3.)

La surtension représentative à l'emplacement du matériel protégé par parafoudres est égale au niveau de protection au choc de manoeuvre, parce que, sauf pour les lignes de transport, les effets de la propagation des ondes peuvent être négligés et les tensions aux bornes du matériel et du parafoudre sont identiques.

Les parafoudres à oxyde métallique sans éclateur sont appropriés pour la protection contre les surtensions à front lent dans les réseaux soumis à de faibles surtensions temporaires, tandis que les parafoudres avec éclateurs n'écoulent les surtensions à front lent que si les éclateurs série amorcent. De manière générale, on peut estimer qu'avec les parafoudres à oxyde métallique sans éclateur, il est possible de limiter les amplitudes des surtensions phase-terre (valeur de crête) à environ deux fois la tension assignée du parafoudre (valeur efficace). Le niveau de protection des parafoudres avec éclateurs dépasse notablement cette valeur.

Cela signifie que les parafoudres à oxyde métallique sont appropriés pour la limitation des surtensions à front lent dues à l'enclenchement et au réenclenchement des lignes ainsi qu'à la manoeuvre de courants inductifs et capacitifs, mais en général pas pour les surtensions causées par des défauts à la terre et l'élimination des défauts, étant donné que les amplitudes prévisibles de ces dernières sont trop peu élevées.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

3.2.4 Pressure relief class

In case of internal failure of a surge arrester, the fault current through the arrester should not cause violent shattering of the arrester housing. Therefore the fault current withstand of the arrester should be equal to or greater than the maximum fault current through the arrester at the installation point of the arrester.

If higher values than those listed in table 7 of IEC 60099-1 and clause 5.11 of IEC 60099-4 are required, the user should consult the manufacturer.

Section 4: Application of arresters

4.1 Principle of insulation co-ordination

The principle of insulation co-ordination according to IEC 60071-1 and IEC 60071-2 requires the determination of the rated withstand voltages in four steps:

a) Representative overvoltage at the equipment.

b) Co-ordination withstand voltage of the equipment during its service life.

c) Required withstand voltage of the equipment at standard test conditions. This may differ from the co-ordination withstand voltage due to insulation ageing or due to production and assembly dispersion. These differences are compensated by a safety factor of 1,15. For installation at altitudes up to 1 000 m, this factor also covers the necessary atmospheric correction for the external insulation.

d) Rated withstand voltage. This recognizes the possible different shapes of required and rated withstand values and includes the selection from tables of standardized values.

4.2 Protection from slow-front overvoltages

Protection from slow-front overvoltages is of high importance in range II. In range I, the standard insulation level of the equipment is usually so high that protection from slow-front overvoltages is not generally necessary (exceptions are rotating machines, see clause 5.3).

The representative overvoltage at the equipment protected by arresters is equal to the switching impulse protection level, because, with the exception of transmission lines, travelling wave effects can be neglected and the voltage at the equipment is equal to that at the arrester.

Metal-oxide arresters without gaps are suitable to protect against slow-front overvoltages in systems with moderate temporary overvoltages, whereas gapped arresters operate at slow-front overvoltages only after sparkover of the series gap. As a general rule, it can be assumed that with metal-oxide arresters, a limitation of the phase-to-earth overvoltage amplitudes (peak value) to approximately twice the arrester rated voltage (r.m.s. value) is possible. The protective level of gapped arresters is substantially higher.

This means that metal-oxide surge arresters are suitable for limiting slow-front overvoltages due to line energization and re-energization and switching of inductive and capacitive currents, but not in general overvoltages caused by earth faults and fault clearing, as the expected amplitudes of the latter are too low.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Les surtensions causées par l'enclenchement et le réenclenchement des lignes produisent des courants d'une amplitude de l'ordre de 0,5 kA à 2 kA traversant les parafoudres. Dans cette gamme de courant, la connaissance de l'amplitude exacte du courant n'est pas essentielle du fait de la non-linéarité extrême de l'oxyde métallique. L'influence des temps de front du courant est aussi négligeable pour les surtensions à front lent. De plus, on peut ne pas prendre en compte les effets de distance de séparation à l'intérieur des postes. Cependant, l'isolement distant des lignes aériennes peut recevoir des surtensions d'un niveau beaucoup plus élevé que le niveau de protection.

Les parafoudres sont généralement installés entre phase et terre, et, si l'on utilise des parafoudres à oxyde métallique afin de limiter les surtensions à front lent à un niveau peu élevé, les surtensions phase-phase atteindront environ deux fois le niveau de protection du parafoudre placé entre phase et terre, quel que soit l'état du neutre du transformateur. La surtension phase-phase comportera deux composantes phase-terre avec une répartition la plus fréquente de 1:1. Si des niveaux d'isolement entre phases moins élevés sont exigés, il faut installer des parafoudres supplémentaires entre phases.

La valeur maximale supposée de la surtension phase-terre représentative est égale au niveau de protection du parafoudre. Pour les surtensions phase-phase, elle peut valoir jusqu'à deux fois cette valeur sans parafoudres phase-phase.

Dans le cas de la protection par parafoudre contre les surtensions de manoeuvre, il se produit une brutale rupture de pente de la répartition statistique des surtensions. Cette rupture de pente est d'autant plus prononcée que le niveau de protection est bas comparé aux amplitudes des surtensions à front lent prévisibles. Dans ces cas-là, de petites variations de l'isolement ont un grand impact sur le risque de défaillance [2]. Pour couvrir cet effet, il est proposé de déterminer le facteur de coordination déterministe qui dépend de la relation entre le niveau de protection du parafoudre et la valeur à 2 % des surtensions prévisibles.

$$\frac{U_{ps}}{U_{e2}} \leq 0{,}7 \quad : \quad K_{cd} = 1{,}1 \tag{6}$$

$$0{,}7 < \frac{U_{ps}}{U_{e2}} \leq 1{,}2 \quad : \quad K_{cd} = 1{,}24 - 0{,}2\,\frac{U_{ps}}{U_{e2}} \tag{7}$$

$$1{,}2 < \frac{U_{ps}}{U_{e2}} \quad : \quad K_{cd} = 1{,}0 \tag{8}$$

et la tension de tenue de coordination aux chocs de manoeuvre s'écrit

$$U_{cw} = K_{cd} \cdot U_{ps} \tag{9}$$

où

U_{ps} est le niveau de protection aux chocs de manoeuvre du parafoudre;

U_{e2} est la valeur à 2 % de l'amplitude de la surtension à front lent prévisible entre phase et terre;

U_{cw} est la tension de tenue de coordination du matériel aux chocs de manoeuvre;

K_{cd} est le facteur de coordination déterministe.

NOTE Le facteur de 1,0 à 1,1 prend en compte la forte probabilité d'avoir des surtensions dont les amplitudes sont égales au niveau de protection du fait de la troncature de la distribution des surtensions par le parafoudre. Cette probabilité est d'autant plus élevée que le niveau de protection est bas. Au vu des incertitudes concernant la tenue du matériel, en cas de probabilité plus forte des surtensions, il faudrait augmenter la marge entre la tension de tenue et le niveau de protection afin de maintenir un degré de risque donné [2].

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Overvoltages originating from line energization and re-energization give currents of about 0,5 kA to 2 kA through the arresters. In this current range the knowledge of the exact current amplitude is not so important due to the extreme non-linearity of the metal-oxide material. The influence on the current front times can be ignored for slow-front overvoltages. Furthermore, separation effects within substations can be neglected. Distant overhead line insulation, however, may be stressed by overvoltages substantially higher than the protective level.

Surge arresters are usually installed phase-to-earth and, if metal-oxide arresters are used to limit slow-front overvoltages to a low level, the phase-to-phase overvoltages will reach about twice the protection level of the arrester phase-to-earth, irrespective of the transformer neutral treatment. The phase-to-phase overvoltage will consist of two phase-to-earth components with the most frequent subdivision 1:1. If lower phase-to-phase protective levels are required, additional arresters phase-to-phase are needed.

The assumed maximum value of the representative phase-to-earth overvoltage is equal to the protection level of the surge arrester. For the phase-to-phase overvoltages, it can be up to twice this value without phase-to-phase arresters.

In the case of surge arrester protection against switching overvoltages, a severe skewing in the statistical distribution of overvoltages takes place. This skew is more pronounced the lower the protection level, as compared to the amplitudes of the prospective slow-front overvoltages. In these situations, small variations of the insulation withstand have a large impact on the risk-of-failure [2]. To cover this effect, it is proposed to determine the deterministic co-ordination factor dependent on the relation of the surge arrester protective level to the 2 % value of the prospective overvoltages.

$$\frac{U_{ps}}{U_{e2}} \leq 0{,}7 \quad : \quad K_{cd} = 1{,}1 \tag{6}$$

$$0{,}7 < \frac{U_{ps}}{U_{e2}} \leq 1{,}2 \quad : \quad K_{cd} = 1{,}24 - 0{,}2\,\frac{U_{ps}}{U_{e2}} \tag{7}$$

$$1{,}2 < \frac{U_{ps}}{U_{e2}} \quad : \quad K_{cd} = 1{,}0 \tag{8}$$

and the co-ordination switching impulse withstand voltage as

$$U_{cw} = K_{cd} \cdot U_{ps} \tag{9}$$

where

U_{ps} is the switching impulse protective level of the arrester;

U_{e2} is the 2 % value of the prospective slow-front overvoltage amplitude to earth;

U_{cw} is the co-ordination switching impulse withstand voltage of the equipment;

K_{cd} is the deterministic co-ordination factor.

NOTE The factor 1,0 to 1,1 takes into account the high frequency of overvoltages with amplitudes equal to the protection level due to the truncation of the overvoltage distribution by the arrester. This frequency is higher, the lower the protective level. Due to the uncertainties in the equipment withstand, the margin between the withstand voltage and the protective level should increase with increasing overvoltage frequency to maintain a given risk level [2].

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

4.3 Protection contre les surtensions de foudre

4.3.1 Généralités

Du fait de la grande raideur de front des surtensions de foudre, les effets de la propagation des ondes entre le parafoudre et le matériel ne peuvent pas être négligés. De manière générale, la tension aux bornes du matériel protégé est plus élevée que la tension résiduelle du parafoudre (voir 4.3.2). Il est par conséquent toujours judicieux de réduire au minimum la longueur des connexions entre le parafoudre et les matériels importants. Cependant, il est parfois possible de protéger plus d'un matériel avec une seule installation de parafoudre à la condition qu'il soit possible de limiter les raideurs de front, comme dans le cas où à la fois le poste et les lignes aériennes qui l'alimentent sont protégés par câbles de garde.

La protection par câble de garde des lignes et du poste est un facteur important dans la localisation des parafoudres à l'intérieur d'un poste. Il est habituellement possible de protéger un poste même si les lignes associées ne sont pas équipées de câble de garde. La protection du poste réduit la probabilité d'apparition de tensions élevées et de fronts d'onde raides à l'intérieur du poste provenant de courants de foudre élevés. Cependant, il faut reconnaître que la majorité des coups de foudre frappent les lignes, provoquant des surtensions qui se propagent sur les lignes et jusque dans le poste. Si les lignes sont protégées par câble de garde, les surtensions pénétrant dans le poste sont moins sévères que dans le cas des lignes sans câble de garde. Les amplitudes probables de courants traversant le parafoudre sont donc plus faibles. Les tensions résiduelles sont donc plus faibles aux bornes des parafoudres et la protection meilleure.

Les installations non protégées par câble de garde sont soumises aux courants de foudre les plus élevés et aux raideurs de front de l'onde de tension les plus fortes. Il est recommandé de réduire le plus possible la distance entre les parafoudres et les installations qui ne sont pas dotées d'une protection totale.

Dans le cas des installations protégées par câble de garde avec une seule arrivée de ligne aérienne non protégée par câble de garde, le parafoudre doit être placé au plus près des bornes du matériel à protéger (généralement un transformateur). Lorsque plusieurs arrivées de lignes aériennes non protégées par câbles de garde se rejoignent dans le même poste, l'amplitude des ondes de surtensions incidentes ainsi que leur raideur de front sont limitées par division tandis que leur fréquence d'apparition augmente. Cependant, il faut prendre en considération le cas où une ou plusieurs lignes sont hors service ainsi que la probabilité d'occurrence de tels événements pendant un orage. Lorsqu'un ou plusieurs disjoncteurs ou sectionneurs sont ouverts dans un tel poste, les entrées des lignes correspondantes ou certaines parties du poste peuvent se retrouver hors de la protection des parafoudres placés au niveau des transformateurs. L'amorçage de l'isolation d'une ligne hors tension ne risque pas de causer des dommages à l'isolation de cette ligne, mais il pourrait s'avérer que les isolations d'autres matériels tels que disjoncteurs, transformateurs de tension et transformateurs de courant raccordés côté ligne subissent des dégâts. S'il est reconnu que de telles situations nécessitent une protection supplémentaire, on peut installer des parafoudres aux entrées respectives de ces lignes.

Les tensions incidentes provenant de lignes équipées de câbles de garde ont une amplitude et une raideur de front moins fortes que dans le cas de lignes non protégées par câbles de garde. Dans beaucoup de cas, cela permettra une certaine séparation entre les parafoudres et l'isolation à protéger. Dans le cas d'une ligne aérienne unique protégée par câble de garde, un jeu de parafoudres peut être placé en un point qui permette la protection de tous les matériels, donnant toutefois la préférence au transformateur. La méthode de 4.3.2 peut être utilisée pour déterminer la distance maximale entre le parafoudre et le transformateur.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

4.3 Protection from lightning overvoltages

4.3.1 General

Due to the high rate-of-rise of lightning overvoltages, travelling wave effects between arrester and equipment cannot be neglected. As a general rule, the voltage at the protected equipment is higher than the arrester residual voltage (see 4.3.2). Therefore, it is always good practice to reduce conductor separation distance between arrester and major equipment to a minimum. However, it is sometimes possible to protect more than one piece of equipment with a single arrester installation provided that rates of rise can be limited as in the case where both the station and overhead feeder lines are effectively shielded.

A major factor in locating arresters within a station is the line and station shielding. It is usually feasible to provide shielding for the substation even though the associated lines are unshielded. Station shielding reduces the probability of high voltages and steep wave fronts within the station resulting from high-current lightning strokes. However, it should be recognized that the majority of strokes will be to the lines, which will create surges that travel along the line and into the station. If the lines are shielded, the surges entering the station are less severe than those from unshielded lines. Consequently, the magnitude of the arrester currents is lower, resulting in lower arrester residual voltage and better protection of the equipment.

Unshielded installations are subjected to the highest lightning currents and voltage rates of rise. The very minimum possible separation is recommended for installations where complete shielding is not used.

In shielded installations with a single unshielded incoming overhead line, the arrester should be located as near as possible to the terminals of the equipment (usually a transformer) to be protected. When several unshielded incoming overhead lines meet in the station, the incoming overvoltage amplitude and steepness are reduced by division but their frequency of occurrence is increased. However, consideration should be given to the case when one or more of the lines are switched out of service and the probability of such contingencies during lightning storms should be considered. When one or more circuit breakers or disconnecting switches are open in such a station, the corresponding line entrances or certain parts of the station may be left without protection from the arresters at the transformers. Lightning flashover of a de-energized line is unlikely to cause damage to line insulation, but insulation in other equipment such as circuit breakers, voltage transformers and current transformers connected on the line side might be damaged. If such cases are recognized to require additional protection, arresters can be installed at the respective line entrances.

Incoming voltages from shielded lines are lower in amplitude and steepness than from unshielded lines. In many cases, this will permit some separation between the arresters and the insulation to be protected. With a single shielded incoming overhead line, one set of arresters may be located at a point that provides protection to all equipment but gives preference to the transformer. The method in 4.3.2 can be used to determine the maximum separation distance between the arrester and the transformer.

--`,,```,,,,````-`-,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Dans les postes dotés de multiples arrivées de lignes aériennes munies de câbles de garde (et comprenant des installations importantes telles que des transformateurs, de l'appareillage et des équipements de mesure), les parafoudres ne sont pas toujours placés aux bornes de chaque transformateur. Les méthodes données en 4.3.2 peuvent servir à évaluer les distances de séparation maximales. Les installations plus importantes peuvent justifier une étude détaillée des phénomènes transitoires. De telles études et l'interprétation de leurs résultats sortent du cadre de la présente norme.

Il y a deux solutions pour l'utilisation des parafoudres pour la protection des matériels contre les surtensions de foudre:

– déterminer la tension de tenue de coordination au choc de foudre pour un niveau de protection du parafoudre et une distance de séparation donnés. On obtient alors la tension de tenue assignée au choc de foudre en multipliant la valeur obtenue par le facteur de 1,15 (voir article 4.1);
– déterminer la zone de protection du parafoudre qui est égale à la distance de séparation maximale, pour laquelle les exigences de la coordination des isolements sont satisfaites, pour un niveau de protection du parafoudre et une tension de tenue de coordination donnés; cette dernière est obtenue en divisant la tension de tenue assignée au choc de foudre du matériel par 1,15 (voir article 4.1).

En principe, ces deux solutions nécessitent la détermination de la forme réelle de la surtension à l'emplacement du matériel protégé et la tension de tenue de ce dernier, associée à cette forme. Une simplification suffisamment convenable consiste à supposer que cette exigence est couverte dans les conditions suivantes:

– pour les parafoudres avec éclateurs:

  la tension d'amorçage au choc sur front est comparée à la tension de tenue au choc de foudre coupé du matériel;

  et/ou

  la tension d'amorçage au choc de foudre et la tension résiduelle au courant nominal de décharge (8/20) sont comparées à la tension de tenue au choc de foudre du matériel.

  En ce qui concerne les transformateurs isolés au papier imprégné, les deux solutions donnent approximativement le même résultat. De plus, pour les gros transformateurs, la capacité d'entrée diminue la raideur du front de la surtension. On peut donc ne pas prendre en compte l'amorçage au choc sur front.

  Si le matériel placé au niveau de l'arrivée de ligne du poste a une tenue au choc de foudre coupé qui ne dépasse pas de plus de 15 % la tenue en choc plein, il peut s'avérer nécessaire de prendre en compte la tension d'amorçage au choc sur front.

  Dans le cas de postes sous enveloppe métallique et à isolation gazeuse, les ondes transmises et réfléchies dans le poste entraînent une diminution de la raideur du front de la surtension produisant un amorçage du parafoudre pour des tensions inférieures à la tension d'amorçage au choc sur front. Pour simplifier, cependant, on peut négliger les effets d'un amorçage du parafoudre au choc sur front ou bien effectuer des calculs de propagation d'onde.

– pour les parafoudres à oxyde métallique sans éclateur:

  les tensions résiduelles au courant nominal de décharge et/ou au choc de courant à front raide sont comparées à la tension de tenue au choc de foudre du matériel.

  Les surtensions de foudre représentatives, contre lesquelles on cherche à se prémunir, provoquent habituellement des courants traversant le parafoudre dont les temps de front sont plus proches de 1 μs que de 8 μs. L'utilisation de la tension résiduelle au choc de courant à front raide peut donc être justifiée, ce qui résulterait alors en une surtension supérieure d'environ 5 % à celles que donne l'utilisation de la tension résiduelle au

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---
Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

At stations with multiple shielded incoming overhead lines (associated with large installations with transformers, switchgear and measuring equipment), arresters are not always placed at the terminals of every transformer. The methods described in 4.3.2 can be used to estimate maximum separation distances. More important installations may justify a detailed transient study. Such studies and interpretation of their results are outside the scope of this standard.

Two alternatives exist in the application of surge arresters for the lightning overvoltage protection of equipment:

– determine the necessary co-ordination lightning impulse withstand voltage for given arrester protection level and separation distance. The rated lightning impulse withstand voltage is then obtained by multiplying the obtained value by the factor of 1,15 (see clause 4.1);
– determine the protective zone of the arrester which is the maximum separation distance for which the insulation co-ordination requirements are fulfilled, for given arrester protective level and co-ordination withstand voltage. This is obtained by dividing the rated lightning impulse withstand voltage of the equipment by 1,15 (see clause 4.1).

In principle, both alternatives require the determination of the actual overvoltage shape at the protected equipment and its withstand voltage associated with this shape. As a sufficiently adequate simplification, however, it can be assumed that this requirement is covered under the following conditions:

– for gapped surge arresters:

  the front-of-wave sparkover voltage is compared with the chopped lightning impulse withstand voltage of the equipment;

  and/or

  the lightning impulse sparkover voltage and the residual voltage at nominal discharge current (8/20) are compared with the lightning impulse withstand voltage of the equipment.

  For oil-paper insulated transformers, both alternatives give approximately the same result. Furthermore, for large transformers the input capacitance reduces the rate-of-rise of the impinging overvoltage. Therefore, the consideration of the front-of-wave sparkover may be omitted.

  If the equipment at the line entrance of the substation has chopped lightning impulse withstand strength less than 15 % above full impulse, then consideration of the front-of-wave sparkover voltage may be necessary.

  For gas insulated substations the transmitted and reflected waves within the substation cause a decrease of the rate-of-rise of the impinging surge causing sparkover of the arrester at voltages lower than the front-of-wave sparkover voltage. As a simplification, therefore, the effects of the front-of-wave sparkover of the arrester may be neglected or, alternatively, travelling wave calculations may be performed.

– for gapless metal-oxide surge arresters:

  the residual voltages at nominal discharge current and/or at steep current impulse are compared with the lightning impulse withstand voltage of the equipment.

  The representative lightning overvoltages for which protection is desired usually cause currents through the arrester which have front times closer to 1 μs than to 8 μs. The use of the residual voltage at steep current impulse, therefore, may be justified which would result into approximately 5 % higher overvoltage than those using the residual voltage at

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

courant nominal de décharge. Des calculs comparatifs ont démontré que cet effet est similaire à l'effet d'amorçage sur front des parafoudres au carbure de silicium avec éclateurs, et on applique les mêmes considérations.

NOTE Pour les isolations dans l'air, ces procédures peuvent conduire à un résultat trop prudent du fait du retard de l'amorçage de l'isolation, qui est généralement exprimé par des courbes tension-temps. Des résultats plus précis peuvent être obtenus à partir de calculs de propagation d'onde, dans lesquels ce retard d'amorçage est pris en compte. Les mêmes considérations s'appliquent aux isolations dont les caractéristiques d'amorçage sont connues.

4.3.2 Méthode simplifiée pour l'étude de la protection contre la foudre

4.3.2.1 Protection des matériels ouverts

L'expérience des matériels de poste existants a démontré que si les facteurs influents donnés en 4.3.1 sont pris en compte, la tension de tenue de coordination au choc de foudre est déterminée à partir de la formule empirique (10) qui prend en compte les caractéristiques fondamentales du comportement des surtensions de foudre en poste (voir CEI 60071-2).

$$U_{cw} = U_{pl} + \frac{A}{N} \times \frac{L_t}{L_{sp} + L_f} \qquad (10)$$

où

$L_f = R_a/r$ est la longueur de la portion de ligne aérienne proche du poste dont le taux d'événements de foudre est égal au taux de défaillance acceptable. Le deuxième terme de la somme est proportionnel à la raideur de l'onde incidente représentative. Il faut noter que dans les formules (10), (11) et (12) des unités identiques doivent être utilisées;

U_{cw} est la tension de tenue de coordination au choc de foudre;

A est la tension prise au tableau 2 décrivant la performance vis-à-vis de la foudre de la ligne aérienne raccordée au poste;

U_{pl} est le niveau de protection au choc de foudre du parafoudre;

N est le nombre de lignes raccordées au poste (N = 1 ou N = 2);

L_t est la longueur totale $d + d_1 + d_2 + d_A$ (voir figure 2)

L_{sp} est la longueur d'une portée;

L_f est la longueur de la portion de ligne aérienne ayant un taux de coupures égal au taux de défaillance acceptable;

R_a est le taux de défaillance acceptable (nombre de défaillances par unité de temps) pour le matériel protégé;

r est le taux de coupures d'une ligne aérienne par an (nombre de coupures par unité de temps et de longueur) de même conception que celle qui équipe le premier kilomètre devant le poste. Si N = 2 les taux doivent être ajoutés.

Les taux d'avarie acceptables habituels pour le matériel protégé, tels que mentionnés dans la CEI 60071-2, se situent entre 0,1 % par an et 0,4 % par an. Une valeur typique de 0,25 % par an est utilisée dans les exemples du tableau 3.

Dans le cas des lignes de distribution, les taux de coupure sont habituellement élevés par rapport aux taux de défaillance acceptables, c'est-à-dire que la longueur de L_f ligne est faible et peut être négligée. La formule (10) est alors simplifiée:

$$U_{cw} = U_{pl} + \frac{A}{N} \times \frac{L_t}{L_{sp}} \qquad (11)$$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

nominal discharge current. Comparison calculations have shown that this effect is similar to that of the front-of-wave sparkover of gapped silicon carbide arresters and the same considerations apply.

NOTE For air insulation, these procedures may result in a too conservative result owing to the delay in the insulation flashover, which is usually expressed as voltage-time curves. More accurate results may be obtained from travelling wave calculations, in which this flashover delay is taken into account. Similar considerations apply to other insulations for which the breakdown behaviour is known.

4.3.2 Simplified method for lightning protection

4.3.2.1 Protection of open air equipment

Experience with existing substation equipment has shown that, if the influencing factors given in 4.3.1 are taken into account, the co-ordination lightning impulse withstand voltage can be determined from empirical formula (10) which considers the fundamental characteristics of lightning overvoltage behaviour in stations (see IEC 60071-2).

$$U_{cw} = U_{pl} + \frac{A}{N} \times \frac{L_t}{L_{sp} + L_f} \qquad (10)$$

where

$L_f = R_a / r$ is the length of the overhead line in front of the station, which gives a rate of lightning events equal to the acceptable failure rate. The right fraction multiplied by A/N is proportional to the steepness of the representative impinging surge. Note that in formulas (10), (11) and (12) consistent units must be used;

U_{cw} is the co-ordination lightning impulse withstand voltage;

A is the voltage according to table 2 describing the lightning performance of the overhead line connected to the station;

U_{pl} is the lightning impulse protection level of the surge arrester;

N is the number of lines connected to the substation ($N = 1$ or $N = 2$);

L_t is the total length $d + d_1 + d_2 + d_A$, figure 2;

L_{sp} is the span length;

L_f is the overhead line section with outage rate equal to acceptable failure rate;

R_a is the acceptable failure rate (number of failures per unit time) for the protected equipment;

r is the overhead line outage rate (number of outages per unit time and unit length) per year for a design corresponding to the first kilometer in front of the station. If $N = 2$, the rates have to be added.

