

**COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE**  
(affiliée à l'Organisation Internationale de Normalisation — ISO)  
**NORME DE LA CEI**

**INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION**  
(affiliated to the International Organization for Standardization — ISO)  
**IEC STANDARD**

**Publication 71-2**  
Deuxième édition — Second edition  
1976

---

**Coordination de l'isolement**  
**Deuxième partie Guide d'application**

---

**Insulation co-ordination**  
**Part 2: Application Guide**

---



Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved  
Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale  
1, rue de Varembe  
Genève, Suisse

## Révision de la présente publication

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

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

- **Bulletin de la CEI**
- **Rapport d'activité de la CEI**  
Publié annuellement
- **Catalogue des publications de la CEI**  
Publié annuellement

## Terminologie utilisée dans la présente publication

Seuls sont définis ici les termes spéciaux se rapportant à la présente publication

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

## Symboles graphiques et littéraux

Seuls les symboles graphiques et littéraux spéciaux sont inclus dans la présente publication

Le recueil complet des symboles graphiques approuvés par la CEI fait l'objet de la Publication 117 de la CEI

Les symboles littéraux et autres signes approuvés par la CEI font l'objet de la Publication 27 de la CEI

## Autre publication de la CEI établie par le même Comité d'Etudes

Publication n° 71-1: Coordination de l'isolement, Première partie: Termes, définitions, principes et règles

## Revision 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 on the work of revision, the issue of revised editions and amendment sheets may be obtained from IEC National Committees and from the following IEC sources:

- **IEC Bulletin**
- **Report on IEC Activities**  
Published yearly
- **Catalogue of IEC Publications**  
Published yearly

## Terminology used in this publication

Only special terms required for the purpose of this publication are defined herein

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

## Graphical and letter symbols

Only special graphical and letter symbols are included in this publication

The complete series of graphical symbols approved by the IEC is given in IEC Publication 117

Letter symbols and other signs approved by the IEC are contained in IEC Publication 27

## Other IEC publication prepared by the same Technical Committee

Publication No 71-1: Insulation co-ordination, Part 1: Terms, definitions, principles and rules

# COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

(affiliée à l'Organisation Internationale de Normalisation — ISO)

NORME DE LA CEI

# INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

(affiliated to the International Organization for Standardization — ISO)

IEC STANDARD

## Publication 71-2

Deuxième édition — Second edition

1976

---

### Coordination de l'isolement

Deuxième partie Guide d'application

---

### Insulation co-ordination

Part 2: Application Guide

---



Droits de reproduction réservés — Copyright all rights reserved

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

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

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale

1, rue de Varembe

Genève, Suisse

## SOMMAIRE

|                                                                                                                                                                               | Pages |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| PRÉAMBULE                                                                                                                                                                     | 4     |
| PRÉFACE                                                                                                                                                                       | 4     |
| SECTION UN — DOMAINE D'APPLICATION ET RÉFÉRENCE AUX PUBLICATIONS EXISTANTES DE LA CEI                                                                                         |       |
| Articles                                                                                                                                                                      |       |
| 1 Domaine d'application                                                                                                                                                       | 6     |
| 2 Référence aux publications existantes de la CEI                                                                                                                             | 6     |
| SECTION DEUX — CONTRAINTES DE TENSION EN SERVICE                                                                                                                              |       |
| 3 Généralités                                                                                                                                                                 | 8     |
| 4 Tensions à fréquence industrielle                                                                                                                                           | 10    |
| 5 Surtensions temporaires                                                                                                                                                     | 10    |
| 6 Surtensions de manœuvre et de foudre                                                                                                                                        | 14    |
| 7 Détermination des niveaux de surtension à prévoir                                                                                                                           | 18    |
| SECTION TROIS — TENUE DES ISOLATIONS                                                                                                                                          |       |
| 8 Généralités                                                                                                