Usual acceptable failure rates of the protected equipment are, as stated in IEC 60071-2, between 0,1 % per year and 0,4 % per year. A typical value of 0,25 % per year is used in the examples of table 3.

For distribution lines the outage rates are usually large compared to the acceptable failure rates, i.e. the overhead line length L_f is small and can be neglected. Formula (10) is then simplified to:

$$U_{cw} = U_{pl} + \frac{A}{N} \times \frac{L_t}{L_{sp}} \qquad (11)$$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

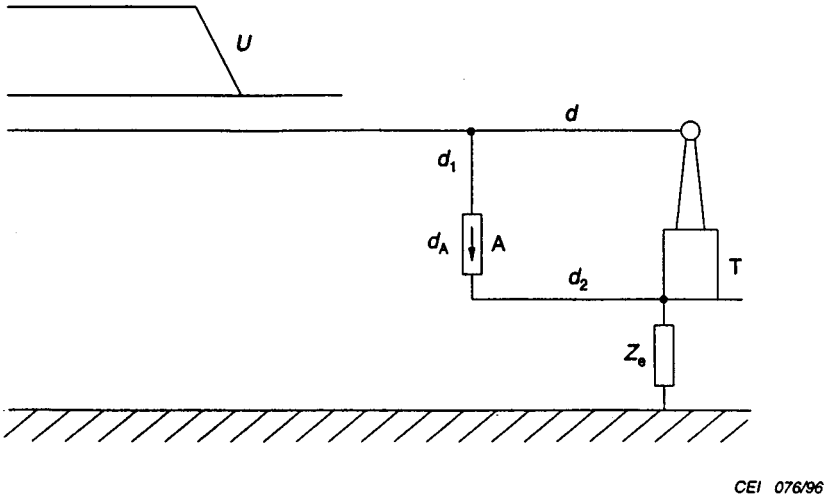


Figure 2a – Installations sans réseau maillé de terre (réseau de distribution)

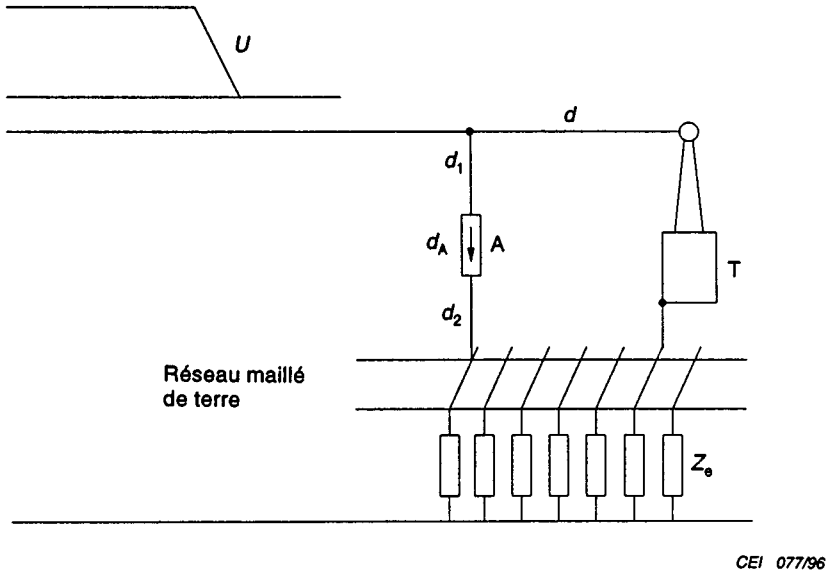


Figure 2b – Installations avec réseau maillé de terre (postes)

Figure 2 – Schéma de raccordement du parafoudre au matériel protégé

où

d est la distance entre la borne haute tension du matériel à protéger et le point de raccordement du conducteur haute tension du parafoudre;

d_1 est la longueur du conducteur côté haute tension du parafoudre;

d_2 est la longueur du conducteur côté terre du parafoudre;

d_A est la longueur du parafoudre;

Z_e est l'impédance de mise à la terre;

T est l'objet protégé;

U est la surtension incidente.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

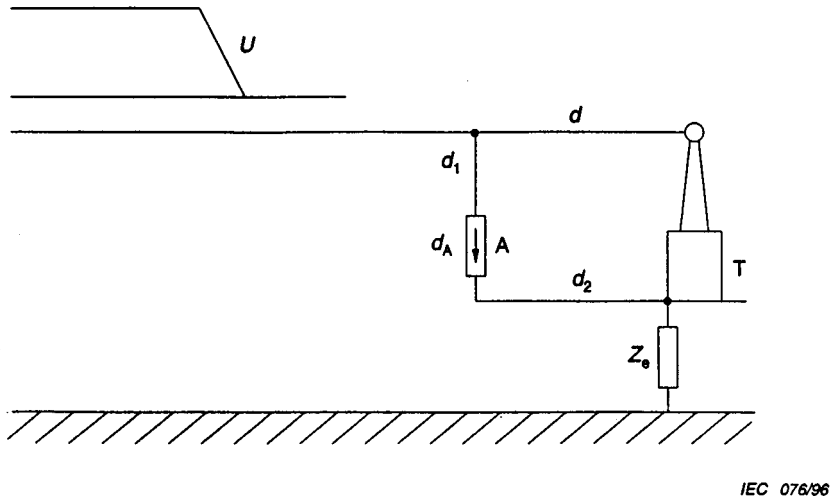


Figure 2a – Installations without earth-mat (distribution systems)

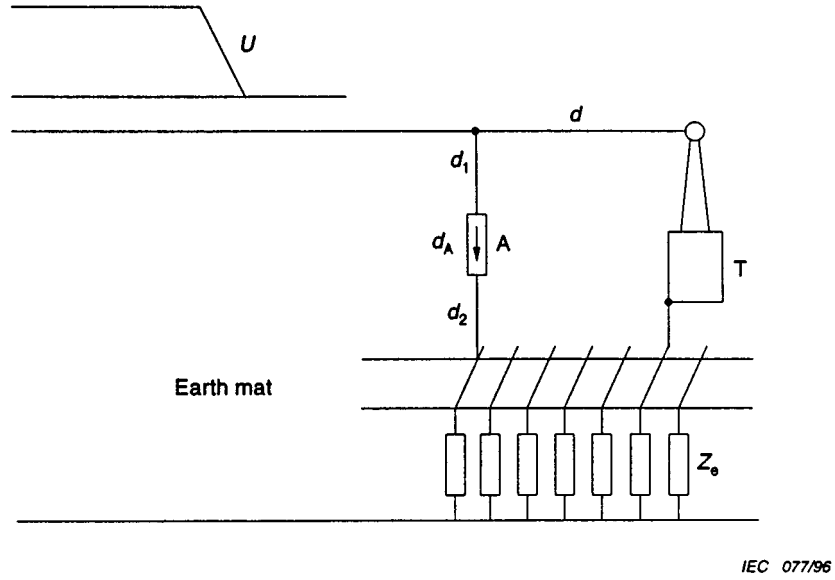


Figure 2b – Installations with earth mat (substations)

Figure 2 – Schematic diagram for the surge arrester connection to the protected object

where

d is the distance between the high-voltage terminal of the protected equipment and the connection point of the arrester high-voltage conductor;

d_1 is the length of the arrester high-voltage conductor;

d_2 is the length of the arrester earth conductor;

d_A is the length of the arrester;

Z_e is the earthing impedance;

T is the protected object;

U is the impinging overvoltage surge.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Dans les réseaux de distribution dont les matériels ne sont pas protégés contre les coups de foudre directs sur les conducteurs ou contre les amorçages en retour, il est nécessaire de prêter attention aux surtensions de foudre induites (des recommandations spécifiques sont actuellement à l'étude à la CIGRE).

NOTE La formule (10) décrit la chute de tension en p.u. en fonction de la performance vis-à-vis de la foudre de la ligne aérienne raccordée au matériel, de la configuration du poste et du taux de défaillance acceptable qui a été adopté pour le matériel. A la lumière des connaissances des performances des lignes aériennes vis-à-vis de la foudre et de l'atténuation due à l'effet couronne, la constante A a été déterminée de manière à obtenir une adéquation entre les tensions de tenue calculée à l'aide de la formule (10) et l'expérience acquise en exploitation avec des zones de protection mises en oeuvre depuis longtemps (voir tableau 3). La formule ne peut pas servir à déterminer les amplitudes des surtensions pour un événement de foudre spécifique sur la ligne aérienne.

Lorsqu'on a sélectionné la tension de tenue au choc de foudre du matériel, la zone de protection du parafoudre peut être estimée à partir de la formule (12):

$$L_p = \frac{N}{A}\left[\left(\frac{U_{rw}}{1{,}15}\right) - U_{pl}\right]\left(L_{sp} + L_f\right) \qquad (12)$$

où

L_p est la zone de protection;

U_{rw} est la tension de tenue assignée au choc de foudre (voir article 4.1)

La formule (12) montre que, pour un poste donné, la zone de protection augmente avec:

– l'accroissement de la différence entre la tension de tenue assignée et le niveau de protection;
– la décroissance du taux de coupures de la ligne aérienne proche du poste, démontrant ainsi l'effet d'une meilleure protection par des câbles de garde et par une impédance réduite au pied du pylône;
– l'accroissement des taux de défaillance acceptables, ce qui veut dire que le matériel situé au-delà de la distance de protection peut encore être protégé, mais avec un taux de défaillance plus élevé.

Le tableau 3, dans lequel les zones de protection soulignées sont celles qui sont adoptées de manière générale, donne des exemples de zones de protection calculées. Les zones de protection de 160 m et 180 m sont justifiées par l'expérience de la protection du matériel à l'entrée de la ligne par les parafoudres placés au niveau du transformateur, lorsqu'une protection par câble de garde parfaite est réalisée proche du poste.

Tableau 2 – Facteur *A* des formules (10) à (12) pour différentes lignes aériennes

	A kV
Lignes de distribution (amorçages entre phases)	
– avec armements à la terre	900
(amorçage à la terre pour les faibles tensions)	
– lignes sur poteaux en bois	2 700
(amorçage à la terre pour les tensions élevées)	
Lignes de transport (amorçage monophasé à la terre)	
– à conducteur unique	4 500
– à faisceau de deux conducteurs	7 000
– à faisceau de quatre conducteurs	11 000
– à faisceau de six ou huit conducteurs	17 000
NOTE Pour les lignes de distribution, les tensions A sont plus faibles que pour une ligne de transport monoconducteur, parce que dans les lignes de distribution se produisent des amorçages entre phases ou des amorçages multiples entre phase et terre qui conduisent à une répartition du courant et même à une limitation de l'amplitude de l'onde incidente dans le cas d'armements mis à la terre.	

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Induced lightning overvoltages need to be considered in distribution systems, where the equipment is not protected against direct lightning strokes to the conductors or against back-flashovers. (Detailed recommendations are under consideration within CIGRE.)

NOTE Formula (10) describes the p.u. voltage drop depending on the lightning performance of the overhead line connected to the equipment, on the substation layout and on the adopted acceptable failure rate of the equipment. Using the existing knowledge of the lightning performance of overhead lines and of corona damping effects, the constant A has been determined to obtain agreement between the withstand voltages calculated with formula (10) and the service experience obtained with protective zones used for a long time (see table 3). The formula may not be used to determine overvoltage amplitudes for a specific lightning event on the overhead line.

When the rated lightning impulse withstand voltage of the equipment is selected, the protective zone of the arrester can be estimated from formula (12):

$$L_p = \frac{N}{A}\left[\left(\frac{U_{rw}}{1{,}15}\right) - U_{pl}\right]\left(L_{sp} + L_f\right) \qquad (12)$$

where

L_p is the protective zone;

U_{rw} is the rated lightning impulse withstand voltage (see clause 4.1).

Formula (12) indicates that for a given substation the protective zone increases with:

– increasing difference between rated withstand voltage and protective level;

– decreasing outage rate of the overhead line in front of the station, thus demonstrating the effect of improved shielding by earth wires and reduced tower footing impedance;

– increasing acceptable failure rates, which means that the equipment outside the protective range still may be protected, however with a higher failure rate.

Table 3 shows examples for calculated protective zones, in which the underlined ranges are those generally adopted. The protective zones 160 m and 180 m are supported by experience with line entrance equipment protected by the arrester at the transformer, when perfect shielding of the overhead line in front of the station is provided.

Table 2 – Factor *A* in formulas (10) to (12) for various overhead lines

	A kV
Distribution lines (phase-to-phase flashovers)	
– with earthed cross-arms (flashover to earth at low voltage)	900
– wood-pole lines (flashover to earth at high voltage)	2 700
Transmission lines (single-phase flashover to earth)	
– single conductor	4 500
– double conductor bundle	7 000
– four conductor bundle	11 000
– six and eight conductor bundle	17 000
NOTE The voltages A for distribution lines are lower than that for the single conductor transmission line, because in distribution lines phase-to-phase flashovers or multiple phase-to-earth flashovers occur, thus leading to current sharing, and in case of earthed cross-arms, to a limitation of the incoming surge amplitude.	

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Tableau 3 – Exemple pour les zones de protection calculées par la formule (10) pour les postes ouverts

Tension du système	Niveau de protection	Tension de tenue		Longueur de portée	*A*	Zone de protection L_p					
		assignée	de coordination			*r* = 0,1*	*r* = 0,5*		*r* = 2*		*r* = 6*
						N = 2	*N* = 1	*N* = 2	*N* = 2	*N* = 2	*N* = 2
kV	kV	kV	kV	m	kV	m	m	m	m	m	m
24	80	125	109	100	2 700	–	–	–	2,4	4,8	3,0
				200	900	–	–	–	10,4	20,8	15,5
123	350	550	478	300	4 500	160	23	46	12,0	24	–
420	900	1 425	1 239	400	11 000	180	28	56	16	32	–
* Dimensions en 1 pour 100 km et par an.											

4.3.2.2 Protection de postes sous enveloppe métallique et à isolation gazeuse

De manière générale, les postes sous enveloppe métallique et à isolation gazeuse sont mieux protégés que les postes ouverts du fait de leurs impédances d'onde beaucoup moins élevées que celles des lignes aériennes. Il n'est pas possible de faire de recommandation valable concernant l'évaluation de l'amélioration obtenue pour les postes sous enveloppe métallique et à isolation gazeuse par rapport aux postes ouverts. Malgré tout, la formule indiquée ci-dessus pour les postes ouverts fournit des estimations prudentes de la tension de tenue de coordination au choc de foudre ou de la distance de protection, si bien qu'une diminution de la constante A à la moitié de la valeur inscrite au tableau 2 est valable.

En règle générale, les parafoudres doivent être installés à l'entrée de la ligne afin de protéger le poste sous enveloppe métallique et à isolation gazeuse, même lorsque le disjoncteur est ouvert. Il peut être nécessaire d'installer des parafoudres supplémentaires au niveau des transformateurs, soit lorsque les distances par rapport aux parafoudres situés aux arrivées de ligne sont trop longues, soit lorsque des surtensions élevées au niveau du transformateur sont prévues alors que les parafoudres d'entrée de lignes ne sont pas raccordés. Des parafoudres supplémentaires installés dans des emplacements adéquats à l'intérieur des postes sous enveloppe métallique et à isolation gazeuse peuvent être aussi nécessaires pour des postes de grande dimension. Une meilleure protection vis-à-vis des surtensions à front rapide est obtenue en installant des parafoudres d'entrée de ligne à l'intérieur de ces postes, ce qui élimine les effets de bretelles de raccordement du parafoudre. Bien que ce parafoudre soit plus onéreux qu'un parafoudre extérieur, il peut rendre l'utilisation de parafoudres supplémentaires superflue et devenir une solution plus économique.

Lorsque les distances de protection indiquent qu'il est nécessaire d'installer des parafoudres supplémentaires à l'intérieur du poste sous enveloppe métallique et à isolation gazeuse, la formule approximative ne doit pas être utilisée et il faut alors réaliser des calculs de propagation d'ondes.

La protection par parafoudre contre les surtensions à front très rapide à l'intérieur des postes sous enveloppe métallique n'est habituellement pas possible du fait des très hautes fréquences concernées et du retard dans le mécanisme de conduction des parafoudres à oxyde métallique. Les parafoudres avec éclateurs ne fonctionneraient pas.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Table 3 – Examples for protective zones calculated by formula 10 for open air substations

System voltage	Protection level	Withstand voltage		Span	*A*	Protective zone L_p					
		rated	coordination			*r* = 0,1*	*r* = 0,5*		*r* = 2*		*r* = 6*
						N = 2	*N* = 1	*N* = 2	*N* = 2	*N* = 2	*N* = 2
kV	kV	kV	kV	m	kV	m	m	m	m	m	m
24	80	125	109	100	2 700	–	–	–	2,4	4,8	3,0
				200	900	–	–	–	10,4	20,8	15,5
123	350	550	478	300	4 500	160	23	46	12,0	24	–
420	900	1 425	1 239	400	11 000	180	28	56	16	32	–
* Dimensions in 1 per 100 km and year.											

4.3.2.2 Protection of gas insulated substations (GIS)

GIS are, in general, better protected than open-air substations because they have surge impedances much lower than that of overhead lines. A generally valid recommendation for the estimation of the improvement obtained for GIS as compared to open-air substations cannot be made. However, the use of the formula given above for the open-air substation results in conservative estimates of the co-ordination lightning impulse withstand voltage or of the protective range and a reduction of the constant A to half the value shown in table 2 is suitable.

As a general rule, surge arresters have to be installed at the line entrance to protect the GIS, even when the line circuit breaker is open. Additional surge arresters at the transformers may be necessary, either when the separation distances to the line entrance arresters are too long, or when high overvoltages at the transformer are expected during conditions when the line entrance arresters are disconnected. Arresters installed at suitable locations inside the GIS may also be necessary for extended GIS. Improved fast-front overvoltage protection is obtained by installation of the line entrance arrester inside the GIS which eliminates the effects of the outdoor arrester leads. Although this arrester would be more expensive than an outdoor arrester, additional arresters may be superfluous and this may be the more economic solution.

When the protective ranges indicate that additional arresters should be installed within the GIS, the approximation formula should not be used, but travelling wave calculations should be performed.

Surge arrester protection for very-fast-front overvoltages within GIS is usually not possible due to the very high frequencies involved and to the delay in the conduction mechanism of metal-oxide arresters. Gapped arresters will not operate.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

4.3.2.3 Protection de postes raccordés par câble

De manière similaire aux postes sous enveloppe métallique et à isolation gazeuse, les postes raccordés par câble sont – pour les mêmes dimensions – mieux protégés que les postes ouverts, mais ici aussi, il n'est pas possible de faire des recommandations qui soient valables dans un cas général.

Afin de protéger l'arrivée du câble, il convient d'installer les parafoudres au niveau de la jonction aéro-souterraine. Il est possible de faire une estimation prudente de la distance de séparation, comme dans le cas de postes ouverts. Les parafoudres sont suffisants pour la protection du poste lorsque plus d'une ligne reste raccordée au poste par des câbles souterrains pendant les coups de foudre. S'il est probable que les câbles raccordés au poste soient à extrémités ouvertes pendant la foudre, et si la longueur du câble est supérieure à approximativement cinq fois la valeur calculée au moyen de la formule (12), il est recommandé de placer des parafoudres supplémentaires au niveau de l'extrémité ouverte. Cela s'applique également à l'extrémité ouverte de câbles reliés à une ligne aérienne par l'intermédiaire d'un poste.

4.3.2.4 Protection des câbles

Il convient que les câbles reliant deux lignes aériennes soient protégés par des parafoudres aux deux extrémités si la longueur du câble est supérieure à cinq fois la valeur calculée par la formule (12). Il convient que les liaisons du parafoudre aux extrémités du câble suivent cette formule.

Dans le cas de câbles de tension la plus élevée supérieure ou égale à 72,5 kV, il est recommandé d'utiliser des câbles de garde sur la ligne aérienne proche du câble (environ trois portées), ainsi que des mises à la terre de faibles impédances pour les pylônes situés aux niveaux des extrémités des câbles.

Section 5: Parafoudres destinés à une utilisation spéciale

5.1 Parafoudres pour neutres de transformateurs

5.1.1 Généralités

L'une des applications spéciales les plus répandues concerne la protection des neutres de transformateurs. Il convient que chaque neutre isolé de la terre et sorti par l'intermédiaire d'une traversée soit protégé par un parafoudre contre les surtensions de foudre ou de manoeuvre. Une contrainte excessive pour l'isolation du neutre peut apparaître, en cas de propagation de surtensions de foudre polyphasées ou de surtensions de manoeuvre résultant d'un défaut asymétrique dans les réseaux.

De plus, dans les réseaux compensés par bobines d'extinction, des surtensions de manoeuvre élevées peuvent survenir dans le neutre du transformateur et aux bornes de l'enroulement lors de l'élimination d'un défaut biphasé terre et quand le circuit qui reste relié aux bornes de ligne du transformateur a une faible capacité par rapport à la terre.

Il convient que la capacité d'absorption énergétique des parafoudres de neutre soit au moins la même que celle spécifiée pour les parafoudres phase-terre, voire supérieure.

La tension résiduelle au courant de décharge 1 kA peut servir à déterminer le niveau de protection du parafoudre, dans la mesure où il n'y a pas de courants élevés. Dans le cas des parafoudres de neutre, le rapport de protection peut être beaucoup plus faible, à cause du faible taux d'accroissement de la tension.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---
Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

4.3.2.3 Protection of cable-connected substations

Similar to GIS, cable-connected substations are – for the same dimensions – better protected than open-air stations, but here also no generally valid recommendation can be given.

Surge arresters should be installed at the overhead line-cable terminal to protect the cable entrance. The separation distance effects can be conservatively estimated as with open-air substations. When more than one line remains connected to the substation through cables during lightning, the arresters are sufficient to protect the substation. If it is likely that cables connected to the substation are in open-end conditions during lightning, and if the cable length exceeds a value of approximately five times the value calculated with formula (12), additional arresters are recommended at the open end. This also applies to the open end of cables which are connected to the overhead line through a substation.

4.3.2.4 Protection of cables

Cables connected between two overhead lines should be protected by surge arresters at both terminals, if the cable length exceeds five times the value determined according to formula (12). The arrester connections to the cable terminals should follow this formula.

For cables 72,5 kV and above, the use of shield wires on the overhead line close to the cable (about three spans) and low footing impedances for the towers at the cable terminals are recommended.

Section 5: Surge arresters for special application

5.1 Surge arresters for transformer neutrals

5.1.1 General

One of the most widely used special applications of arresters is for the protection of transformer neutrals. Each unearthed neutral brought out through a bushing should be protected against lightning and switching overvoltages by an arrester. The neutral insulation may be overstressed in case of incoming multiphase lightning overvoltages, or in case of switching overvoltages due to asymmetrical faults in the power systems.

Furthermore, in case of resonant earthed neutral systems, high switching overvoltages may arise in the transformer neutral and across the winding when a double phase-to-earth fault is interrupted, and the circuit left connected to the transformer line side has a small capacitance to earth.

The line discharge energy absorption capability of neutral arresters should be at least the same as required for the phase-to-earth arresters or higher.

The residual voltage at a discharge current of 1 kA can be used for the determination of the protection level of the arrester, since high current values do not occur. For neutral arresters, the protection ratio may be considerably smaller due to the small rate of voltage rise.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

5.1.2 Parafoudres pour neutres de transformateurs à pleine isolation

La protection des neutres de transformateurs à pleine isolation peut être obtenue grâce à des parafoudres ayant le même niveau de protection que les parafoudres phase-terre, ou un niveau de protection inférieur. Du fait de la plus faible tension à fréquence industrielle entre le neutre et la terre, la tension assignée du parafoudre de neutre peut être choisie moins élevée. Une tension assignée d'au moins 60 % de celle des parafoudres phase-terre est conseillée.

On utilise normalement deux types de parafoudres:

– soit un parafoudre de même conception que les parafoudres phase-terre, mais avec une tension assignée réduite;

– soit un parafoudre spécial ayant des niveaux de protection réduits.

Pendant des conditions anormales de fonctionnement du réseau, ou pendant des défauts à la terre intermittents, des surtensions de longue durée et d'une amplitude suffisamment grande pour provoquer des fonctionnements successifs, avec un endommagement consécutif des parafoudres de phase, peuvent survenir. Dans de tels cas, il est utile de coordonner les parafoudres de telle sorte que le parafoudre de neutre fonctionne avant les parafoudres de phase. Un parafoudre de neutre à haut pouvoir d'écoulement pourrait supporter cette contrainte et empêcher l'endommagement des parafoudres de ligne. On conseille de choisir une tension d'amorçage au choc de manoeuvre du parafoudre de neutre d'environ 45 % de la tension d'amorçage au choc de manoeuvre des parafoudres de ligne.

5.1.3 Parafoudres pour neutres de transformateurs à isolation non uniforme

Les transformateurs dont la tenue diélectrique est décroissante entre les bornes de ligne et le neutre sont couramment utilisés sur des réseaux à neutre à la terre. Si le neutre du transformateur n'est pas directement relié à la terre, dans le but de limiter les courants de court-circuit, il est recommandé de le protéger par un parafoudre dont les caractéristiques doivent être choisies en fonction de la nature du réseau et de la tension de tenue du neutre, en suivant les mêmes directives que pour les parafoudres phase-terre.

5.2 Parafoudres entre phases

Des surtensions entre phases très importantes peuvent survenir lors de la coupure du courant dans une bobine d'inductance ou dans un transformateur chargé par une inductance. Les tensions de tenue de la bobine d'inductance ou de l'isolation entre phases des transformateurs peuvent être dépassées sans qu'il y ait fonctionnement des parafoudres phase-terre. Si de telles manoeuvres sont prévues, il faut installer des parafoudres entre phases en plus des parafoudres phase-terre. Il convient que les parafoudres entre phases aient une tension de service permanent égale ou supérieure à 1,05 fois la tension la plus élevée du réseau. Dans le cas de parafoudres à oxyde métallique, cette valeur couvre les surtensions temporaires jusqu'à 1,25 fois la tension la plus élevée du réseau. Une valeur de la tension assignée doit être spécifiée pour les surtensions temporaires plus élevées. Pour les parafoudres avec éclateurs, il est nécessaire de choisir une valeur de tension assignée afin de tenir compte des surtensions temporaires.

Dans le cas de transformateurs ayant un enroulement basse tension en triangle, il peut être nécessaire d'installer des parafoudres entre phases sur cet enroulement afin de limiter les surtensions transmises inductivement. Ces parafoudres peuvent également protéger le côté haute tension du transformateur en absorbant l'énergie magnétique qui est libérée lors de la coupure du courant à la mise hors service du transformateur.

Les transformateurs de four peuvent nécessiter d'être protégés par des parafoudres entre phases en plus de ceux entre phase et terre. Ces parafoudres sont soumis à des exigences particulières et il convient de définir leurs caractéristiques.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

5.1.2 Surge arresters for fully insulated transformer neutrals

Protection of fully insulated transformer neutrals can be achieved by using arresters having the same protection level as the phase-to-earth arresters or lower. Because of the lower power frequency voltage between neutral and earth, the rated voltage of the neutral arrester can be a lower value. A rated voltage of at least 60 % of the rated voltage necessary for the phase-to-earth arresters is recommended.

Two kinds of arresters are used:

– either the same design as for the arresters phase-to-earth, but with reduced rated voltage; or

– special arresters with reduced protection levels.

During abnormal system conditions, or during intermittent earth faults, overvoltages of long duration and amplitude high enough to cause successive arrester operation with consequent damage of the phase arresters may occur. In such cases, it is beneficial to co-ordinate the arresters so that the neutral arrester operates prior to the phase-to-earth arresters. A high energy neutral arrester may withstand the stresses and prevent damage of the phase-to-earth arresters. A switching impulse protection level of the neutral arrester of about 45 % of the switching impulse protection level necessary for the phase-to-earth arresters is recommended.

5.1.3 Surge arresters for neutrals of transformers with non-uniform insulation

Transformers with the dielectric strength graded from the phase terminal to the neutral are commonly applied in earthed neutral systems. If the transformer neutral is not directly earthed to limit the short-circuit currents in the system, it should be protected by an arrester with characteristics selected according to the system conditions and the withstand voltage of the neutral using the same selection methods used for the phase-to-earth arresters.

5.2 Surge arresters between phases

Considerable overvoltages between the phase terminals of transformers or reactors may occur when a reactor or a reactive loaded transformer is switched off. The withstand voltage of the reactor or the transformer between phases may be exceeded without operation of the phase-to-earth arresters. If such switching operations are expected, surge arresters should be applied between phases in addition to those applied phase-to-earth. The phase-to-phase arresters should have a continuous operating voltage equal to or higher than 1,05 times the highest system voltage. For metal-oxide surge arresters this covers temporary overvoltages up to 1,25 times the highest system voltage. For higher temporary overvoltages a value for the rated voltage has to be specified. For gapped arresters the selection of a rated voltage value is necessary to cover temporary over-voltages.

In the case of transformers with a delta-connected low-voltage winding, arresters between phases may be necessary on the low-voltage side to limit inductively transferred overvoltages. These arresters can also protect the high-voltage side of the transformer by absorbing the magnetic energy when switching off transformers.

Furnace transformers may require arresters between phases in addition to those connected phase-to-earth. For these arresters, special requirements are necessary and the arrester characteristics should be defined.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

5.3 Parafoudres pour machines tournantes

Bien qu'aucune recommandation pour la coordination de l'isolement des machines tournantes n'ait été établie, on utilise des parafoudres pour protéger des alternateurs et des moteurs contre les surtensions.

Des parafoudres spéciaux sont souvent utilisés, dont les caractéristiques doivent être fixées par accord entre le constructeur et l'utilisateur. Il convient, en particulier, d'examiner les caractéristiques du limiteur de pression des parafoudres pour alternateurs dont les courants de court-circuit peuvent être très notablement supérieurs à ceux indiqués dans la CEI 60099-1 ou la CEI 60099-4.

Pour les machines reliées à des lignes aériennes soit directement, soit par l'intermédiaire de courtes longueurs de câbles, il est recommandé d'installer aussi près que possible des bornes de la machine, entre phase et terre, à la fois des condensateurs (0,1 à 0,3 μF) pour étaler le front de l'onde jusqu'à environ 10 μs ou plus, et des parafoudres pour assurer une protection supplémentaire. Il est aussi possible d'installer également un deuxième jeu de parafoudres sur la ligne aérienne avant la machine, ou au point de jonction entre la ligne et le câble.

NOTE En plus de la limitation des surtensions arrivant dans le poste de la machine, les parafoudres installés sur la ligne ont pour effet de diminuer le courant de décharge à travers les parafoudres installés au niveau de la machine. Les tensions résiduelles plus faibles qui en résultent, pour les parafoudres installés au niveau de la machine, augmentent la protection de cette dernière.

Les caractéristiques des parafoudres sont choisies selon les sections 2 et 3, et la tenue au choc de l'isolation ou la valeur conseillée par le fabricant est comparée au niveau de protection du parafoudre. En général, seule une faible marge entre les niveaux de protection et les tensions de tenue peut être atteinte.

Les machines reliées à des lignes aériennes par l'intermédiaire de transformateurs peuvent ne pas nécessiter une protection par parafoudres en plus de la protection du transformateur, si la machine est raccordée par des câbles de longueur suffisante ou si des condensateurs aux valeurs indiquées ci-dessus sont installés. Si un disjoncteur est installé entre le transformateur et la machine tournante, les condensateurs doivent être placés au bornes de l'enroulement du transformateur relié à l'alternateur.

Dans le cas de machines reliées à des transformateurs étoile-triangle, on peut obtenir une meilleure protection en installant des parafoudres supplémentaires entre phases. Les parafoudres installés aux bornes de la machine ou aux bornes du transformateur côté machine ne sont pas soumis à des courants de foudre élevés. Il est donc possible d'obtenir des niveaux de protection bas avec des tensions d'amorçage peu élevées (dans le cas de parafoudres à éclateurs) et de faibles tensions résiduelles pour des courants de décharge de 500 A ou moins.

Les parafoudres ne doivent pas être installés entre phases dans le cas de grands turbo-alternateurs, qui ont des impédances d'onde peu élevées et des jeux de barre monophasés sous gaines, pour lesquels les courts-circuits entre phases doivent être évités. Les parafoudres placés du côté haute tension du transformateur doivent pouvoir fournir une protection suffisante.

5.4 Autres utilisations particulières des parafoudres

Le choix et l'installation de parafoudres destinés à protéger les appareils suivants doivent être adaptés aux exigences particulières du matériel, déterminées par l'utilisateur et le constructeur des appareils à protéger:

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

5.3 Surge arresters for rotating machines

Though a recommendation for insulation co-ordination for rotating machines has not been established, surge arresters are used to protect generators and motors against overvoltages.

Special arresters are often used for this application and the requirements have to be defined by agreement between manufacturer and user. In particular, for generator arresters attention should be paid to their pressure relief performance, since short-circuit currents may be appreciably higher than those in IEC 60099-1 or IEC 60099-4.

For machines which are connected to overhead lines either directly or through short cables, capacitors (0,1 to 0,3 μF) and arresters should be installed between phase and earth as close as possible to the machine terminals to extend the overvoltage front to approximately 10 μs or more, and to provide additional protection. In addition, a second set of arresters on the overhead lines in front of the machine station or at an overhead line-cable junction point may be applied.

NOTE Besides limiting the overvoltages entering the machine station, the arresters on the overhead line cause lower discharge currents through the arresters at the machine. The resulting lower residual voltages of these machine arresters provide an additional protection of the machine.

The characteristics of the surge arresters are selected according to section 2 or section 3 and the impulse strength of the insulation or the value recommended by the manufacturer is compared with the protection level of the arrester. Generally, only small margins between protective levels and withstand voltages are achievable.

Machines connected to overhead lines through transformers may not require arrester protection in addition to the transformer protection, if the machine is connected by sufficiently long cables, or if capacitors of the values mentioned above are installed. If a breaker is installed between the transformer and the rotating machine, the capacitors should be installed at the transformer terminals (generator winding).

For machines connected to star-delta transformers, improved protection can be achieved by additional phase-to-phase arresters. Arresters installed at the machine or at the machine side of the transformer are not subjected to high lightning currents. Therefore, low protection levels can be achieved with low sparkover voltages (in case of gapped arresters) and low residual voltages at discharge currents of 500 A or less.

Large turbogenerators have low surge impedances and single-phase enclosed busbars and short circuits between phases must be avoided. Surge arresters should not be installed phase-to-phase. Sufficient protection may be achieved by the arresters at the transformer high-voltage side.

5.4 Further special applications of surge arresters

Selection and installation of surge arresters for protection of the following apparatus are to be adapted to the special requirements of the equipment as determined between user and manufacturer of the apparatus to be protected:

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

– Il convient de mettre à la terre les gaines de câbles aux deux extrémités. Si cela s'avère impossible pour les câbles monophasés du fait de la réduction de leur capacité de transit, il est recommandé que l'extrémité de la gaine du câble non mise à la terre soit protégée par parafoudres. Il convient que la tension assignée de ces parafoudres soit supérieure à la tension induite entre la gaine et la terre pour le courant de défaut maximal. Cela couvre la tension de service permanent nécessaire. Il convient que le courant nominal de décharge soit identique à celui des parafoudres phase-terre au niveau des extrémités de câbles. Il est recommandé que le niveau de protection soit aussi bas que possible, car la tenue de la gaine pendant sa durée de vie n'est pas bien définie et n'est garantie par aucun essai normalisé:
– transformateurs spéciaux, par exemple des enroulements série d'autotransformateurs et des transformateurs de convertisseurs;
– éléments réactifs séries, par exemple des bobines d'inductance de limitation de courant, des bobines haute fréquence et des condensateurs série;
– circuits résonants;
– réseaux de traction en courant alternatif;
– lignes aériennes.

5.5 Parafoudres pour conditions de service anormales

Pour les conditions de service anormales indiquées à l'annexe A de la CEI 60099-1 ou à l'annexe A de la CEI 60099-4, des mesures spéciales sont requises dans la conception et l'utilisation des parafoudres et il convient de signaler ces conditions au constructeur.

Parmi ces conditions particulières, on notera, par exemple:

– les altitudes dépassant 1 000 m;
– les températures en dehors de la gamme –40 °C à +40 °C;
– le lavage sous tension des parafoudres;
– des vents soufflant à une vitesse élevée;
– les tremblements de terre;
– des distances réduites aux surfaces conductrices voisines.

Section 6: Indicateurs de diagnostic sur site de parafoudres à oxyde de zinc

6.1 Généralités

Sauf lors des brèves occasions où un parafoudre fonctionne comme un dispositif de limitation des surtensions, il est censé se comporter comme un isolateur. Les propriétés d'isolation sont essentielles pour la durée de vie du parafoudre et pour la fiabilité d'exploitation du réseau électrique.

Des méthodes variées de diagnostic et des indicateurs permettant de révéler une éventuelle détérioration ou défaillance des propriétés isolantes ont été utilisés depuis l'introduction des parafoudres. Les méthodes de diagnostic vont des indicateurs de défaut et des dispositifs de déconnexion pour l'indication de défaillances totales des parafoudres jusqu'aux équipements capables de mesurer de faibles changements du courant de fuite résistif ou des pertes actives des parafoudres à oxyde de zinc.

Le but de cette section est de fournir des indications à l'exploitant si l'utilisation d'une méthode de diagnostic est envisagée et de passer en revue les méthodes de diagnostic classiques. Elle présente également une information détaillée sur les mesures du courant de fuite des parafoudres à oxyde de zinc.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

– Cable sheaths should be earthed at both terminals. If this is not possible for single- phase cables due to the reduction of the cable load capability, the unearthed cable sheath end should be protected by surge arresters. The rated voltage of these arresters should be higher than the induced sheath-to-earth voltage at maximum fault current. This covers the required continuous operating voltage. The nominal discharge current should be the same as that of the phase-to-earth arresters at the cable terminals. The protection level should be as low as possible, because the withstand strength of the sheath during its service life is not well defined and is not assured by any standardized test;
– special transformers, e.g. series windings of autotransformers and converter transformers;
– series reactors, e.g. current limiting reactors, high frequency reactors and series capacitors;
– resonant circuits;
– a.c. traction systems;
– overhead lines.

5.5 Surge arresters for abnormal service conditions

For abnormal service conditions mentioned in annex A of IEC 60099-1 or in annex A of IEC 60099-4, special considerations in the design or in the application of surge arresters are needed and should be called to the attention of the manufacturer.

Examples for such conditions are:

– altitudes above 1 000 m;
– temperatures outside the range -40 °C to 40 °C;
– live washing of surge arresters;
– high wind forces;
– earthquakes;
– limitation of clearances to conducting surfaces.

Section 6: Diagnostic indicators of metal-oxide surge arresters in service

6.1 General

Apart from brief occasions when a surge arrester is functioning as an overvoltage-limiting device, it is expected to behave as an insulator. The insulating properties are essential for the length of life of the arrester and for the operation reliability of the power system.

Various diagnostic methods and indicators for revealing possible deterioration or failure of the insulating properties have been utilized since the introduction of surge arresters. The diagnostic methods range from fault indicators and disconnectors for indication of complete arrester failures, to instruments that are able to measure slight changes in the resistive leakage current or the power loss of metal-oxide arresters.

The aim of this section is to provide guidance to the user if use of any diagnostic method is considered, and to present an overview of common diagnostic methods. It also gives detailed information about leakage current measurements on metal-oxide arresters.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

NOTE 1 Il convient que les équipements de diagnostic soient conçus et mis en oeuvre de façon à garantir la sécurité individuelle lors des mesures. Il convient que les équipements installés en permanence soient conçus et installés en prenant en compte les contraintes d'exploitation et de courant de défaut.

NOTE 2 Pour plusieurs méthodes de diagnostic, il est nécessaire de disposer d'une borne de terre isolée sur le parafoudre. Il convient que la connexion de terre ait une tension de tenue suffisamment haute pour prendre en compte la tension inductive apparaissant entre la borne de terre et la structure à la terre lors d'une décharge impulsive.

6.1.1 Indicateurs de défaut

Les indicateurs de défaut donnent une indication visuelle claire d'un parafoudre défectueux, sans déconnecter le parafoudre de la ligne. L'équipement peut être une partie intégrante du parafoudre, ou une unité séparée installée en série avec le parafoudre. Le principe de fonctionnement est généralement basé sur l'amplitude et la durée du courant du parafoudre, ou sur la température des résistances variables à oxyde métallique.

6.1.2 Dispositifs de déconnexion

Les déconnecteurs, souvent utilisés sur les parafoudres à moyenne tension, donnent une indication visuelle d'un parafoudre défectueux en le déconnectant du réseau. Le principe typique de fonctionnement est une charge explosive déclenchée par le courant de défaut; toutefois le déconnecteur n'est pas prévu pour éliminer le courant de défaut. Le déconnecteur peut être un élément intégré au parafoudre ou à la potence d'isolation, ou un élément séparé installé en série avec le parafoudre. L'avantage du dispositif est que la ligne reste sous tension après la déconnexion du parafoudre. L'inconvénient principal est l'absence de protection contre les surtensions jusqu'à ce que le parafoudre défectueux soit découvert et remplacé.

6.1.3 Compteurs de décharges

Les compteurs de décharges sont activés par des impulsions de courant dont l'amplitude est supérieure à un certain niveau, ou pour certaines combinaisons d'amplitude et de durées de courant. Si l'intervalle de temps entre les décharges est très court (inférieur à 50 ms), les compteurs de décharges peuvent ne pas compter tous les chocs de courant. Certains compteurs nécessitent un courant de suite et peuvent ne pas compter les courtes impulsions de courant des parafoudres à oxyde métallique.

Selon le principe de fonctionnement et la sensibilité du compteur, il peut donner une indication sur les surtensions apparaissant sur le réseau, ou il peut fournir des informations sur le nombre de décharges correspondant à une contrainte énergétique significative. Le compteur ne fournit aucune indication spécifique sur l'état du parafoudre.

Pour des raisons de sécurité, le compteur de décharges doit être installé hors d'atteinte facile. Il doit pouvoir être lu depuis le niveau du sol, le parafoudre étant sous tension. Il convient que l'installation soit faite sans augmenter considérablement la longueur de la connexion de terre ou sans réduire sa section. Le parafoudre doit être équipé d'une borne de terre isolée et d'un conducteur entre le parafoudre et le compteur isolé de la terre.

6.1.4 Eclateurs de surveillance

Les éclateurs de surveillance servent à indiquer le nombre et à évaluer l'amplitude et la durée des courants de décharge à travers le parafoudre. Une expérience approfondie est nécessaire pour interpréter correctement les marques sur l'éclateur. Il est possible d'examiner certains éclateurs alors que le parafoudre est sous tension alors que pour d'autres types, il faut d'abord déconnecter le parafoudre. Le parafoudre doit être équipé d'une borne de terre isolée. En alternative, le dispositif peut être un élément intégré au parafoudre. Les éclateurs ne donnent pas d'informations directes sur l'état réel du parafoudre, toutefois ils aident à prendre des décisions pour le laisser ou non en fonctionnement.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

NOTE 1 Diagnostic devices should be designed and handled in order to provide personal safety during measurement. Permanently installed devices should be designed and installed with the operational and short-circuit stresses taken into consideration.

NOTE 2 For several diagnostic methods, an insulated earth terminal is required on the arrester. The earth terminal should have a sufficiently high withstand voltage level to account for the inductive voltage drop appearing between the terminal and the earthed structure during an impulse discharge.

6.1.1 Fault indicators

Fault indicators give a clear visual indication of a failed arrester, without disconnecting the arrester from the line. The device may be an integrated part of the arrester, or a separate unit installed in series with the arrester. The working principle is usually based on the amplitude and duration of the arrester current, or on the temperature of the non-linear metal-oxide resistors.

6.1.2 Disconnectors

Disconnectors, often used on medium-voltage arresters, give a visual indication of a failed arrester by disconnecting it from the system. The typical working principle is an explosive device triggered by the fault current; however, the disconnector is not intended to extinguish the fault current. The disconnector may be an integral part of the arrester or insulating bracket, or a separate unit installed in series with the arrester. The advantage of the device is that the line remains in operation after disconnection of the arrester. The major disadvantage is the lack of overvoltage protection until the failed arrester has been discovered and replaced.

6.1.3 Surge counters

Surge counters operate at impulse currents above a certain amplitude, or above certain combinations of current amplitude and duration. If the interval between discharges is very short (less than 50 ms), surge counters may not count every current impulse. Some counters require power follow current and may not count the short impulse currents through metal-oxide arresters.

Depending on the operating principle and sensitivity of the counter, it may give an indication about overvoltages appearing in the system, or it may provide information on the number of discharges corresponding to significant arrester energy stresses. The counter provides no specific information about the condition of the arrester.

For safety reasons, the surge counter should be installed beyond easy reach of personnel, It shall be located where it can be read from ground level with the arrester in service. The installation should be done without considerably lengthening the earth connection or reducing its cross-section. The arrester shall be equipped with an insulated earth terminal and a conductor between the arrester and counter that is insulated from earth.

6.1.4 Monitoring spark gaps

Monitoring spark gaps are used to indicate the number and estimate the amplitude and duration of discharge currents through the arrester. Special experience is necessary to properly interpret the marks on the gap. Some spark gaps can be examined with the arrester in service, while other types require that the arrester is de-energized. It is required that the arrester be equipped with an insulated earth terminal. Alternatively, the device may be an integrated part of the arrester. Spark gaps give no direct information about the actual condition of the arrester, but may help to make decisions about continued operation.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

6.1.5 Mesure des températures

La mesure à distance de la température du parafoudre peut être effectuée avec des méthodes à image thermique. Les mesures sont strictement indicatives quant à l'état du parafoudre, étant donné que l'écart de température entre les varistances et la surface de l'enveloppe peut être significatif. Néanmoins, des mesures comparatives effectuées sur des parafoudres adjacents ou des unités de parafoudres peuvent indiquer un échauffement excessif.

Des mesures directes de la température de la varistance à oxyde métallique fournissent une indication précise sur l'état du parafoudre, mais dans ce cas, le parafoudre doit être équipé de transducteurs spéciaux au moment de sa fabrication. Par conséquent, cette méthode n'est utilisée que dans des applications spéciales de parafoudre.

6.1.6 Mesure du courant de fuite des parafoudres à oxyde de zinc

Toute détérioration des propriétés d'isolation d'un parafoudre à oxyde de zinc entraîne une augmentation du courant de fuite résistif ou des pertes actives à des valeurs données de tension et de température. La plupart des méthodes de diagnostic pour déterminer l'état des parafoudres à oxyde de zinc sans éclateurs sont basées sur les mesures du courant de fuite.

On peut classer les procédures de mesure en deux catégories: les mesures en réseau, lorsque le parafoudre est relié au réseau et qu'il est mis sous tension à partir du réseau pendant l'exploitation normale, et les mesures hors réseau, lorsque le parafoudre est déconnecté du réseau et qu'il est mis sous tension avec une source d'alimentation séparée sur site ou dans un laboratoire.

Les mesures hors réseau peuvent être effectuées avec des sources d'alimentation spécialement adaptées à cet effet, par exemple des générateurs d'essai mobiles, continus ou alternatifs. On peut obtenir une précision satisfaisante en utilisant les méthodes hors réseau, à condition d'utiliser une tension d'essai suffisamment élevée. Les principaux inconvénients de cette méthode sont le coût de l'équipement et la nécessité de déconnecter le parafoudre du réseau.

Les mesures effectuées en réseau sous la tension normale de réseau représentent la méthode la plus commune. Pour des raisons pratiques et de sécurité, on ne peut normalement accéder au courant de fuite qu'à l'extrémité du parafoudre mise à terre. Pour pouvoir mesurer le courant de fuite qui passe dans la connexion de terre, il faut que le parafoudre soit équipé d'une borne de mise à la terre isolée.

NOTE Il faut que l'isolation de la borne de terre, même après une dégradation à long terme, suffise à empêcher des courants circulants causés par une induction électromagnétique, car ces courants peuvent influencer la mesure du courant de fuite.

Les mesures en réseau du courant de fuite sont généralement effectuées de manière temporaire en utilisant des instruments portables ou installés de façon permanente. Les instruments portables sont généralement reliés à la borne de terre du parafoudre au moyen d'une pince ou sont des transformateurs de tension installés en permanence. Des mesures à long terme du courant de fuite peuvent s'avérer nécessaires pour des analyses plus approfondies, en particulier si des changements significatifs de l'état d'un parafoudre sont relevés par des mesures provisoires. Les mesures à distance peuvent être effectuées par des systèmes informatisés de surveillance de l'équipement du poste.

6.1.6.1 Propriétés du courant de fuite des résistances variables à oxyde métallique

Le courant de fuite alternatif peut être divisé en deux parties: une partie capacitive et une partie résistive, avec une composante capacitive prédominante et une partie résistive beaucoup plus réduite. Cette différence est visible sur la figure 3, qui représente une mesure typique de laboratoire du courant de fuite d'une résistance variable à oxyde métallique lorsqu'elle est sous tension, à une tension égale à U_C pour un parafoudre complet.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

6.1.5 Temperature measurements

Remote measurement of the arrester temperature can be carried out by means of thermal imaging methods. The measurements are only indicative with regard to the condition of the arrester, since the temperature drop between the resistors and the housing surface may be substantial. Nevertheless, comparative measurements made on adjacent arresters or arrester units may indicate excessive heating.

Direct measurements of the metal-oxide resistor temperature give an accurate indication of the condition of the arrester, but require that the arrester be equipped with special transducers at the time of manufacturing. Therefore, this method is used only in special arrester applications.

6.1.6 Leakage current measurements of metal-oxide arresters

Any deterioration of the insulating properties of a metal-oxide arrester will cause an increase in the resistive leakage current or power loss at given values of voltage and temperature. The majority of diagnostic methods for determining the condition of gapless metal-oxide arresters are based on measurements of the leakage current.

The measuring procedures can be divided into two groups: on-line measurements, when the arrester is connected to the system and energized with the service voltage during normal operation, and off-line measurements, when the arrester is disconnected from the system and energized with a separate voltage source on site or in a laboratory.

Measurements off-line can be made with voltage sources that are specially suited for the purpose, e.g. mobile a.c. or d.c. test generators. Good accuracy may be obtained by using the off-line methods, provided that a sufficiently high test voltage is used. The major disadvantages are the cost of the equipment and the need for disconnecting the arrester from the system.

Measurements carried out on-line under normal service voltage is the most common method. For practical and safety reasons, the leakage current is normally accessed only at the earthed end of the arrester. To allow measurements of the leakage current flowing in the earth connection, the arrester must be equipped with an insulated earth terminal.

NOTE The insulation of the earth terminal must, also after long-term degradation, be sufficient to prevent circulating currents caused by electromagnetic induction, since these currents may interfere with the measurement of the leakage current.

On-line leakage current measurements are usually made on a temporary basis using portable or permanently installed instruments. Portable instruments are usually connected to the earth terminal of the arrester by means of a clip-on, or permanently installed, current transformer. Long-term measurements of the leakage current may be necessary for closer investigations, especially if significant changes in the condition of an arrester are revealed by temporary measurements. Remote measurements may be implemented in computerized systems for supervision of substation equipment.

6.1.6.1 Properties of the leakage current of non-linear metal-oxide resistors

The a.c. leakage current can be divided into a capacitive and a resistive part, with a predominant capacitive component and a significantly smaller resistive part. This can be seen in figure 3, which shows a typical laboratory measurement of the leakage current of a single non-linear metal-oxide resistor when energized at a voltage equivalent to U_C for the complete arrester.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

La figure 4 indique les résultats des mesures du courant de fuite effectuées sur deux parafoudres différents fonctionnant à des niveaux de tension légèrement inférieurs à U_C. La figure 4 montre également l'influence des différents niveaux de contenu harmonique dans la tension de réseau.

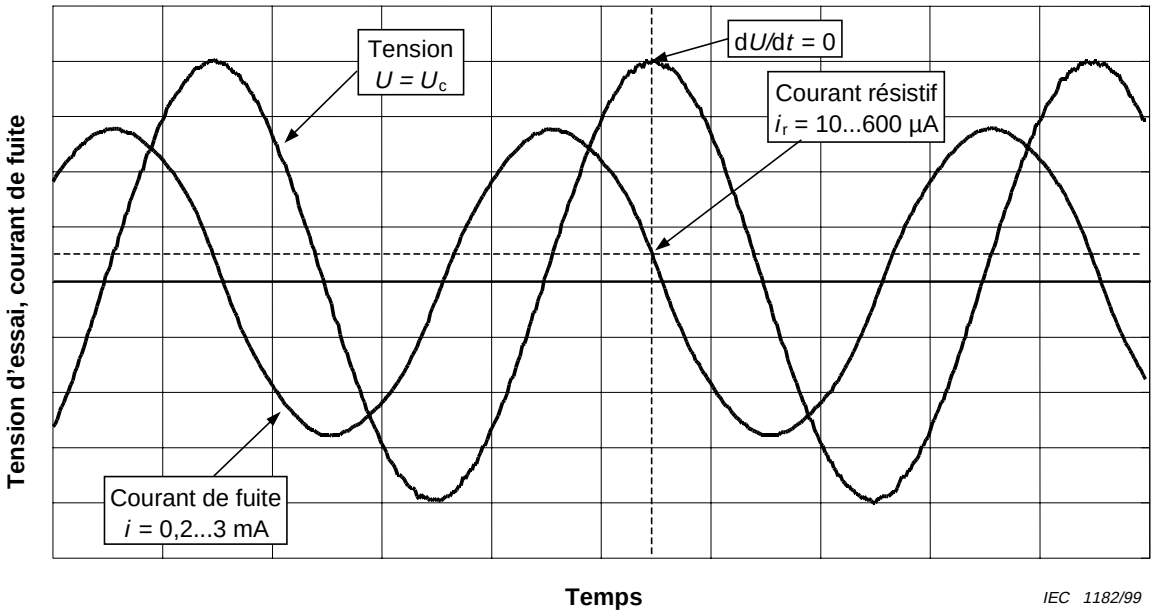


Figure 3 – Courant de fuite typique d'une résistance variable à oxyde métallique dans des conditions de laboratoire

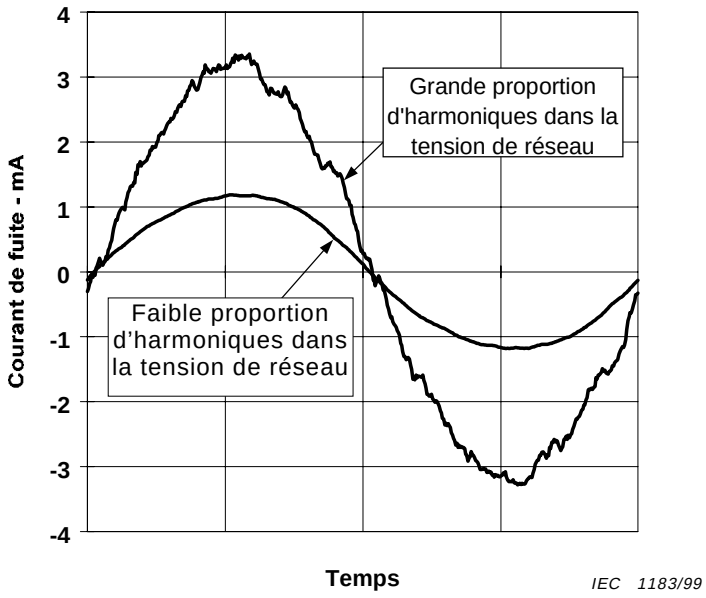


Figure 4 – Courants de fuite typiques de parafoudres en service

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

In figure 4 are shown the results of leakage current measurements carried out on two different arresters in service at voltage levels slightly below U_c. Figure 4 also illustrates the influence of different levels of harmonic content in the system voltage.

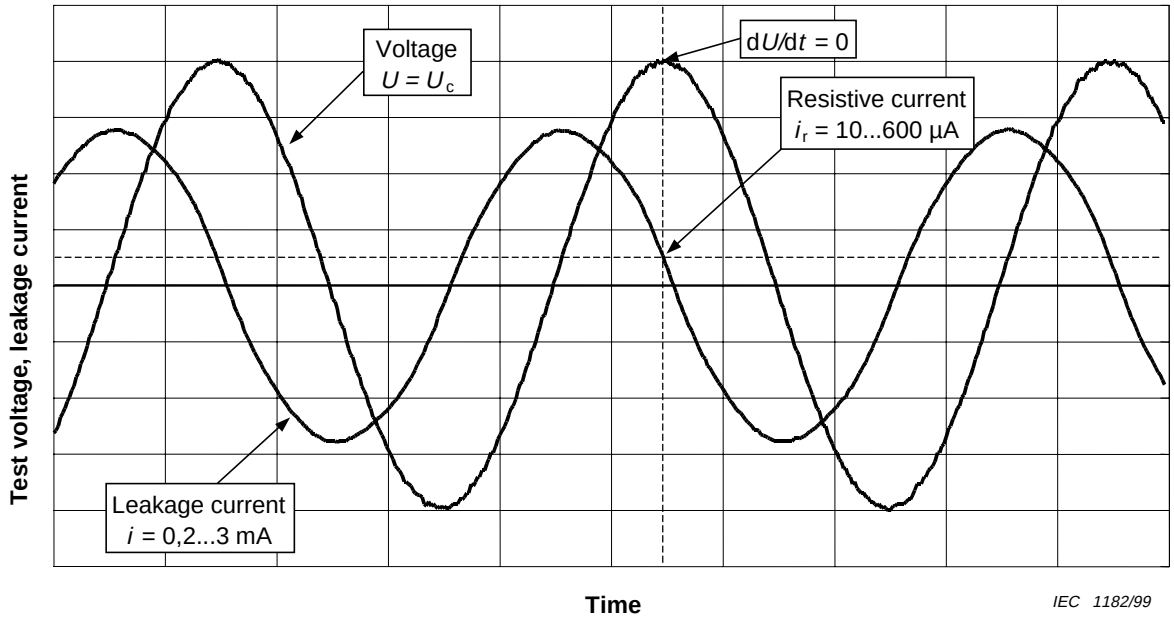


Figure 3 – Typical leakage current of a non-linear metal-oxide resistor in laboratory conditions

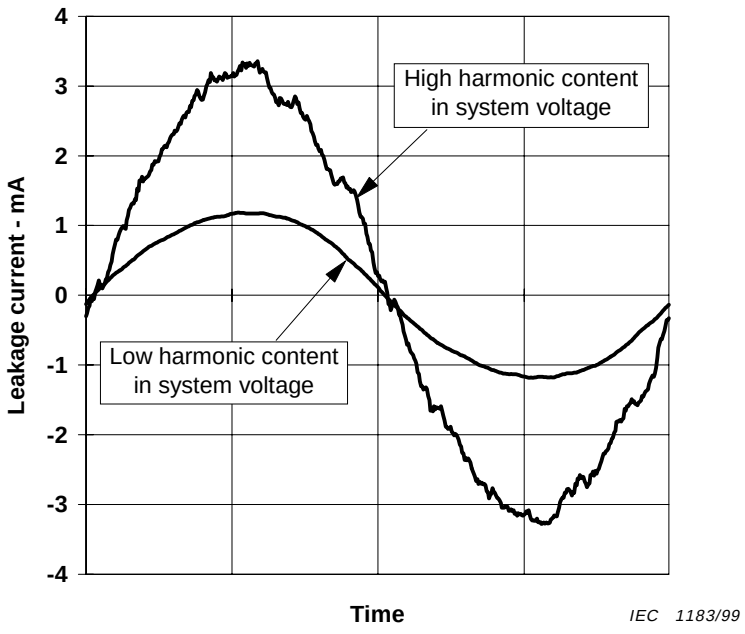


Figure 4 – Typical leakage currents of arresters in service conditions

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---
Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

6.1.6.1.1 Courant de fuite capacitif

Le courant de fuite capacitif mesuré à la borne de terre d'un parafoudre est provoqué par la permittivité des résistances variables à oxyde métallique, les capacités parasites et les condensateurs de répartition de tension, s'ils sont utilisés. La capacité spécifique d'un élément de résistance variable est généralement de 60 pF.kV/cm^2 à 150 pF.kV/cm^2 (tension assignée), ce qui produit un courant de fuite capacitif de valeur crête d'environ 0,2 mA à 3 mA dans des conditions d'exploitation normales.

Il n'est pas prouvé que le courant capacitif change de façon significative sous l'action de la détérioration de la caractéristique tension-courant d'une résistance variable à oxyde métallique. Par conséquent, il est improbable que des mesures du courant capacitif puissent indiquer l'état des parafoudres à oxyde métallique.

6.1.6.1.2 Courant de fuite résistif

A certaines valeurs de tension et de température, la composante résistive du courant de fuite devient un indicateur sensible des changements de la caractéristique tension-courant des résistances variables à oxyde métallique. Le courant résistif peut par conséquent être utilisé comme outil de diagnostic pour relever les changements de l'état des parafoudres à oxyde de zinc sous tension. Les caractéristiques générales tension-courant résistif et capacitif pour des tensions alternatives sont indiquées à la figure 5. A titre de comparaison, les caractéristiques générales pour les tensions continues sont également indiquées à la figure 5.

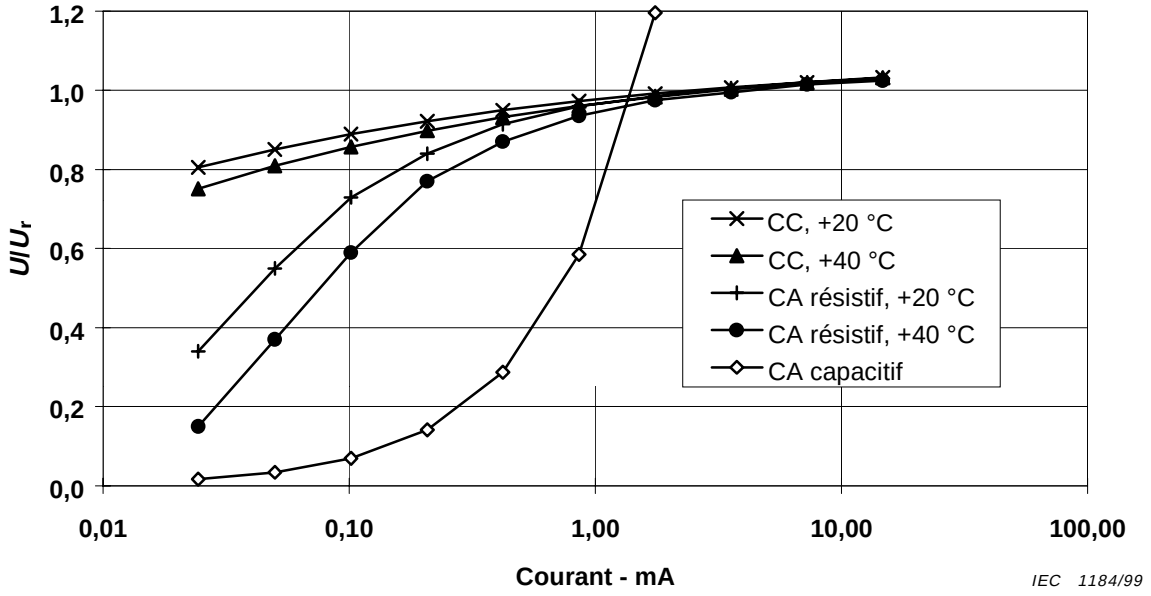


Figure 5 – Caractéristiques tension-courant typiques de résistances variables à oxyde métallique

La composante résistive sous tension alternative est définie comme le niveau de courant au moment de la crête de tension (dU/dt = 0), comme l'indique la figure 3. Le courant de fuite résistif d'une résistance variable à oxyde métallique est de l'ordre de 5 % à 20 % du courant capacitif en conditions d'exploitation normales, ce qui correspond à un courant résistif de valeur crête d'environ 10 µA à 600 µA à une température de +20 °C.

Dans la région du courant de fuite, le courant résistif dépend de la tension et de la température. Les valeurs typiques des dépendances de tension et de température sous tension alternative sont indiquées aux figures 6 et 7, et sont respectivement normées à U_c et à +20 °C.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

6.1.6.1.1 Capacitive leakage current

The capacitive leakage current measured at the earth terminal of an arrester is caused by the permittivity of the non-linear metal-oxide resistors, the stray capacitances and the grading capacitors, if applied. The specific capacitance of a resistor element is typically 60 pF.kV/cm^2 to 150 pF.kV/cm^2 (rated voltage), resulting in a capacitive peak leakage current of about 0,2 mA to 3 mA under normal service conditions.

There is no evidence that the capacitive current would change significantly due to deterioration of the voltage-current characteristic of the non-linear metal-oxide resistors. Therefore, it is unlikely that measurements of capacitive current can reliably indicate the condition of metal-oxide arresters.

6.1.6.1.2 Resistive leakage current

At given values of voltage and temperature, the resistive component of the leakage current is a sensitive indicator of changes in the voltage-current characteristic of non-linear metal-oxide resistors. The resistive current can, therefore, be used as a tool for diagnostic indication of changes in the condition of metal-oxide arresters in service. Typical resistive and capacitive voltage-current characteristics for a.c. voltages are shown in figure 5. For comparison, typical characteristics for d.c. voltages are also shown in figure 5.

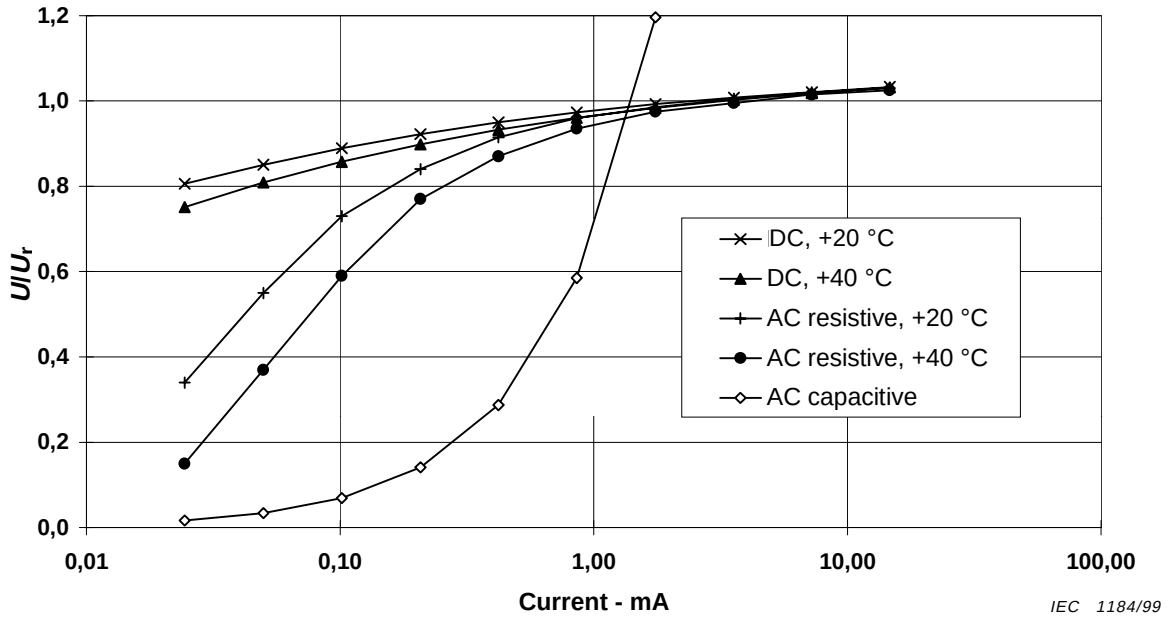


Figure 5 – Typical voltage-current characteristics for non-linear metal-oxide resistors

The resistive component under a.c. voltage is defined as the current level at the instant of voltage maximum (dU/dt = 0), as indicated in figure 3. The resistive leakage current of a non-linear metal-oxide resistor is in the order of 5 % to 20 % of the capacitive current under normal operating conditions, corresponding to about 10 µA to 600 µA peak resistive current at a temperature of +20 °C.

In the leakage current region, the resistive current depends on the voltage and temperature. Typical values of voltage and temperature dependencies under a.c. voltage are indicated in figures 6 and 7, normalized to U_c and at +20 °C, respectively.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

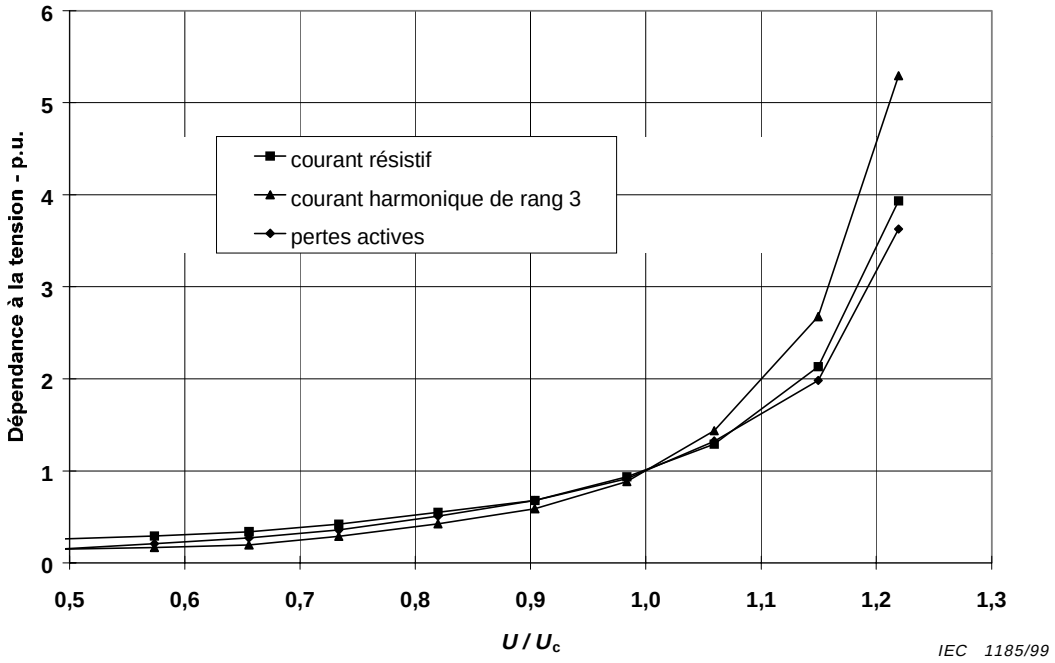


Figure 6 – Dépendance normée typique à la tension à +20 °C

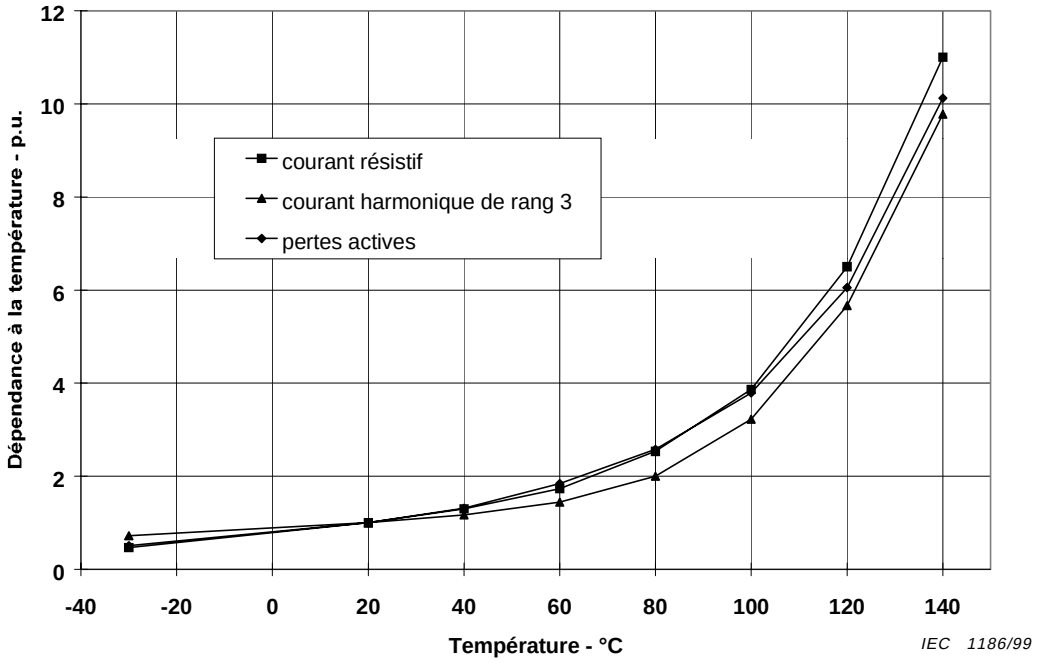


Figure 7 – Dépendance normée typique à la température à U_c

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

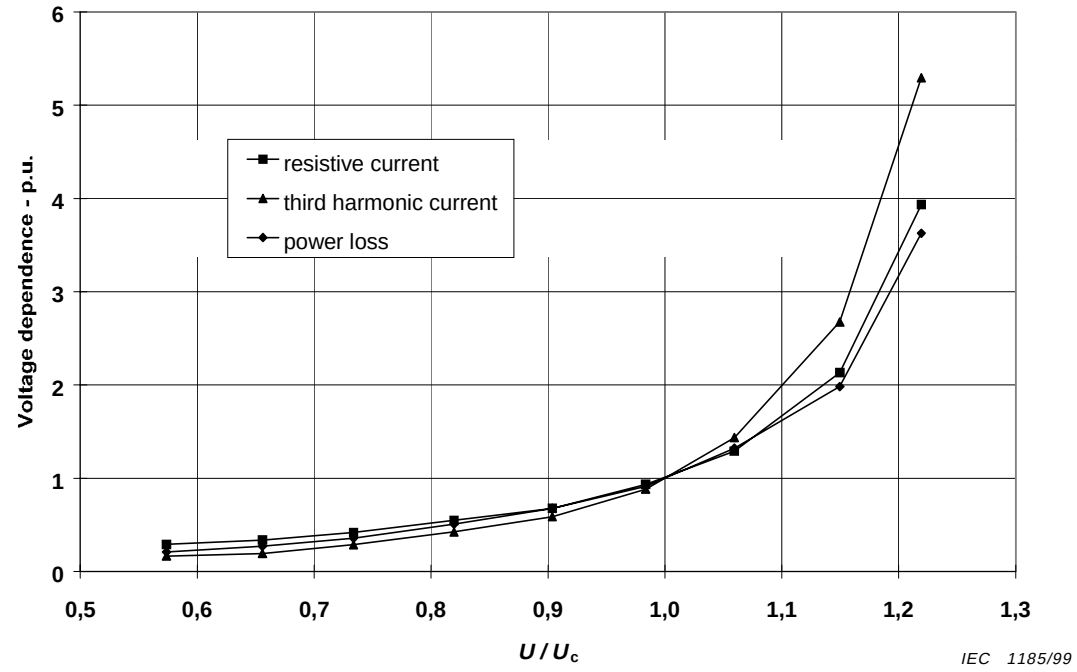


Figure 6 – Typical normalized voltage dependence at +20 °C

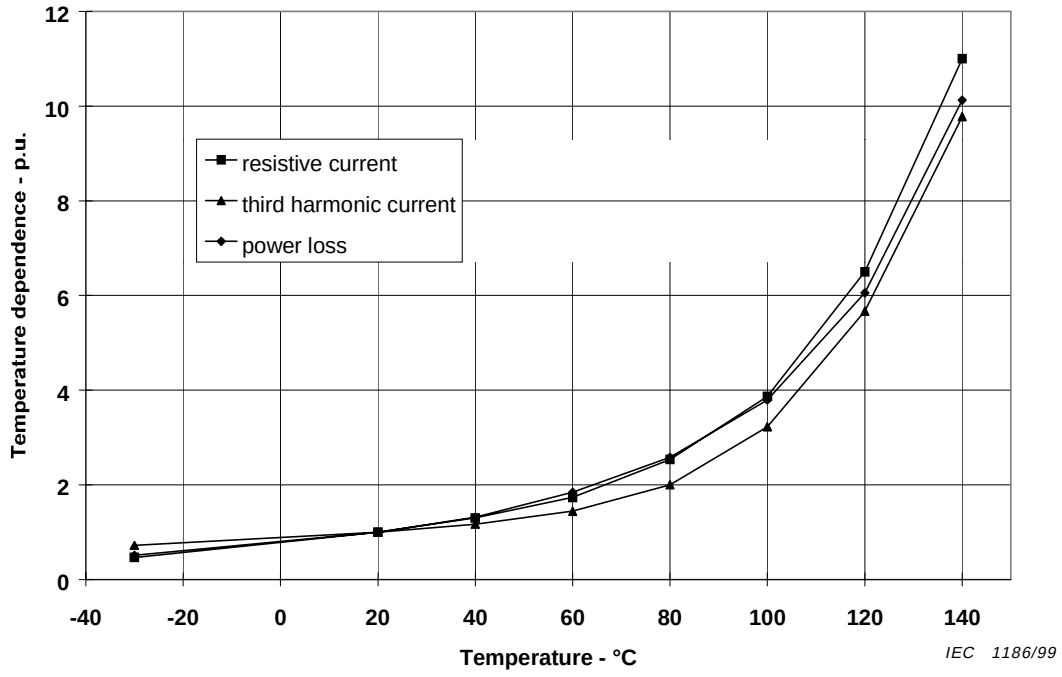


Figure 7 – Typical normalized temperature dependence at U_c

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

La distribution de la tension le long d'un parafoudre peut être irrégulière, principalement à cause de l'influence des capacités parasites vers la terre et vers des équipements voisins. La tension des résistances variables à oxyde métallique à l'extrémité du parafoudre mise à la terre, peut donc dévier, tant en amplitude qu'en phase, par rapport à la valeur moyenne le long du parafoudre. Ce phénomène influence la mesure du courant de fuite résistif de deux façons: premièrement, le courant résistif mesuré à la borne de terre dépend de l'amplitude de la tension aux bornes des résistances variables à oxyde métallique à l'extrémité mise à la terre, par conséquent le courant résistif mesuré peut être différent du courant résistif moyen le long du parafoudre; deuxièmement, le déphasage de la tension aux bornes des résistances variables à oxyde métallique à l'extrémité mise à la terre influence le résultat de la mesure du courant résistif, pour les méthodes utilisant la tension à travers le parafoudre complet comme référence pour l'angle de phase.

Un autre phénomène similaire, susceptible d'influencer la mesure du courant résistif en utilisant certaines méthodes, est le courant capacitif induit dans le conducteur de terre du parafoudre par les phases adjacentes.

6.1.6.1.3 Harmoniques dans le courant de fuite

La caractéristique tension-courant non linéaire d'un parafoudre à oxyde métallique donne naissance à des harmoniques dans le courant de fuite, lorsque le parafoudre est sous tension sinusoïdale. Le contenu harmonique dépend de l'amplitude du courant résistif et du degré de non-linéarité, qui est fonction de la tension et de la température. Par exemple, le contenu du troisième harmonique du courant résistif est généralement de 10 % à 40 %. Le contenu harmonique peut donc être utilisé comme indicateur du courant résistif. Les valeurs typiques des variations de tension et de température de la composante du troisième harmonique sont indiquées aux figures 6 et 7.

Une autre source d'harmoniques pouvant considérablement influencer leur mesure dans le courant de fuite, en plus de celles qui sont négligeables, est le contenu harmonique de la tension de réseau. Les courants harmoniques capacitifs produits par les harmoniques de tension peuvent avoir le même ordre de grandeur que les courants harmoniques créés par la résistance non linéaire du parafoudre. La figure 4 illustre un exemple d'harmoniques dans le courant de fuite, provoqués par les harmoniques de la tension de réseau.

6.1.6.1.4 Pertes actives

Les pertes actives peuvent être utilisées pour l'indication de diagnostic des parafoudres, de la même façon que le courant de fuite résistif. Les valeurs typiques des pertes actives sont de l'ordre de 5 mW/kV à 300 mW/kV (tension assignée) à U_c et +20 °C. Les dépendances à la température et à la tension sont pratiquement identiques à celles du courant résistif, comme l'indiquent les figures 6 et 7.

6.1.6.2 Courant de fuite superficiel

Comme c'est le cas avec tout isolateur extérieur, un courant de fuite superficiel extérieur peut apparaître temporairement sur l'enveloppe du parafoudre en cas de pluie ou d'humidité élevée, associées à la pollution superficielle. En outre, un courant de fuite superficiel intérieur peut apparaître, suite à la pénétration d'humidité. Lors des mesures, le courant de surface peut interférer avec le courant de fuite des résistances variables, toutefois la sensibilité aux courants superficiels intérieur et extérieur peut être différente selon les différentes méthodes de mesure. Il est possible d'éviter l'influence du courant de fuite superficiel extérieur, soit en effectuant les mesures dans des conditions sèches, ou à l'aide d'une autre méthode, par exemple en dérivant le courant superficiel à la terre.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

The voltage distribution along an arrester may be uneven, primarily due to the influence of stray capacitances to earth and to adjacent equipment. The voltage across the non-linear metal-oxide resistors at the earthed end of the arrester may, therefore, deviate in both magnitude and phase from the average value along the arrester. This phenomenon affects the measurement of the resistive leakage current in two ways: First, the resistive current measured in the earth connection depends on the magnitude of the voltage across the non-linear metal-oxide resistors at the earthed end, therefore, the measured resistive current may differ from the average resistive current along the arrester. Secondly, the phase shift of the voltage across the non-linear metal-oxide resistors at the earthed end influences the result of resistive current measurement for methods that are using the voltage across the complete arrester as a reference for the phase angle.

Another similar phenomenon that may influence the measurement of the resistive current when using certain methods, is the capacitive current induced in the earth lead of the arrester by the adjacent phases.

6.1.6.1.3 Harmonics in the leakage current

The non-linear voltage-current characteristic of a metal-oxide arrester gives rise to harmonics in the leakage current when the arrester is energized with a sinusoidal voltage. The harmonic content depends on the magnitude of the resistive current and the degree of non-linearity, which is a function of voltage and temperature. As an example, the third harmonic content of the resistive current is typically 10 % to 40 %. The harmonic content can, therefore, be used as an indicator of the resistive current. Typical values of the variations with voltage and temperature of the third order harmonic component are shown in figures 6 and 7.

Another source of harmonics, beside negligible ones, that may considerably influence the measurement of harmonics in the leakage current, is the harmonic content in the system voltage. The capacitive harmonic currents produced by the voltage harmonics may be of the same order of magnitude as the harmonic currents created by the non-linear resistance of the arrester. An example of harmonics in the leakage current caused by system voltage harmonics is seen in figure 4.

6.1.6.1.4 Power loss

The power loss may be used for diagnostic indication of arresters in the same way as the resistive leakage current. Typical values of power losses are 5 mW/kV to 300 mW/kV (rated voltage) at U_c and +20 °C. The temperature and voltage dependencies are practically the same as for the resistive current, as seen in figures 6 and 7.

6.1.6.2 Surface leakage current

As with any other outdoor insulator, external surface leakage current may temporarily occur on the arrester housing in rain or in conditions of high humidity combined with surface pollution. In addition, internal surface leakage current may appear due to moisture penetration. During measurements, the surface currents may interfere with the leakage current of the resistors, however, the sensitivity to external and internal surface currents may be different for the various measurement methods. The influence of the external surface leakage current can be avoided, either by performing the measurements in dry conditions, or by any other suitable method, e.g. bypassing the surface leakage current to ground.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

6.2 Mesure du courant de fuite total

Le courant de fuite total dépend principalement du courant capacitif, étant donné que la partie résistive n'est qu'une fraction de la composante capacitive du courant. Par ailleurs, les composantes ont une différence de 90° en phase, par conséquent une augmentation importante dans le courant résistif des varistances à oxyde métallique est nécessaire avant de constater un changement sensible du niveau du courant de fuite total. De plus, le courant de fuite total est sensible à l'installation, étant donné que le courant capacitif dépend des capacités parasites.

Les mesures en réseau du courant de fuite total sont beaucoup utilisées en pratique, à l'aide d'ampèremètres traditionnels incorporés aux compteurs de décharges, ou à l'aide d'instruments portables indiquant, dans les deux cas, l'intensité efficace, la valeur crête ou la valeur moyenne du courant de fuite total.

La sensibilité de la valeur efficace, moyenne et crête du courant de fuite total aux variations du courant résistif est illustrée dans la figure 8. Etant donnée la faible sensibilité aux changements du niveau du courant résistif, la mesure du courant de fuite total n'est pas adéquate comme indicateur de diagnostic que si le courant résistif est du même ordre de grandeur que le courant capacitif.

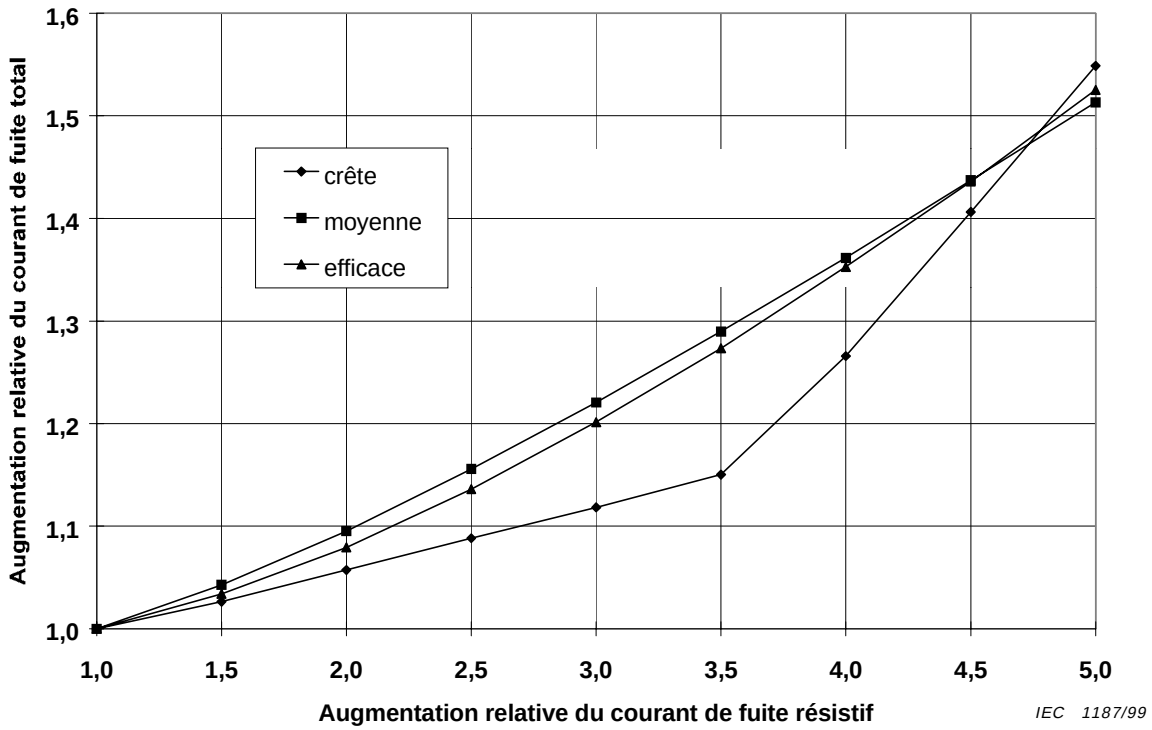


Figure 8 – Influence sur le courant de fuite total de l'augmentation du courant de fuite résistif

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

6.2 Measurement of the total leakage current

The total leakage current depends mainly on the capacitive current, since the resistive part is only a fraction of the capacitive current component. Furthermore, the capacitive and resistive current components differ in phase by 90°; therefore, a large increase in the resistive current of the non-linear metal-oxide resistors is needed before a significant change can be noticed in the total leakage current level. In addition, the total leakage current is sensitive to the installation, since the capacitive current depends on the stray capacitances.

On-line measurements of the total leakage current are extensively used in practice by means of conventional mA-meters built into the surge counters or into portable instruments, showing the r.m.s., mean or peak value of the total leakage current.

The sensitivity of the r.m.s, mean, and peak values of the total leakage current to variations in the resistive current is illustrated in figure 8. The low sensitivity to changes in the resistive current level makes the measurement of total leakage current suitable as a diagnostic indicator only in the rare cases when the resistive current is in the same range as the capacitive current.

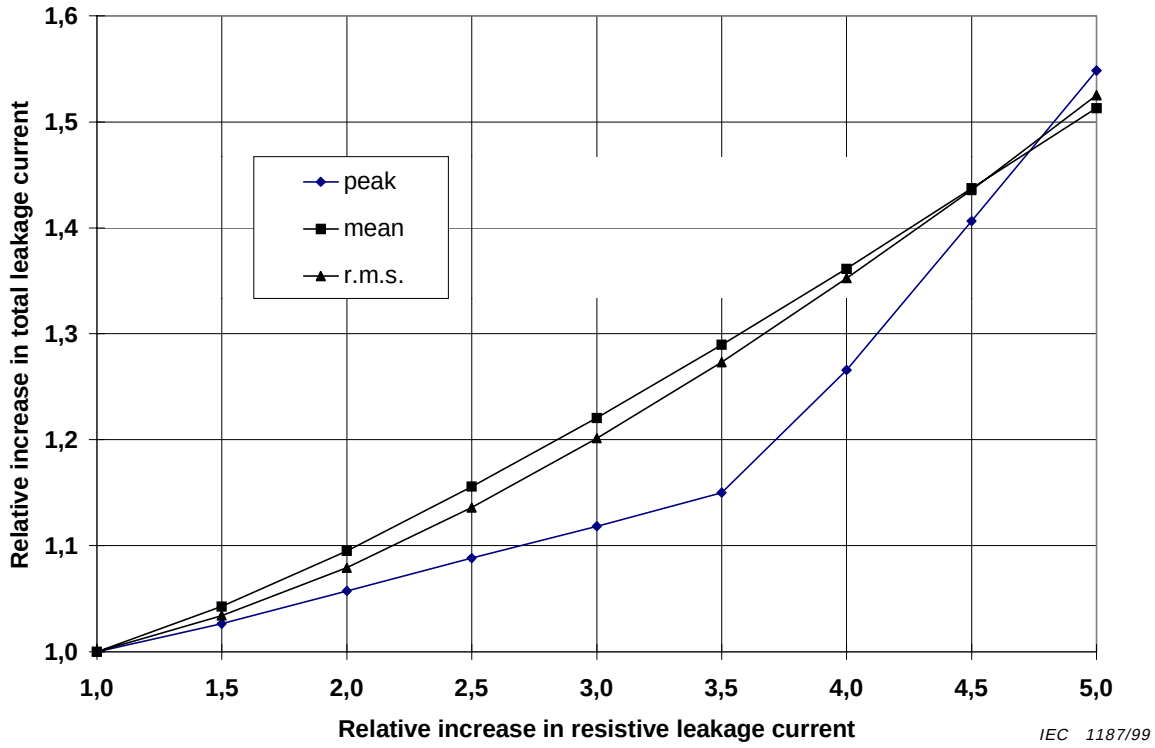


Figure 8 – Influence on total leakage current by increase in resistive leakage current

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

6.3 Mesure du courant de fuite résistif ou des pertes actives

La partie résistive du courant de fuite ou les pertes actives peuvent être déterminés à l'aide de plusieurs méthodes. On peut identifier trois méthodes principales, qui peuvent à leur tour être divisées en plusieurs groupes:

Méthode A: Mesure directe du courant de fuite résistif. Cette méthode peut être divisée en quatre groupes, selon la méthode d'extraction de la composante résistive du courant de fuite:

A1 Utilisation d'un signal de tension comme référence

A2 Compensation de la composante capacitive du courant de fuite par l'utilisation d'un signal de tension

A3 Compensation de la composante capacitive du courant de fuite sans utilisation d'un signal de tension

A4 Compensation des composantes capacitives du courant de fuite par combinaison des courants des trois phases

Méthode B: Détermination indirecte de la composante résistive par l'analyse harmonique du courant de fuite. Cette méthode peut être divisée en trois groupes différents:

B1 Analyse du troisième harmonique du courant de fuite

B2 Analyse du troisième harmonique avec compensation des harmoniques dans la tension de réseau

B3 Analyse de l'harmonique du premier ordre du courant de fuite

Méthode C: Détermination directe des pertes actives.

6.3.1 Méthode A1 – Utilisation d'un signal de tension comme référence

Cette méthode consiste à utiliser un signal de référence qui représente la tension aux bornes du parafoudre. Le signal de référence peut être utilisé pour la lecture directe de la composante résistive du courant de fuite au moment où la tension est à son maximum ($dU/dt = 0$). La tension et le niveau du courant résistif peuvent être lus avec un oscilloscope ou un dispositif similaire. Cette méthode est généralement utilisée en laboratoire pour déterminer de façon précise le courant résistif, étant donné que le signal de référence est facilement accessible au moyen d'un diviseur de tension ayant un déphasage suffisamment faible (voir figure 4).

En pratique, la précision est principalement limitée par le déphasage du signal de référence et par les déviations de l'amplitude et de la phase de la tension à travers les résistances variables à oxyde métallique à l'extrémité mise à terre du parafoudre, comme exposé en 6.1.6.1.2. La présence d'harmoniques dans la tension peut réduire encore plus la précision de la méthode.

Une restriction, qui s'applique à cette méthode lors de mesures sous tension, est la nécessité du signal de référence. Une connexion temporaire au côté secondaire d'un transformateur de tension ou à la prise de tension capacitive d'une traversée isolée est nécessaire et peut être difficile à obtenir. Les courants capacitifs induits dans la borne de terre du parafoudre par des phases adjacentes risquent de réduire la précision des mesures sous tension, comme exposé en 6.1.6.1.2.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

6.3 Measurement of the resistive leakage current or the power loss

The resistive part of the leakage current or the power loss can be determined using several methods. Three main principles can be identified, which can be further divided into different groups:

Method A: Direct measurement of the resistive leakage current. This method can be divided into four groups depending on the method of extracting the resistive component of the leakage current:

A1 Using a voltage signal as reference

A2 Compensating the capacitive component of the leakage current by using a voltage signal

A3 Compensating the capacitive component of the leakage current without using of a voltage signal

A4 Compensating the capacitive components of the leakage current by combining the currents of the three phases

Method B: Indirect determination of the resistive component by means of harmonic analysis of the leakage current. This method can be divided into three different groups:

B1 Third order harmonic analysis of the leakage current

B2 Third order harmonic analysis with compensation for harmonics in the system voltage

B3 First order harmonic analysis of the leakage current

Method C: Direct determination of the power losses.

6.3.1 Method A1 – Using a voltage signal as reference

The method relies on using a reference signal representing the voltage across the arrester. The reference signal can be used for direct reading of the resistive component of the leakage current at the instant when the voltage is at its peak ($dU/dt = 0$). The voltage and the resistive current level can be read with an oscilloscope or similar device. This method is commonly used in the laboratory for accurate determination of the resistive current since the reference signal is easily accessible through a voltage divider having a sufficiently small phase-shift (see figure 4).

In practice, the accuracy is limited mainly by the phase-shift of the reference signal and by the deviations in magnitude and phase of the voltage across the non-linear metal-oxide resistors at the earthed end of the arrester, as discussed in 6.1.6.1.2. The presence of harmonics in the voltage may further reduce the accuracy of the method.

A restriction on the method during measurements in service is the need for a reference signal. Temporary connection to the secondary side of a potential transformer or to the capacitive tap of a bushing is necessary and may be complicated to obtain. The capacitive currents induced in the earth connection of the arrester by adjacent phases may reduce the accuracy during measurements in service, as discussed in 6.1.6.1.2.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

6.3.2 Méthode A2 – Compensation de la composante capacitive par utilisation d'un signal de tension

En utilisant un signal de tension pour compenser la composante capacitive du courant de fuite, on peut augmenter la sensibilité de la mesure de la composante résistive. Le principe de base est un pont HT dans lequel le bras capacitif-résistif est réglé pour équilibrer la composante capacitive du courant de fuite de sorte que seule la partie résistive non linéaire contribue à la tension de sortie, qui peut alors être étudiée à l'aide d'un oscilloscope.

Le pont est équilibré lorsque la tension est proche de zéro et que le courant capacitif est à son maximum. Puisque la capacité différentielle du parafoudre dépend de la tension (la capacité augmente avec la tension), alors que la capacité du pont est constante, le courant restant après compensation comprend non seulement la composante résistive mais aussi une partie capacitive. Ce phénomène est illustré à la figure 9. Comme pour la méthode A1, la composante résistive réelle est relevée au moment de la crête de tension.

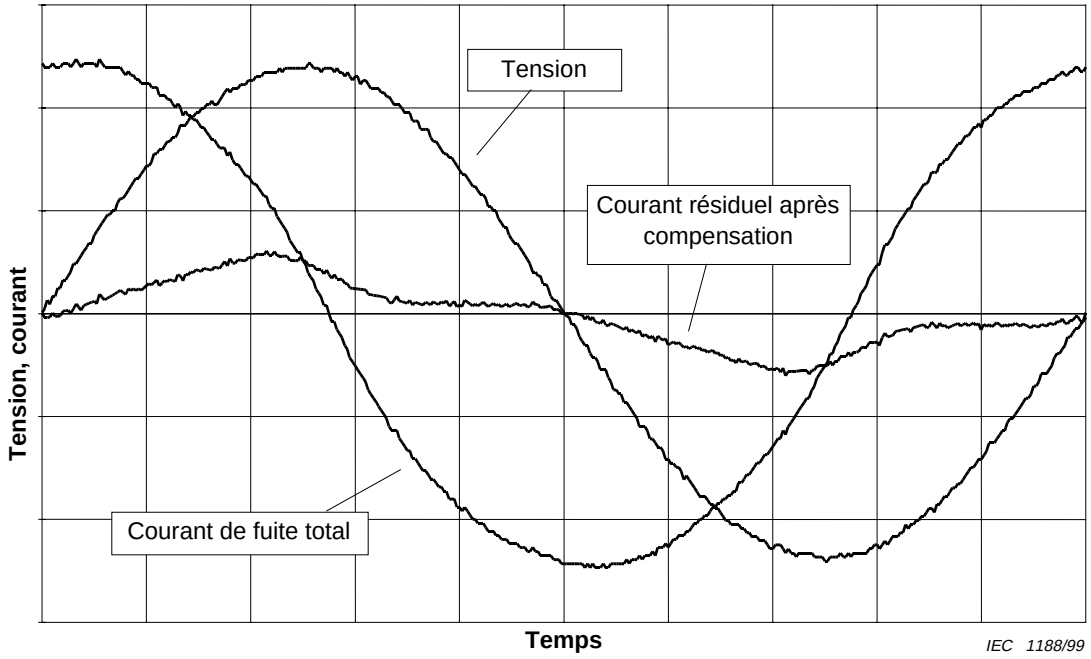


Figure 9 – Courant résiduel après compensation par courant capacitif à U_c

Etant donné que cette méthode nécessite une tension de référence, qui peut être difficile à obtenir sur site, elle comporte les mêmes restrictions que la méthode A1. De même que la méthode A1, la précision peut être réduite par des déphasages des tensions et des courants, provoqués par l'influence des phases adjacentes.

6.3.3 Méthode A3 – Compensation de la composante capacitive sans utiliser de signal de tension

Il s'agit d'une méthode de compensation où la nécessité d'un signal de tension est éliminée. Le principe de base est qu'un signal de référence de fréquence fondamentale est généré de façon synthétique à l'aide d'informations provenant du courant de fuite. En effectuant un réglage approprié de l'amplitude et de l'angle de phase, soit automatiquement soit avec un oscilloscope, le signal de référence peut compenser la composante capacitive du courant de fuite. La méthode peut être mise en application avec différents degrés de sophistication.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

6.3.2 Method A2 – Compensating the capacitive component by using a voltage signal

By using a voltage signal to compensate the leakage current for its capacitive component, the sensitivity in the measurement of the resistive part may be further increased. The basic principle is a HV bridge where the capacitive-resistive arm is adjusted to balance the capacitive component of the leakage current so that only the non-linear resistive part contributes to the output voltage, which can be studied with the help of an oscilloscope.

The bridge is balanced when the voltage is close to zero and with the capacitive current being at its peak. Since the differential capacitance of the arrester is voltage dependent (the capacitance increases with voltage), while the bridge capacitance is constant, the remaining current after compensation comprises not only the resistive component, but also a capacitive part. This phenomenon is illustrated in figure 9. As for method A1, the true resistive component is found at the instant when the voltage is at its peak.

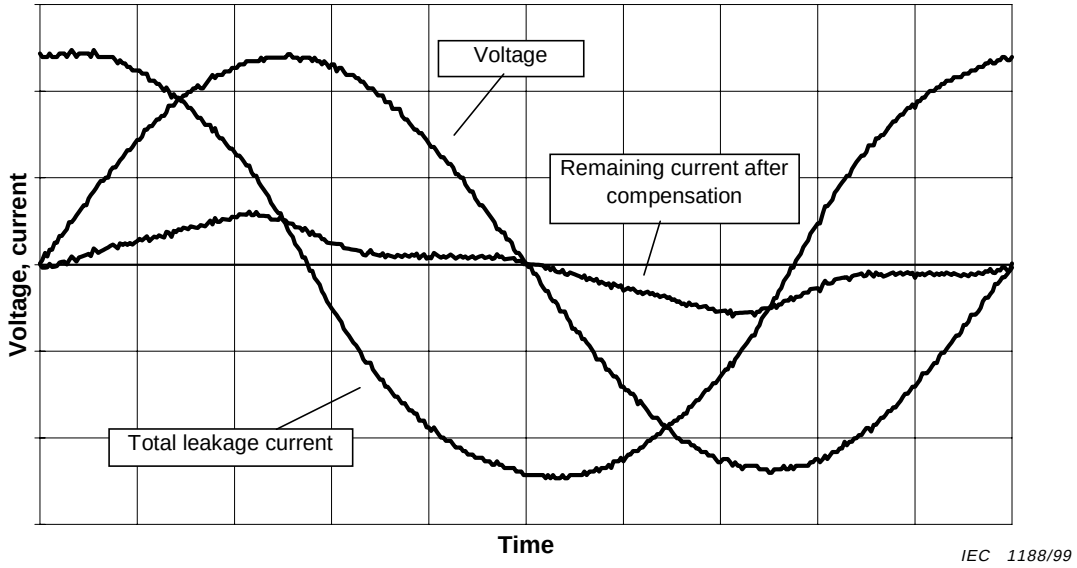


Figure 9 – Remaining current after compensation by capacitive current at U_c

Since the method requires a reference voltage, which may be difficult to access in service, the method is generally restricted in the same way as method A1. Similar to method A1, the accuracy may be reduced by phase shifts in voltages and currents due to the influence of adjacent phases.

6.3.3 Method A3 – Compensating the capacitive component without using a voltage signal

This is a compensation method where the need for a voltage signal is eliminated. The basic principle is that a reference signal of fundamental frequency is created synthetically by means of information derived from the leakage current. By proper adjustment of the amplitude and phase angle, which can be done automatically or by using an oscilloscope, the reference signal can be made to compensate the capacitive component of the leakage current. The method can be implemented with different degrees of sophistication.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

La méthode est facile à appliquer pour les mesures sous tension. Un problème potentiel est la présence d'harmoniques dans la tension. Ils provoquent en effet des courants capacitifs harmoniques qui peuvent interférer avec la composante résistive. De plus, le signal de compensation représente le courant dans une capacité linéaire, ce qui implique le même type de problème de précision que dans la méthode A2. Les déphasages des tensions et des courants, provoqués par les phases adjacentes, peuvent réduire la précision, comme dans les méthodes A1 et A2.

6.3.4 Méthode A4 – Compensation capacitive en combinant le courant de fuite des trois phases

Cette méthode est basée sur l'hypothèse que les courants capacitifs sont annulés si les courants de fuite des parafoudres des trois phases sont additionnés. Le courant qui en résulte est composé des harmoniques des courants résistifs provenant des trois parafoudres, puisque les composantes fondamentales sont également annulées pour autant qu'elles soient d'amplitude égale. En cas d'augmentation du courant résistif d'un des parafoudres, les courants capacitifs restent constants et l'augmentation apparaît dans le courant additionné. Le signal de référence de tension n'est pas nécessaire.

Pour des mesures en réseau, l'inconvénient principal de cette méthode est que les courants capacitifs des trois phases ne sont généralement pas d'amplitude égale. Seules des géométries bien contrôlées comme les parafoudres des postes sous enveloppe métallique, associées à des capacités équivalentes des parafoudres, donneront la symétrie nécessaire. Un autre problème est l'influence des harmoniques de la tension de réseau qui provoqueront des harmoniques dans le courant additionné.

6.3.5 Méthode B1 – Analyse du troisième harmonique

Cette méthode se fonde sur le fait que les harmoniques sont créés dans le courant de fuite par la caractéristique tension-courant non linéaire du parafoudre. Aucune référence de tension n'est nécessaire puisqu'on suppose que toutes les harmoniques naissent du courant résistif non linéaire. Le contenu harmonique dépend de l'amplitude du courant résistif et du degré de non-linéarité de la caractéristique tension-courant, c'est-à-dire que le contenu harmonique varie également en fonction de la tension et de la température du parafoudre, comme indiqué pour le troisième harmonique aux figures 6 et 7.

Le troisième harmonique est la plus grande composante harmonique du courant résistif, et c'est également le plus utilisé pour les mesures de diagnostic. La conversion de l'harmonique en niveau de courant résistif, si elle est requise, se base sur des informations fournies par le constructeur de parafoudre et sur des mesures effectuées en laboratoire.

La méthode est applicable aux mesures sous tension. Le principal problème est la sensibilité aux harmoniques dans la tension de réseau. Les harmoniques dans la tension peuvent provoquer des courants harmoniques capacitifs qui sont comparables en taille aux courants harmoniques générés par la résistance non linéaire du parafoudre. Il en résulte que l'erreur de mesure du courant harmonique peut être considérable si le contenu harmonique dans la tension est élevé. On peut le constater à la figure 10, où l'erreur d'évaluation du troisième harmonique dans le courant de fuite est donnée en fonction du contenu du troisième harmonique dans la tension de réseau. La figure montre également l'effet de la variation de la capacité et de la caractéristique tension-courant ainsi que l'influence de l'angle de phase du troisième harmonique sur la tension.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

The method can readily be utilized for measurements in service. A potential problem is the presence of harmonics in the voltage, which cause harmonic capacitive currents that may interfere with the resistive component. Furthermore, the compensating signal represents the current in a linear capacitance, which implies the same type of accuracy problem as with method A2. Phase shifts in voltages and currents caused by the adjacent phases may reduce the accuracy as with methods A1 and A2.

6.3.4 Method A4 – Capacitive compensation by combining the leakage current of the three phases

The method is based on the assumption that the capacitive currents are cancelled if the leakage currents of the arresters in the three phases are summed. The resulting current is composed of the harmonics of the resistive currents from the three arresters, since the fundamental components are also canceled as long as they are equal in magnitude. If there is an increase in the resistive current of any of the arresters, the capacitive currents remaining constant, the increase will appear in the summed current. A voltage reference signal is not needed.

For measurements in service, the main disadvantage with the method is that the capacitive currents of the three phases are not generally equal. Only well-controlled geometries such as arresters in gas-insulated switchgear, combined with equal capacitances of the arresters, will provide the necessary symmetry. Another concern is the influence of harmonics in the system voltage, which will cause harmonics in the summed current.

6.3.5 Method B1 – Third order harmonic analysis

The method is based on the fact that harmonics are created in the leakage current by the non-linear voltage-current characteristic of the arrester. No voltage reference is needed since it is assumed that all harmonics arise from the non-linear resistive current. The harmonic content depends on the magnitude of the resistive current and on the degree of non-linearity of the voltage-current characteristic, i.e., the harmonic content varies also with the voltage and temperature of the arrester, as indicated for the third order harmonic in figures 6 and 7.

The third harmonic is the largest harmonic component of the resistive current, and it is the most commonly used for diagnostic measurements. The conversion from harmonic to resistive current level, if required, relies on information supplied by the arrester manufacturer or from measurements in the laboratory.

The method can be readily used for measurements in service. The main problem is the sensitivity to harmonics in the system voltage. The harmonics in the voltage may create capacitive harmonic currents that are comparable in size with the harmonic currents generated by the non-linear resistance of the arrester. As a result, the error in the measured harmonic current may be considerable if the harmonic content in the voltage is high. This is seen in figure 10, where the error in the evaluation of the third harmonic in the leakage current is given as a function of the third harmonic content in the system voltage. The figure includes the effects of different voltage-current characteristics and capacitances, as well as the influence of the phase angle of the third harmonic in the voltage.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

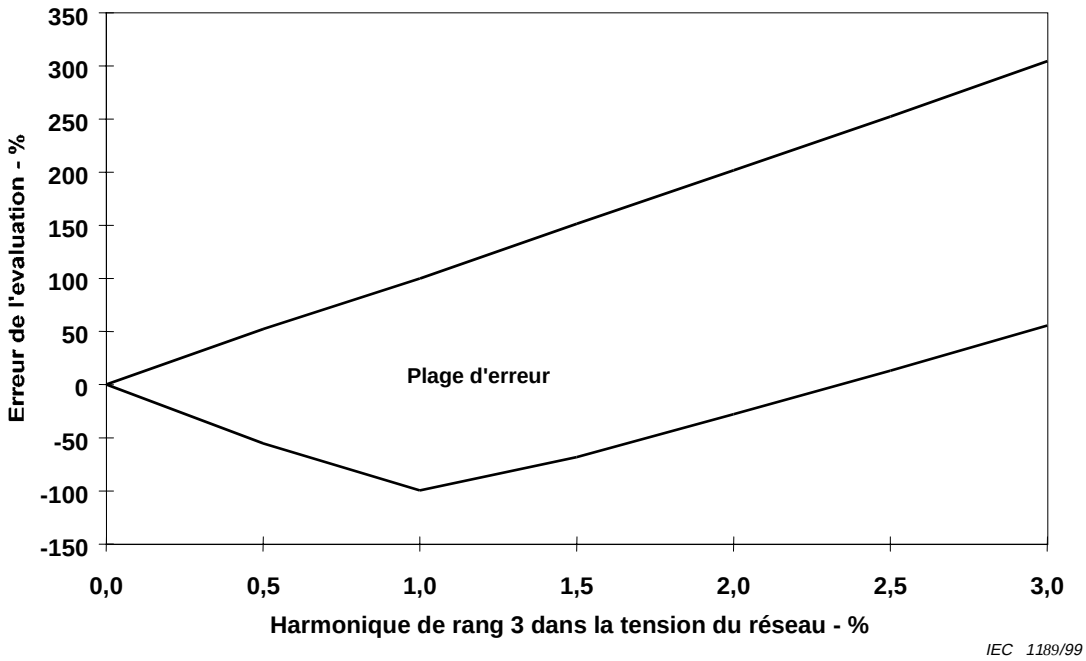


Figure 10 – Erreur dans l'évaluation de l'harmonique de rang 3 du courant de fuite pour différents angles de phase de l'harmonique de rang 3 de la tension du réseau, en considérant des capacités et des caractéristiques courant-tension variées de résistance à oxyde métallique

6.3.6 Méthode B2 – Analyse du troisième harmonique avec compensation des harmoniques de la tension

Cette méthode se base sur le même principe que la méthode B1, mais la sensibilité aux harmoniques dans la tension est considérablement réduite grâce à l'introduction d'un signal de courant compensatoire pour le troisième harmonique du courant capacitif dans le parafoudre. Le signal de courant compensatoire est dérivé à partir d'une «sonde de champ» située à la base du parafoudre. Après un réglage approprié, le courant harmonique induit dans la sonde par le champ électrique est soustrait du courant harmonique total. Le résultat est le courant harmonique généré par le courant résistif non linéaire du parafoudre. La conversion du troisième harmonique en courant résistif nécessite des informations supplémentaires de la part du constructeur du parafoudre, comme pour la méthode B1. Cette méthode est adaptée aux mesures sous tension.

6.3.7 Méthode B3 – Analyse de l'harmonique de premier ordre

La composante fondamentale du courant résistif est obtenue en filtrant et en intégrant le courant de fuite, pour produire un signal proportionnel à la composante résistive.

L'influence des harmoniques dans la tension de réseau lors de la mesure en réseau est pratiquement éliminée en utilisant exclusivement les composantes fondamentales de tension et de courant. La principale limitation de cette méthode est la nécessité d'obtenir un signal de tension, par exemple sur le côté secondaire d'un transformateur de tension. La précision dépend des déphasages des tensions et des courants, comme dans les méthodes A1-A3.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

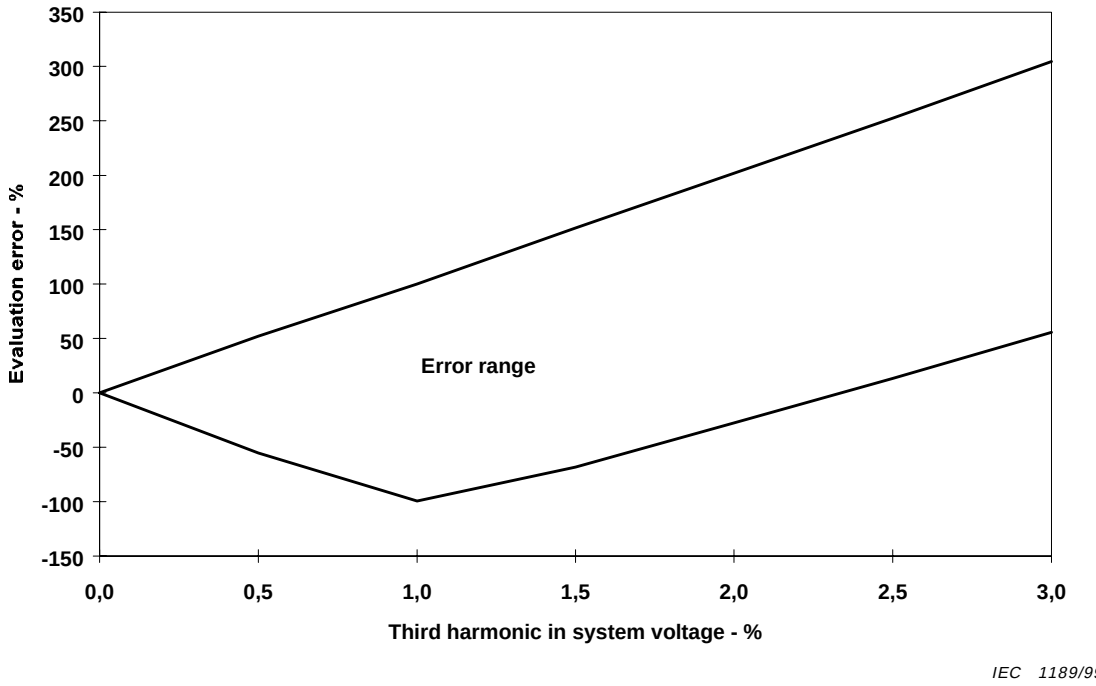


Figure 10 – Error in the evaluation of the leakage current third harmonic for different phase angles of system voltage third harmonic, considering various capacitances and voltage-current characteristics of non-linear metal-oxide resistors

6.3.6 Method B2 – Third order harmonic analysis with compensation for harmonics in the voltage

The method is based on the same principle as method B1, but the sensitivity to harmonics in the voltage is greatly reduced by the introduction of a compensating current signal for the capacitive third harmonic current in the arrester. The compensating current signal is derived from a "field probe" positioned at the base of the arrester. After proper scaling, the harmonic current induced in the probe by the electric field is subtracted from the total harmonic current. The result is the harmonic current generated by the non-linear resistive current of the arrester. The conversion from third harmonic to resistive current requires additional information from the arrester manufacturer, as for method B1. The method is suitable for measurements in service.

6.3.7 Method B3 – First order harmonic analysis

The fundamental component of the resistive current is obtained by filtering and integration of the leakage current, yielding a signal proportional to the resistive component.

The influence of harmonics in the system voltage during measurements in service is practically eliminated by using only the fundamental components of voltage and current. The main restriction on the method is the need for a voltage signal obtained, e.g. from to the secondary side of a potential transformer. The accuracy depends on phase shifts in the voltages and currents, in the same way as for methods A1-A3.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

6.3.8 Méthode C – Détermination directe des pertes actives

Les pertes actives sont l'intégrale du produit des valeurs instantanées de la tension et du courant de fuite divisée par le temps. Les pertes actives peuvent être exprimées comme le produit de la valeur efficace de la composante résistive du courant de fuite et de la valeur efficace de la tension aux bornes du parafoudre. L'influence des harmoniques de la tension est fortement réduite par l'opération de multiplication et d'intégration. Le principal inconvénient de cette méthode est la nécessité de disposer d'un signal de tension. Comme dans les méthodes A1-A3, la précision pendant la mesure en réseau peut être limitée par des déphasages entre les tensions et les courants, provoqués par les phases adjacentes.

6.4 Informations sur le courant de fuite fournies par le constructeur du parafoudre

Les données relatives à la mesure du courant de fuite peuvent être comparées avec les informations fournies par le constructeur du parafoudre. Pour utiliser ces informations, il est important que la tension de fonctionnement et la température ambiante soient connues au moment de la mesure.

Pour une utilisation efficace des méthodes de diagnostic décrites plus haut, le constructeur du parafoudre peut fournir des informations concernant les différentes méthodes. Les informations peuvent inclure des données sur le courant résistif, le troisième harmonique du courant et les pertes actives pour chaque type de parafoudre, en fonction de la tension et de la température.

En pratique, la dépendance de la tension peut être exprimée en fonction de la tension d'exploitation divisée par U_r. Il convient que les informations couvrent de préférence les tensions d'exploitation de 0,40 à 0,90 U_r. Il convient que les courants résistifs et de troisième harmonique soient fournis en valeurs crêtes, tandis que les pertes actives soient exprimées par une valeur spécifique basée sur la tension nominale.

Il convient que la dépendance à la température soit fournie en fonction de la température ambiante, en supposant une température plus élevée des varistances, étant donné qu'il est impossible d'obtenir la température réelle de la varistance pendant la mesure sous tension. Il convient que la gamme de température ambiante soit de préférence comprise entre –10 °C et +40 °C.

NOTE La température effective de la varistance peut être supérieure à la normale, à cause des radiations solaires, de l'absorption d'énergie, ou d'autres phénomènes semblables.

Deux sortes d'informations fournies par le constructeur du parafoudre sont d'une grande importance dans l'évaluation des résultats des mesures.

Premièrement, les informations qui sont utiles à la comparaison des résultats obtenus dans des conditions d'exploitation différentes en termes de tension de réseau et de température ambiante. En convertissant les résultats mesurés en une série de conditions d'exploitation «standard», par exemple une tension de réseau de 0,70 U_r et une température ambiante de +20 °C, il est possible de comparer les résultats des mesures effectuées en différentes occasions. Les informations provenant du constructeur peuvent être fournies comme coefficients multiplicateurs de correction, comme l'indiquent les figures 11 et 12.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

6.3.8 Method C – Direct determination of the power losses

The power loss is the integral of the product of the instantaneous values of the voltage and leakage current divided by time. The power loss may be expressed in terms of the product of the r.m.s. value of the resistive component of leakage current and the r.m.s. value of the voltage across the arrester. The influence of the harmonics in the voltage is greatly reduced by the multiplication and integration procedure. The main disadvantage is the need for a voltage signal. As with methods A1-A3, the accuracy during measurements in service may be limited by phase shifts in voltages and currents, caused by the adjacent phases.

6.4 Leakage current information from the arrester manufacturer

The measured leakage current data may be compared with information supplied by the arrester manufacturer. To utilize this information, it is important that the operating voltage and the ambient temperature are known at the time of measurement.

For efficient use of the diagnostic methods described above, the arrester manufacturer may provide information relevant to the various methods. The information may be comprised of the resistive current, third harmonic current and power loss data for each arrester type as functions of voltage and temperature.

For practical use, the voltage dependence may be expressed as a function of the service voltage divided by U_r. The information should preferably cover operating voltages from 0,40 to 0,90 of U_r. The resistive and third harmonic currents should be given as peak values, while the power loss should be expressed as a specific value based on the rated voltage.

The temperature dependence should be given as a function of the ambient temperature, assuming a certain over-temperature of the resistors, since there is no possibility to obtain the actual resistor temperature during measurements in service. The ambient temperature range should preferably be from –10 °C to +40 °C.

NOTE The actual resistor temperature may be higher than normal due to solar radiation, energy absorption and the like.

Two different kinds of information from the arrester manufacturer are of main interest in the evaluation of the measurement results.

First, information for comparison of results obtained under different operating conditions in terms of service voltage and ambient temperature. By conversion of the measured results to a set of “standard” operating conditions, e.g. a service voltage of 0,70 of U_r and an ambient temperature of +20 °C, it is possible to compare the results from measurements made on different occasions. The information from the manufacturer could be given as correction multipliers, as indicated in figures 11 and 12.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

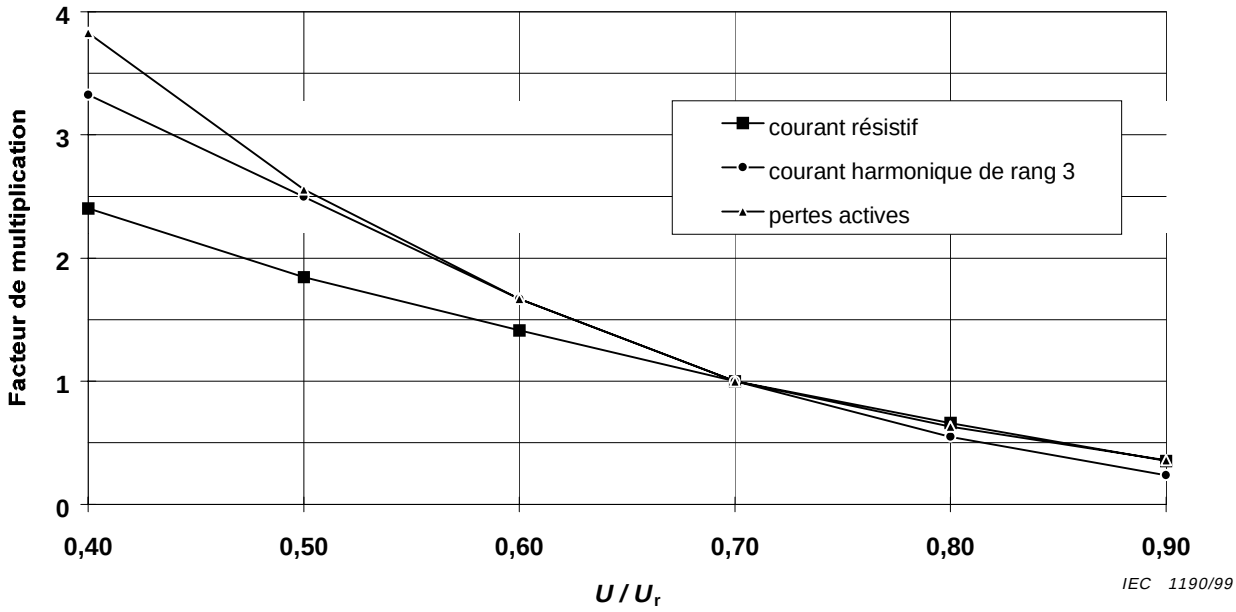


Figure 11 – Information typique pour la conversion aux conditions «standard» de tension d'exploitation

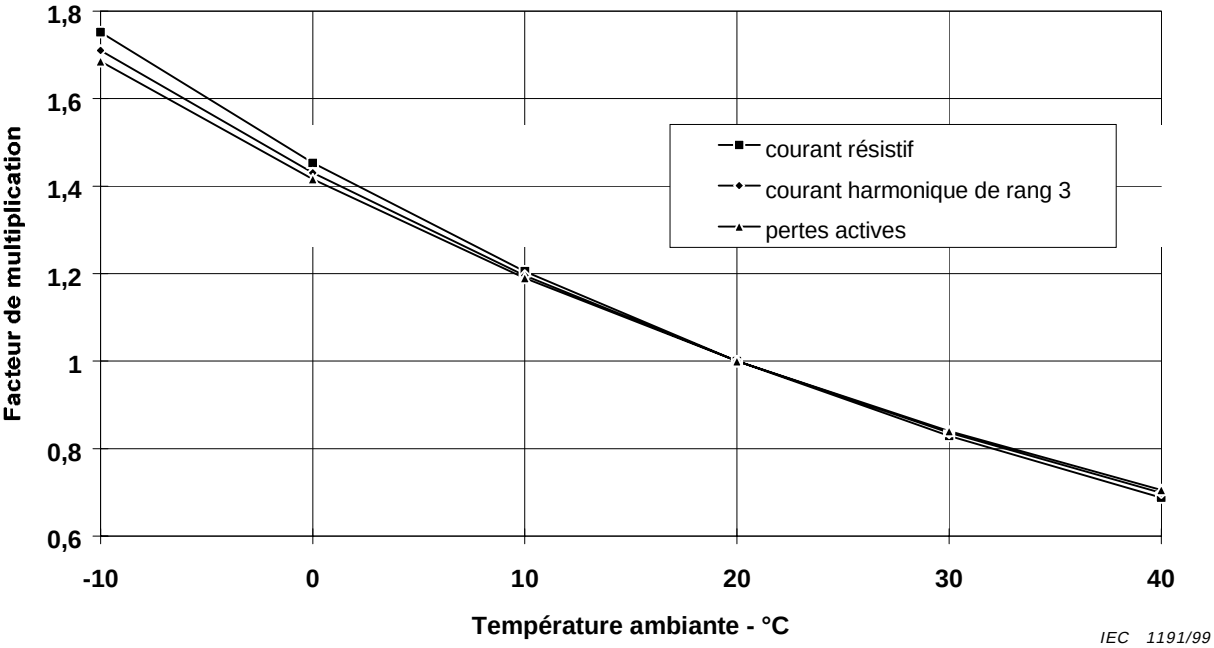


Figure 12 – Information typique pour la conversion aux conditions «standard» de température ambiante

En deuxième lieu, le constructeur de parafoudre peut établir des valeurs limites pour les quantités mesurées après conversion en conditions d'exploitation standard, comme décrit ci-dessus. Si les limites sont dépassées, il convient de consulter le constructeur pour de plus amples informations. Les limites peuvent être données comme des valeurs absolues et/ou comme des évolutions relatives dans le temps.

NOTE 1 En raison de la complexité des méthodes de mesure, il est conseillé de consulter le constructeur du parafoudre afin d'éviter des interprétations erronées des résultats des mesures.

NOTE 2 La détermination des données du troisième harmonique du courant peut être influencée par les harmoniques dans la tension d'essai en laboratoire. Il convient par conséquent de prendre en considération les exigences relatives à l'équipement d'essai.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

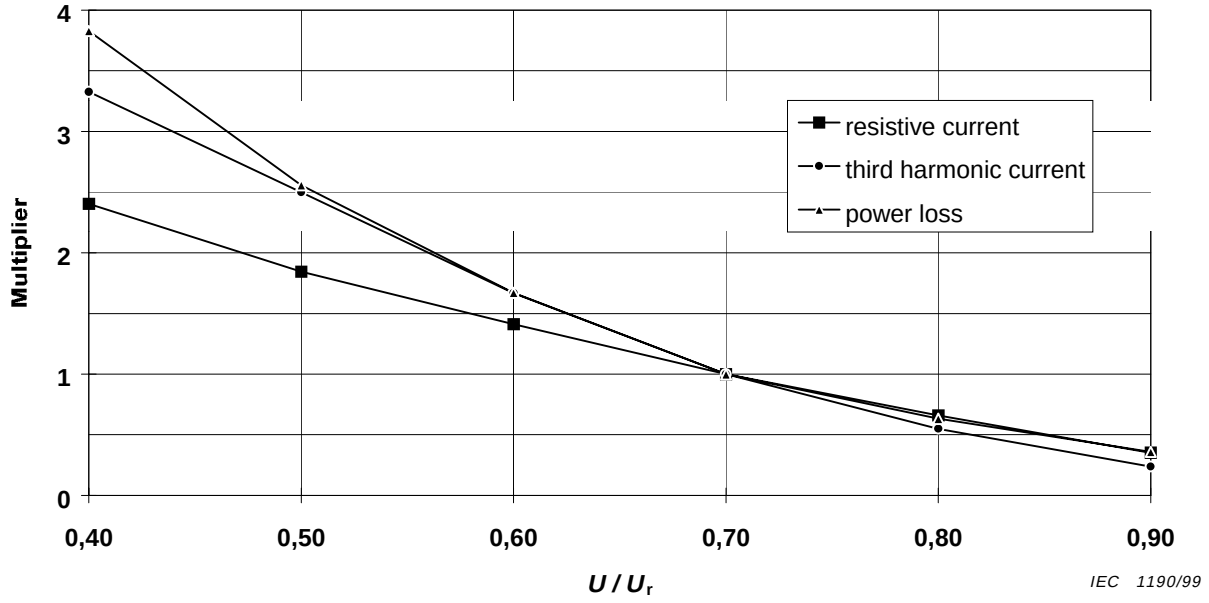


Figure 11 – Typical information for conversion to "standard" operating voltage conditions

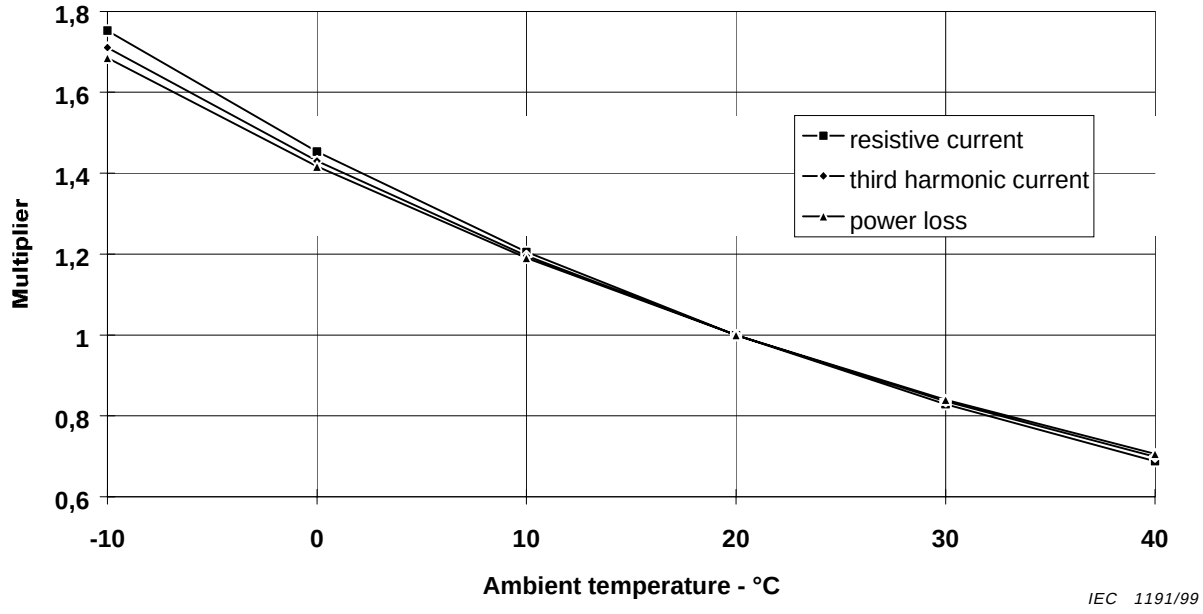


Figure 12 – Typical information for conversion to "standard" ambient temperature conditions

Secondly, the arrester manufacturer may give limits for the measured quantities after conversion to “standard” operating conditions, as described above. If the limits are exceeded, the manufacturer should be consulted for further advice. The limits may be given as absolute values and/or relative changes with time.

NOTE 1 Due to the complexity of the measurement methods, it is recommended that the arrester manufacturer be consulted in order to avoid misinterpretation of the measurement results.

NOTE 2 The determination of the third harmonic current data may be influenced by harmonics in the laboratory test voltage. Therefore, the requirements on the test equipment should be considered.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---
Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

6.5 Résumé des méthodes de diagnostic

Le retour d'expérience des différentes méthodes de diagnostic est résumé dans le tableau 4. La sensibilité, l'efficacité du diagnostic et les expériences en service avec les différentes méthodes de mesure du courant de fuite sont indiquées dans le tableau 5.

Tableau 4 – Résumé des méthodes de diagnostic

Méthode de diagnostic	Conditions de service		Expérience en service
	hors réseau	en réseau	
Indicateur de défaut		x	limitée
Déconnecteur		x	répandue [a)]
Compteur de décharges		x	répandue
Eclateurs de surveillance	x	x	répandue [b)]
Mesure de température		x	limitée
Mesure du courant de fuite			
– utilisant une source de tension séparée	x		voir tableau 5
– utilisant la tension du réseau		x	voir tableau 5

[a)] Pour les parafoudres à moyenne tension.
[b)] Dans certains pays.

Tableau 5 – Propriétés des méthodes de mesure sur site du courant de fuite

Méthode de mesure du courant de fuite	Méthode n°	Sensibilité à			Efficacité du diagnostic		Expérience en service	Réf. n°
		harmoniques dans la tension	déphasage dans la mesure du courant ou de la tension	courants de surface	qualité de l'information	compléxité de la mise en oeuvre		
Source de tension continue séparée		n.a.	n.a.	élevée	élevée	élevée	limitée	5
Tension du réseau ou source de tension alternative séparée								
Mesure du courant de fuite total		faible	faible	moyenne	faible	faible	étendue	
Mesure du courant de fuite résistif								
– en utilisant une référence de tension	A1	moyenne	élevée	élevée	moyenne	élevée	limitée	6
– en utilisant la compensation par capacité	A2	moyenne	élevée	élevée	moyenne	élevée	limitée	7
– en utilisant la compensation synthétique	A3	moyenne	élevée	élevée	moyenne	faible	a.i.d.	8
– en utilisant l'annulation du courant capacitif	A4	élevée	élevée	élevée	faible	faible	limitée	9, 10
Analyse harmonique du courant de fuite								
– en utilisant l'harmonique de rang 3	B1	élevée	faible	faible	moyenne	faible	étendue	11
– en utilisant l'harmonique 3 avec compensation	B2	faible	faible	faible	élevée	moyenne	étendue	12, 13
– en utilisant l'harmonique de premier ordre	B3	faible	élevée	élevée	moyenne	élevée	limitée	14
Mesure des pertes actives	C	faible	élevée	élevée	moyenne	élevée	a.i.d.	15

NOTE – n.a. = non applicable; a.i.d. = aucune information disponible.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

6.5 Summary of diagnostic methods

The service experiences with the different diagnostic methods are summarized in table 4. The sensitivity, diagnostic efficiency and service experience with the various leakage current measurement methods are indicated in table 5.

Table 4 – Summary of diagnostic methods

Diagnostic method	Service condition		Service experience
	off-line	on-line	
Fault indicator		x	limited
Disconnector		x	extensive [a)]
Surge counter		x	extensive
Monitoring spark gap	x	x	extensive [b)]
Temperature measurement		x	limited
Leakage current measurement			
– using a separate voltage source	x		see table 5
– using service voltage		x	see table 5

[a)] With medium-voltage arresters.
[b)] In certain countries.

Table 5 – Properties of on-site leakage current measurement methods

Leakage current measurement method	Method No.	Sensitivity to			Diagnostic efficiency		Service experience	Ref. No.
		harmonics in the voltage	phase shift in measurement of voltage or current	surface currents	information quality	handling complexity		
Separate d.c. voltage source		n.a.	n.a.	high	high	high	limited	5
Service voltage or separate a.c. voltage source								
Measurement of total leakage current		low	low	mean	low	low	extensive	
Measurement of resistive leakage current								
– using voltage reference	A1	mean	high	high	mean	high	limited	6
– using capacitor compensation	A2	mean	high	high	mean	high	limited	7
– using synthetic compensation	A3	mean	high	high	mean	low	n.i.a.	8
– using capacitive current cancellation	A4	high	high	high	low	low	limited	9, 10
Harmonic analysis of leakage current								
– using third harmonic	B1	high	low	low	mean	low	extensive	11
– using third harmonic with compensation	B2	low	low	low	high	mean	extensive	12, 13
– using first order harmonic	B3	low	high	high	mean	high	limited	14
Measurement of power loss	C	low	high	high	mean	high	n.i.a.	15

NOTE – n.a. = not applicable; n.i.a. = no information available.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Annexe A
(informative)

Détermination des surtensions temporaires causées par des défauts à la terre

Le facteur de défaut à la terre k est le rapport de la valeur efficace de la tension phase-terre à fréquence industrielle la plus élevée sur une phase saine en un emplacement donné pendant un défaut à la terre (affectant une ou plusieurs phases en un point quelconque) à la valeur efficace de la tension phase-terre à fréquence industrielle qui existerait en l'absence de défaut (voir 3.17 de la CEI 60071-1).

Le facteur de défaut à la terre est calculé à partir des impédances complexes Z_1, Z_2 et Z_0 des systèmes direct, inverse et homopolaire, en tenant compte de la résistance de défaut R. Les relations suivantes sont à considérer:

$Z_1 = Z_2 = R_1 + jX_1$: résistance et réactance des systèmes directs et inverses;

$Z_0 = R_0 + jX_0$: résistance et réactance du système homopolaire.

Les facteurs de défaut à la terre sont calculés à l'endroit du défaut.

NOTE Il convient de noter que dans les réseaux à neutre mis à la terre par bobine de compensation très étendus, le facteur de défaut à la terre peut être plus élevé à des endroits autres que l'emplacement du défaut.

La figure A.1 montre la situation globale lorsque $R_1 << X_1$ et $R = 0$.

La gamme des fortes valeurs de X_0/X_1, en positif et/ou en négatif, correspond à des réseaux à neutre isolé ou mis à la terre par bobine de compensation.

La gamme des faibles valeurs positives de X_0/X_1 correspond à des réseaux à neutre à la terre.

La gamme des faibles valeurs négatives de X_0/X_1, indiquée par des hachures, ne convient pas à un usage pratique à cause de l'existence de résonances.

Pour les réseaux à neutre à la terre, les figures A.2, A.3, A.4 et A.5 indiquent le facteur de défaut à la terre sous la forme de familles de courbes correspondant à des valeurs particulières de R_1/X_1.

Les courbes sont calculées avec la résistance de défaut qui produit la valeur la plus élevée du facteur de défaut à la terre.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Annex A
(informative)

Determination of temporary overvoltages due to earth faults

The earth fault factor k is the ratio of the highest r.m.s. phase-to-earth power frequency voltage on a sound phase at a particular location during a fault to earth (affecting one or more phases at any point) to the r.m.s. phase-to-earth power frequency voltage which should be obtained without the fault (see 3.17 of IEC 60071-1).

The earth fault factor is calculated using the complex impedances Z_1, Z_2 and Z_0 of the positive, negative and zero sequence systems, taking into account the fault resistance R. The following applies:

$Z_1 = Z_2 = R_1 + jX_1$: resistance and reactance of positive and negative sequence system;

$Z_0 = R_0 + jX_0$: resistance and reactance of zero sequence system.

The earth fault factors are calculated for the location of the fault.

NOTE It should be observed that in extended resonant earthed networks the earth fault factor may be higher at other locations than the fault.

Figure A.1 shows the overall situation, when $R_1 << X_1$ and $R = 0$.

The range of high values for X_0/X_1, positive and/or negative, apply to resonant earthed or isolated neutral systems.

The range of low values of positive X_0/X_1 are valid for earthed neutral systems.

The range of low values of negative X_0/X_1, shown hatched, is not suitable for practical application due to resonant conditions.

For earthed neutral systems, figures A.2 through A.5 show the earth fault factors as families of curves applicable to particular values of R_1/X_1.

The curves are valid for fault resistance values giving the highest earth fault factors.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

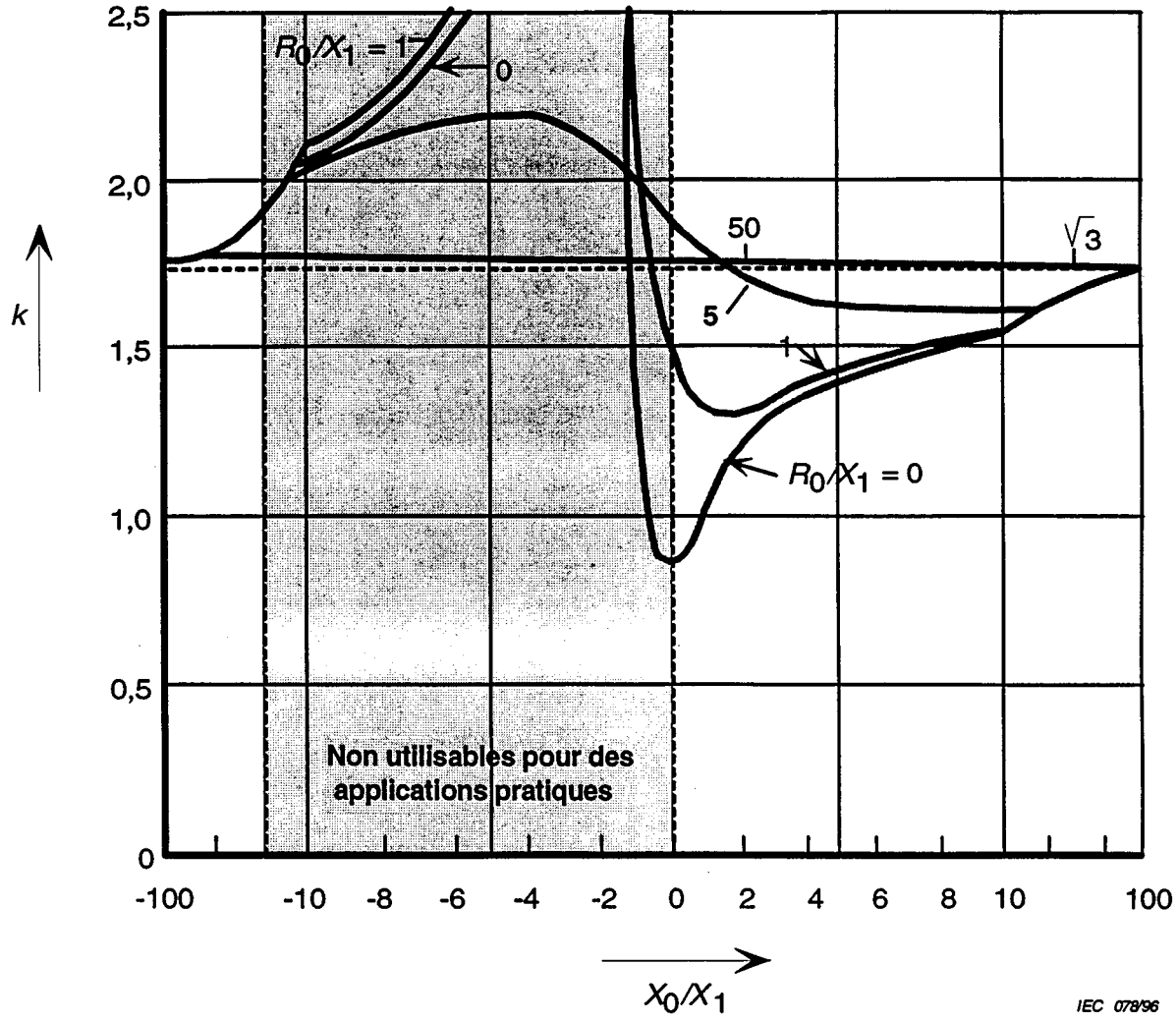


Figure A.1 – Facteur de défaut à la terre *k* en fonction de X_0/X_1, pour $R_1/X_1 = R = 0$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

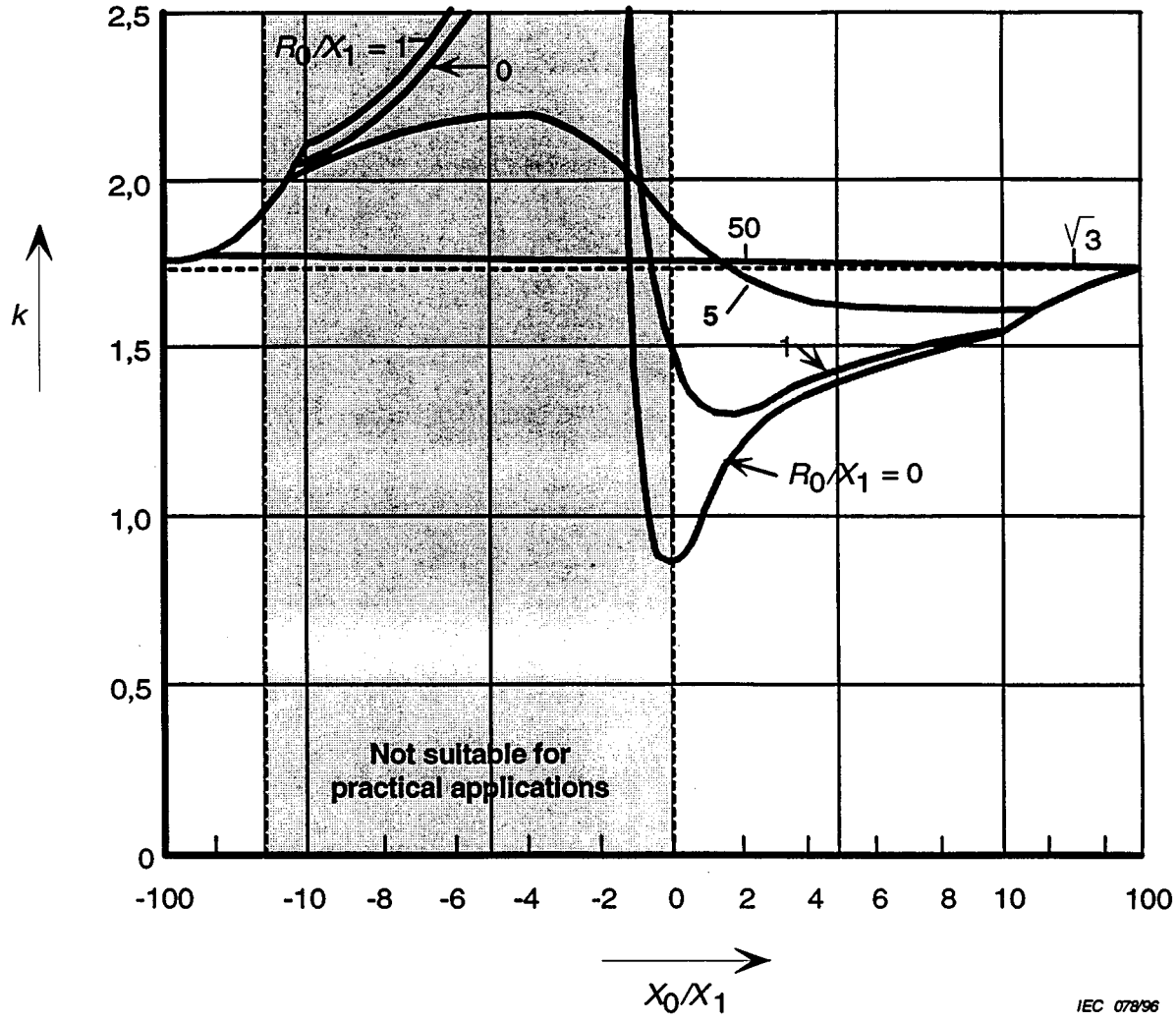
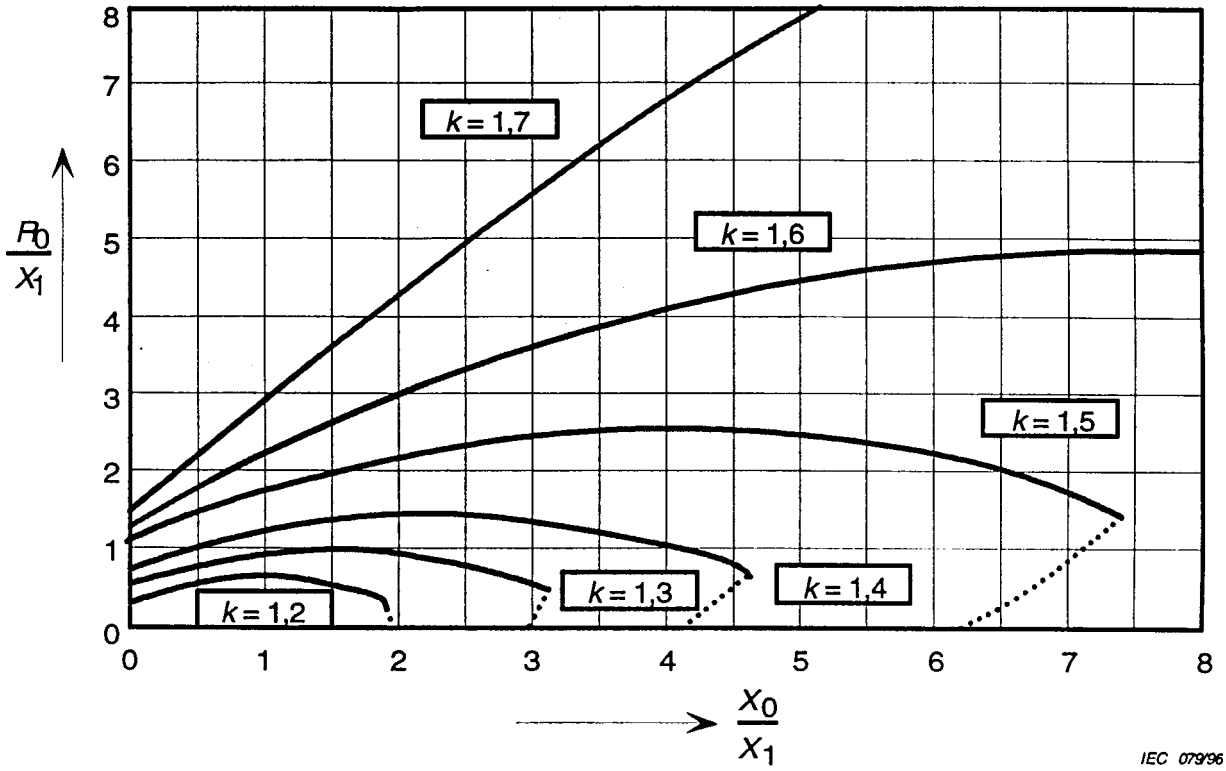


Figure A.1 – Earth fault factor *k* on a base of X_0/X_1 , for $R_1/X_1 = R = 0$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale



Ces courbes sont composées de sections représentant les conditions de fonctionnement les plus critiques avec le repérage suivant:

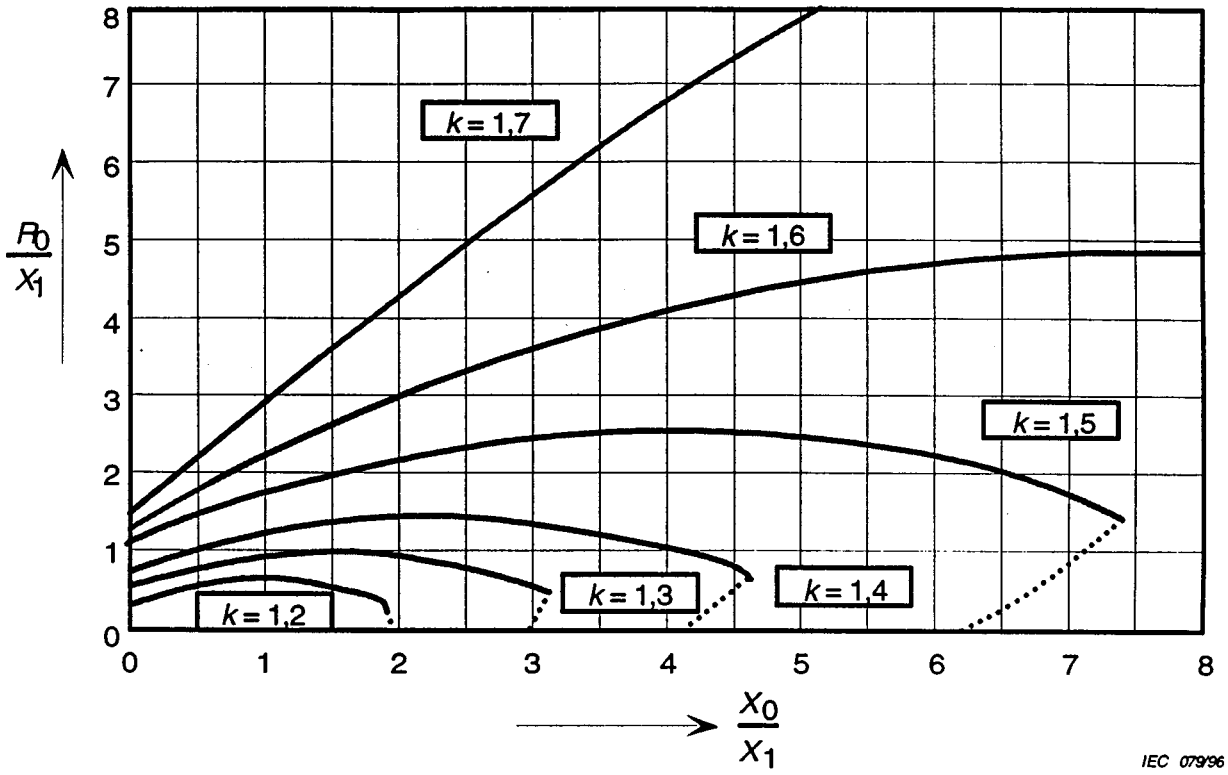
——————— la tension maximale apparaît, pendant un défaut à la terre, sur la phase qui est en avance par rapport à la phase en défaut;

..... la tension maximale apparaît, pendant un défaut à la terre, sur la phase qui est en retard par rapport à la phase en défaut;

– · – · – · – · – · – la tension la plus élevée apparaît sur les phases saines.

Figure A.2 – Relation entre R_0/X_1 et X_0/X_1 pour des valeurs constantes du facteur de défaut à la terre k lorsque $R_1 = 0$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

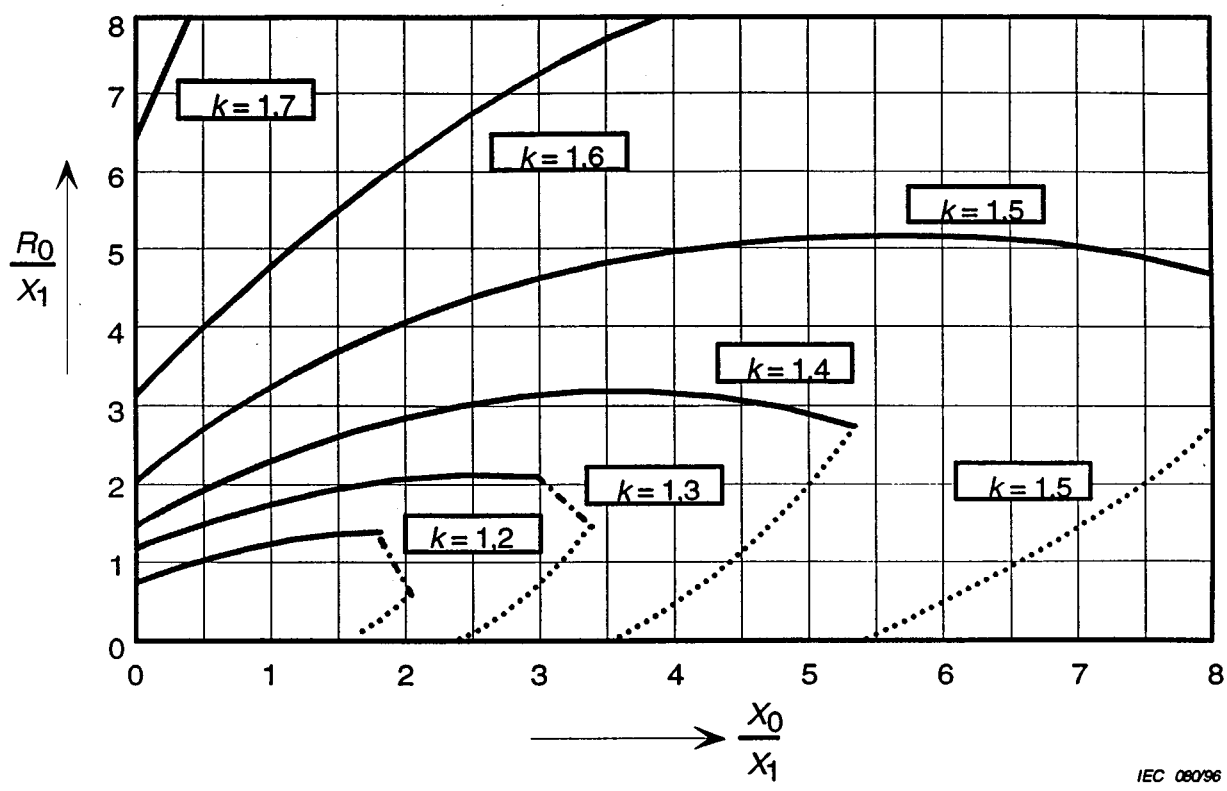


The curves are divided into regions representing the most critical conditions by the following methods of presentation:

———	maximum voltage occurs during a phase-to-earth fault on the phase which leads to the faulted phase;
.....	maximum voltage occurs during a phase-to-earth fault on the phase which lags the faulted phase;
-.-.-.-.-.-.-.-.-	maximum voltage occurs during a phase-to-earth fault on the unfaulted phases.

Figure A.2 – Relationship between R_0/X_1 and X_0/X_1 for constant values of earth fault factor k where $R_1 = 0$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

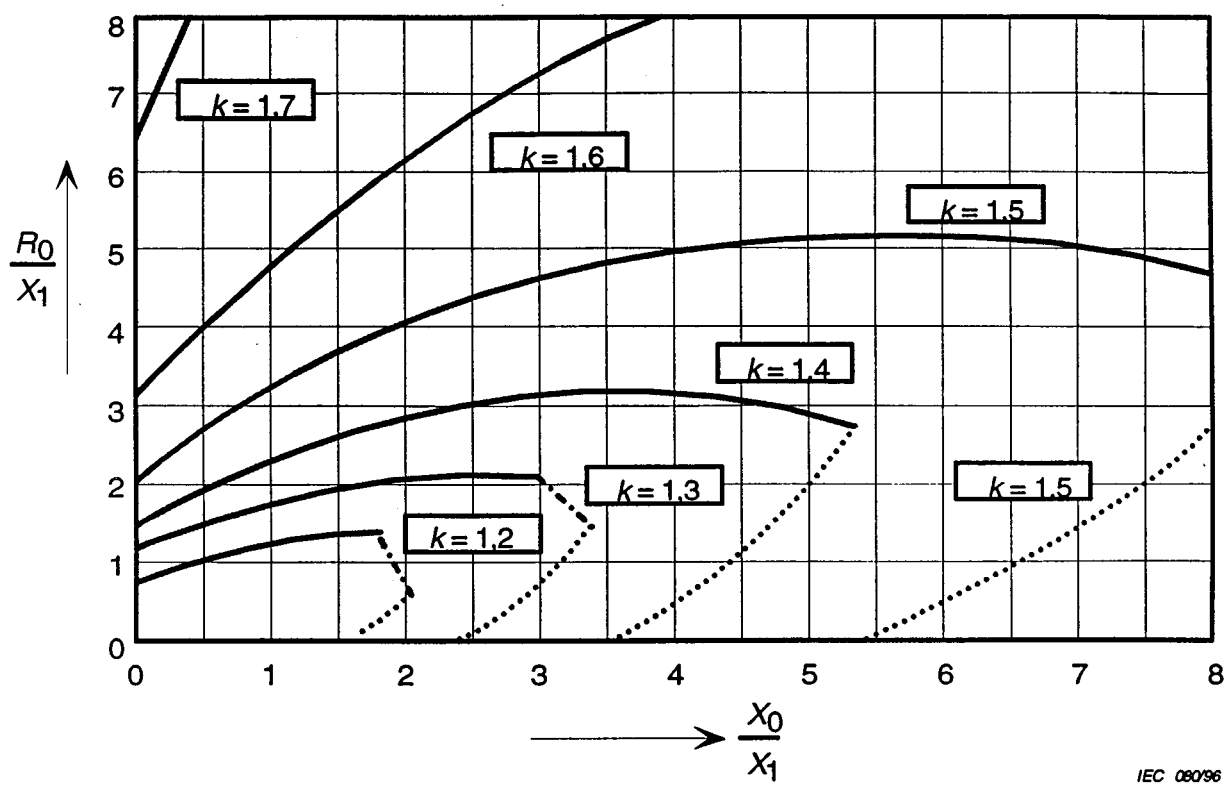


Ces courbes sont composées de sections représentant les conditions de fonctionnement les plus critiques avec le repérage suivant:

———	la tension maximale apparaît, pendant un défaut à la terre, sur la phase qui est en avance par rapport à la phase en défaut;
.....	la tension maximale apparaît, pendant un défaut à la terre, sur la phase qui est en retard par rapport à la phase en défaut;
-·-·-·-·-·-·-	la tension la plus élevée apparaît sur les phases saines.

Figure A.3 – Relation entre R_0/X_1 et X_0/X_1 pour des valeurs constantes du facteur de défaut à la terre k lorsque $R_1 = 0{,}5\ X_1$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

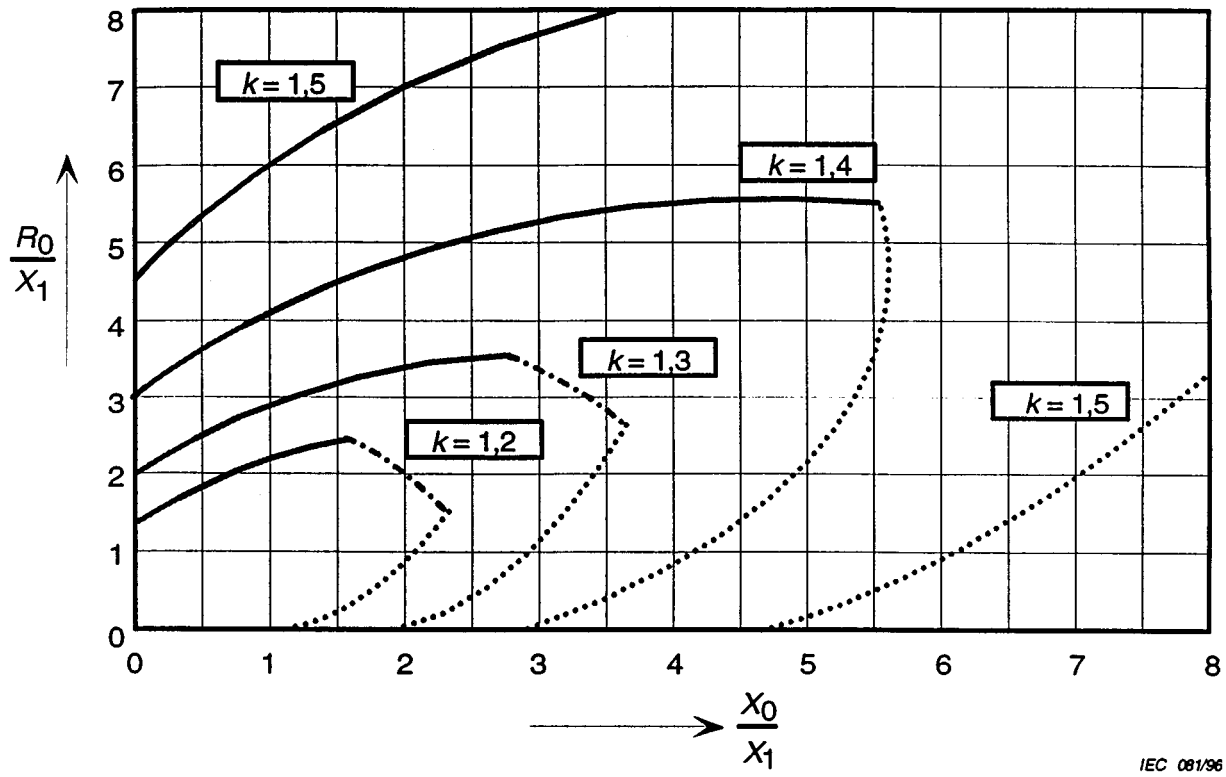


The curves are divided into regions representing the most critical conditions by the following methods of presentation:

———	maximum voltage occurs during a phase-to-earth fault on the phase which leads to the faulted phase;
.....	maximum voltage occurs during a phase-to-earth fault on the phase which lags the faulted phase;
-.-.-.-.-.-.-.-	maximum voltage occurs during a phase-to-earth fault on the unfaulted phases.

Figure A.3 – Relationship between R_0/X_1 and X_0/X_1 for constant values of earth fault factor k where $R_1 = 0{,}5\ X_1$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale



Ces courbes sont composées de sections représentant les conditions de fonctionnement les plus critiques avec le repérage suivant:

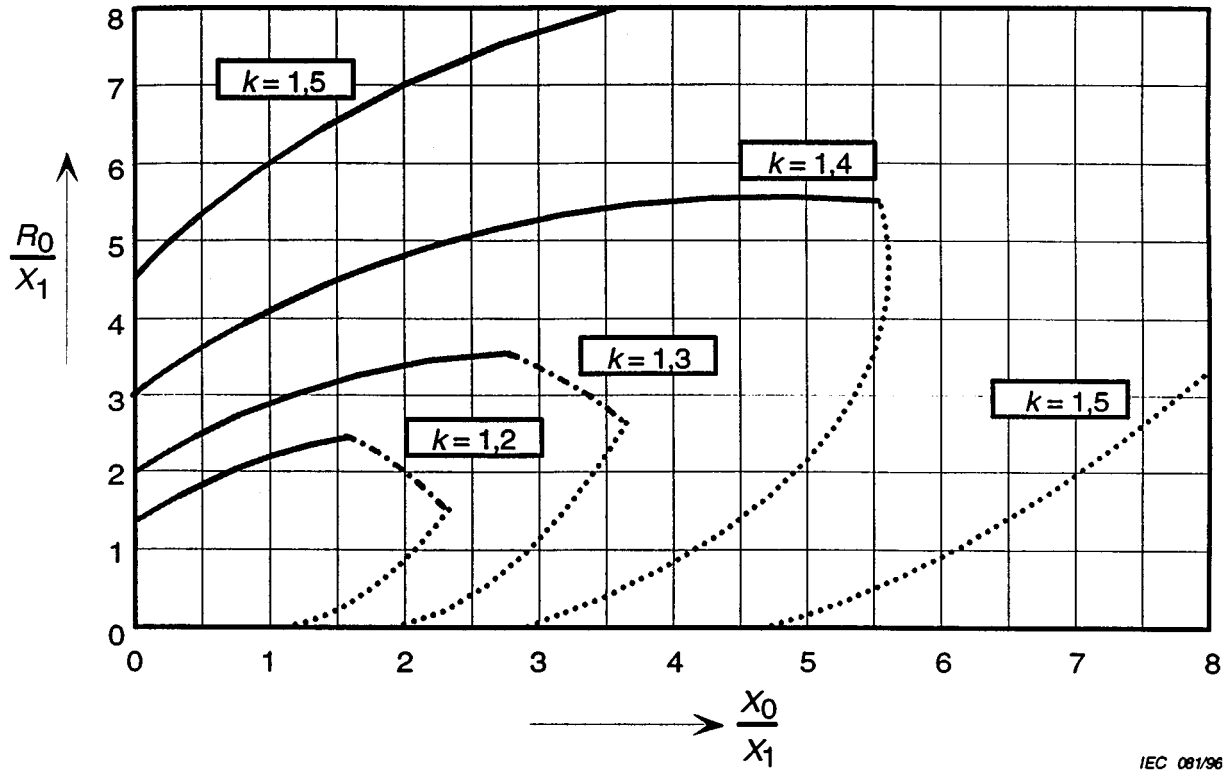
——————— la tension maximale apparaît, pendant un défaut à la terre, sur la phase qui est en avance par rapport à la phase en défaut;

..... la tension maximale apparaît, pendant un défaut à la terre, sur la phase qui est en retard par rapport à la phase en défaut;

-·-·-·-·-·-·-·-·- la tension la plus élevée apparaît sur les phases saines.

Figure A.4 – Relation entre R_0/X_1 et X_0/X_1 pour des valeurs constantes du facteur de défaut à la terre k lorsque $R_1 = X_1$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

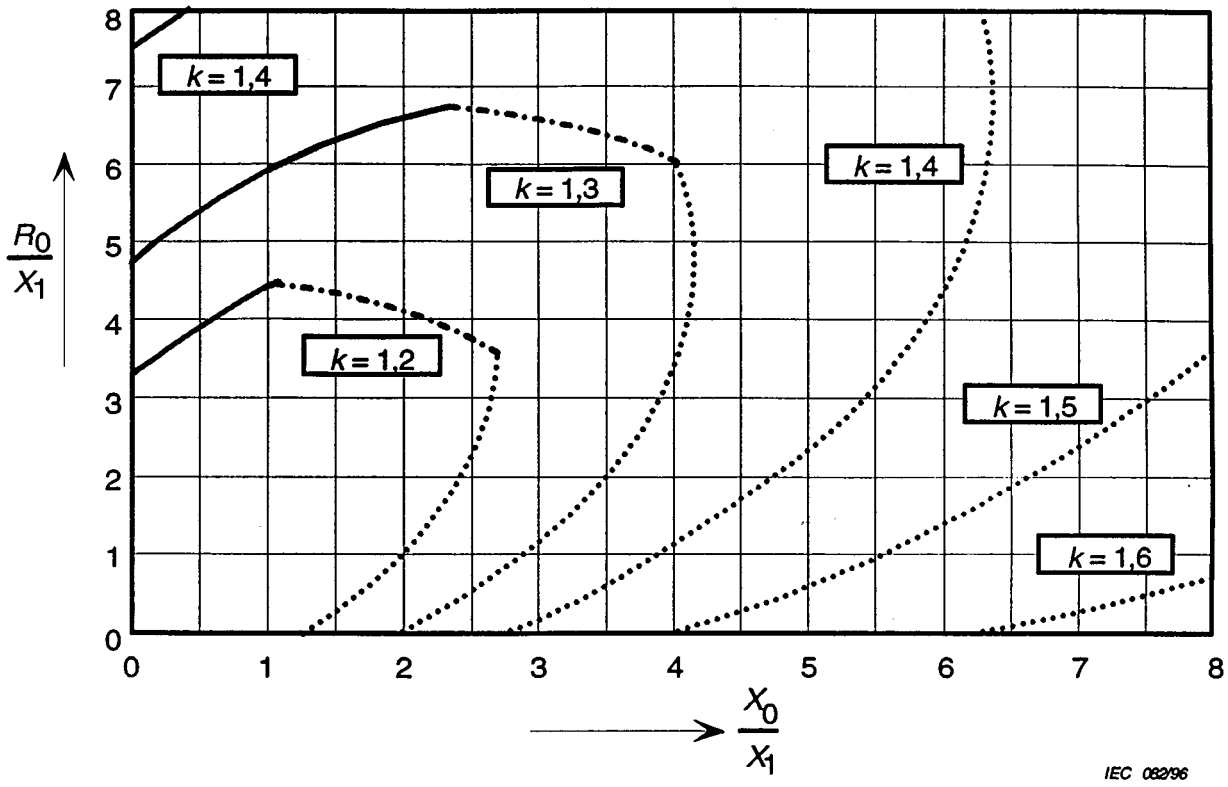


The curves are divided into regions representing the most critical conditions by the following methods of presentation:

———	maximum voltage occurs during a phase-to-earth fault on the phase which leads to the faulted phase;
.....	maximum voltage occurs during a phase-to-earth fault on the phase which lags the faulted phase;
-.-.-.-.-.-.-	maximum voltage occurs during a phase-to-earth fault on the unfaulted phases.

Figure A.4 – Relationship between R_0/X_1 and X_0/X_1 for constant values of earth fault factor k where $R_1 = X_1$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

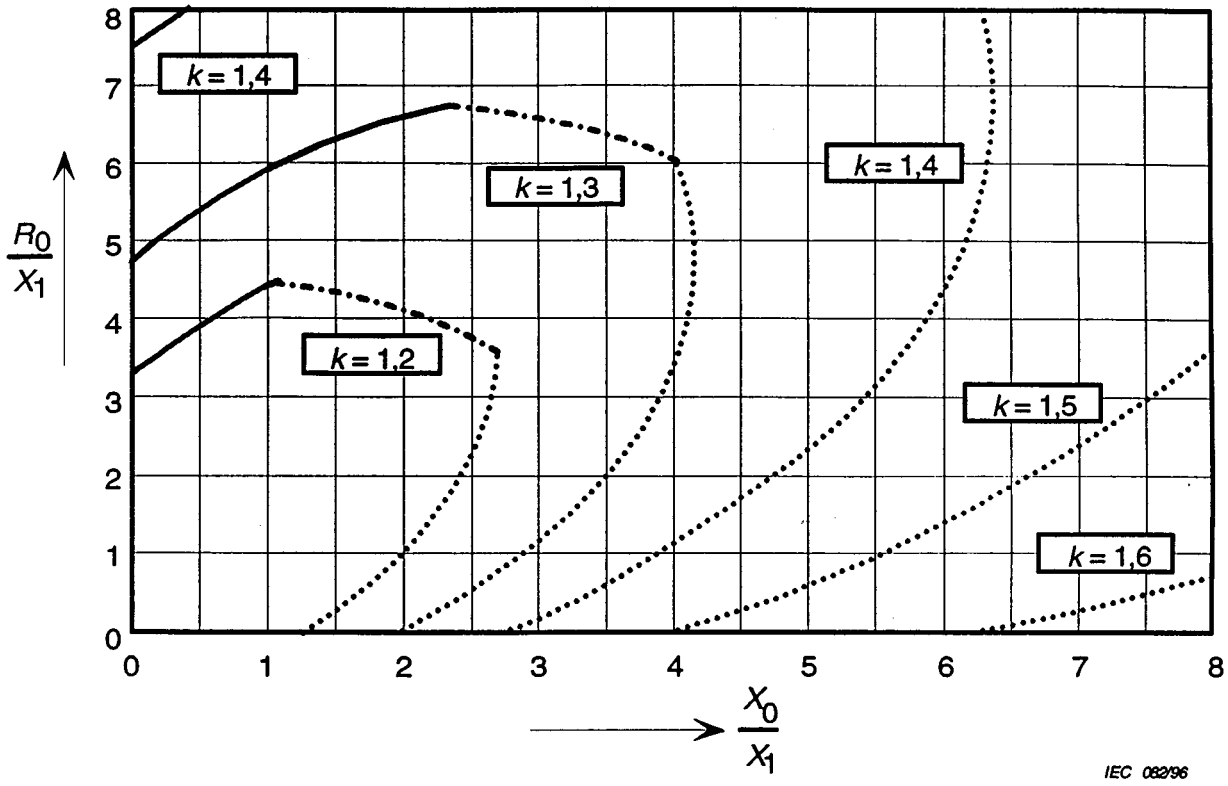


Ces courbes sont composées de sections représentant les conditions de fonctionnement les plus critiques avec le repérage suivant:

———	la tension maximale apparaît, pendant un défaut à la terre, sur la phase qui est en avance par rapport à la phase en défaut;
.....	la tension maximale apparaît, pendant un défaut à la terre, sur la phase qui est en retard par rapport à la phase en défaut;
-·-·-·-·-	la tension la plus élevée apparaît sur les phases saines.

Figure A.5 – Relation entre R_0/X_1 et X_0/X_1 pour des valeurs constantes du facteur de défaut à la terre k lorsque $R_1 = 2\ X_1$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale



The curves are divided into regions representing the most critical conditions by the following methods of presentation:

———	maximum voltage occurs during a phase-to-earth fault on the phase which leads to the faulted phase;
.....	maximum voltage occurs during a phase-to-earth fault on the phase which lags the faulted phase;
-.-.-.-.-.-.-	maximum voltage occurs during a phase-to-earth fault on the unfaulted phases.

Figure A.5 – Relationship between R_0/X_1 and X_0/X_1 for constant values of earth fault factor k where $R_1 = 2X_1$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Annexe B
(informative)

Pratique courante

Pour les réseaux de certains pays, l'utilisation de cette norme peut conduire à établir des tableaux de valeurs convenables des parafoudres. Pour utiliser cette norme dans de tels pays, des tableaux contenant ces caractéristiques peuvent être ajoutés à cette annexe B, sans s'éloigner de cette norme.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Annex B
(informative)

Current practice

For the power supply systems within some countries the application of this standard may result in tables of consistently used surge arrester characteristics. For the use of this standard within such countries, tables containing these characteristics may be added to this annex B, without deviating from the standard.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Annexe C
(informative)

Bibliographie

[1] J. Elovaara, K. Foremann, A. Schei, O. Völcker: *Parafoudres à oxyde métallique dans les réseaux alternatifs. Partie 3: Surtensions temporaires et contraintes associées sur les parafoudres à oxyde métallique.*

ELECTRA 128 (1989) 114 ... 125

[2] A.R. Hileman, J. Roguin, K.-H. Weck: *Parafoudres à oxyde métallique dans les réseaux alternatifs. Partie 5: Performances de protection des parafoudres à oxyde métallique*.

ELECTRA 133 (1990) 132 ... 144

[3] L. Stenström: *Parafoudres à oxyde métallique dans les réseaux alternatifs. Partie 6: Sélection des caractéristiques des parafoudres à oxyde métallique*.

ELECTRA 133 (1990) 146 ... 165

[4] A. Schei, A. Ekström: *Stresses on metal-oxide surge arresters in HVAC and HVDC systems by temporary and transient overvoltages and related tests*.

CIGRE 1986, Rapport 33-13

[5] L.J. Sparrow, R.M. Doone, *Design and Experience with a Polymeric Housed HV Surge Arrester,* Atelier SEE sur les parafoudres à enveloppe synthétique, Nice, 1992.

[6] A. Bargigia, M. de Nigris, C. Masetti, *Most Recent Developments in Surge Arrester Testing,* Proc. 56e Conférence Internationale des Clients Doble, Boston, Avril, 1989.

[7] S. Qin, *The Application of the Mathematical Method for Measurement of the Resistive Current of ZnO,* 9e Colloque International sur la Haute Tension, Graz, Autriche, 1995.

[8] *Apparatus for detecting degradation of an arrester*, Spécification Européenne de Brevet No. 0 228 153 B1.

[9] *Monitoring Equipment for the Gas-Insulated Power Apparatus*, Revue Fuji Electric, Vol. 40, No. 2.

[10] J.S. Kresge, E.C. Sakshaug: *Discussion concernant la référence* [12].

[11] S. Shirakawa, F. Endo, H. Kitajima, S. Kobayashi, K. Kurita, K. Goto, M. Sakai, *Maintenance of Surge Arrester by a Portable Leakage Current Detector*, IEEE Trans. dans PWRD, Vol. 3, No. 3, Juillet 1988.

[12] J. Lundquist, L. Stenström, A. Schei, B. Hansen, *New Method for Measurement of the Resistive Leakage Currents of Metal-Oxide Surge Arresters in Service*, IEEE Trans. dans PWRD, Vol. 5, No. 4, Novembre 1990.

[13] A. Schei, B. Hansen, K. Karijord, *Resistive Leakage Current Measurements on Metal Oxide Surge Arresters in Service – Measuring Equipment and Results from Measurements in 145 kV and 300 kV Stations*, Rapport No. 140-01, Colloque Cigré, Berlin, 1993.

[14] *Maintenance Devices for Surge Arresters*, Revue Meiden, No. 3, 1989.

[15] L.T. Coffeen, J.E. McBride, *High Voltage AC Resistive Current Measurements using a Computer Based Digital Watts Technique*, IEEE Trans. dans PWRD Vol. 6, No. 2, Avril 1991.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Annex C
(informative)

Bibliography

[1] J. Elovaara, K. Foremann, A. Schei, O. Völcker: *Metal-oxide surge arresters in a.c. systems. Part 3: Temporary overvoltages and their stresses on metal-oxide surge arresters.*

ELECTRA 128 (1989) 114 ... 125

[2] A.R. Hileman, J. Roguin, K.-H. Weck: *Metal-oxide surge arresters in a.c. systems. Part 5: Protection performance of metal-oxide surge arresters*.

ELECTRA 133 (1990) 132 ... 144

[3] L. Stenström: *Metal-oxide surge arresters in a.c. systems. Part 6: Selection of metal-oxide surge arresters from the standards*.

ELECTRA 133 (1990) 146 ... 165

[4] A. Schei, A. Ekström: *Stresses on metal-oxide surge arresters in HVAC and HVDC systems by temporary and transient overvoltages and related tests*.

CIGRE 1986, Rapport 33-13

[5] L.J. Sparrow, R.M. Doone*, Design and Experience with a Polymeric Housed HV Surge Arrester,* SEE Workshop on Synthetic Housed Arresters, Nice, 1992.

[6] A. Bargigia, M. de Nigris, C. Masetti, *Most Recent Developments in Surge Arrester Testing*, Proc. 56th Int. Conf. of Doble Clients, Boston, April, 1989.

[7] S. Qin, *The Application of the Mathematical Method for Measurement of the Resistive Current of ZnO*, 9th International Symposium on High Voltage Engineering, Graz, Austria, 1995.

[8] *Apparatus for detecting degradation of an arrester*, European Patent Specification No. 0 228 153 B1.

[9] *Monitoring Equipment for the Gas-Insulated Power Apparatus*, Fuji Electric Review, Vol. 40, No. 2.

[10] J.S. Kresge, E.C. Sakshaug: *Discussion to Reference* [12].

[11] Shirakawa, F. Endo, H. Kitajima, S. Kobayashi, K. Kurita, K. Goto, M. Sakai, *Maintenance of Surge Arrester by a Portable Leakage Current Detector*, IEEE Trans. on PWRD, Vol. 3, No. 3, July 1988.

[12] J. Lundquist, L. Stenström, A. Schei, B. Hansen, *New Method for Measurement of the Resistive Leakage Currents of Metal-Oxide Surge Arresters in Service*, IEEE Trans. on PWRD, Vol. 5, No. 4, November 1990.

[13] A. Schei, B. Hansen, K. Karijord, *Resistive Leakage Current Measurements on Metal Oxide Surge Arresters in Service – Measuring Equipment and Results from Measurements in 145 kV and 300 kV Stations*, Report No. 140-01, Cigré Symposium, Berlin, 1993.

[14] *Maintenance Devices for Surge Arresters,* Meiden Review, No. 3, 1989.

[15] L.T. Coffeen, J.E. McBride, *High Voltage AC Resistive Current Measurements using a Computer Based Digital Watts Technique,* IEEE Trans. on PWRD Vol. 6, No. 2, April 1991.

———————

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

ISBN 2-8318-5066-5



ICS 29.120.50; 29.240.10

Typeset and printed by the IEC Central Office
GENEVA, SWITZERLAND

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS

Not for Resale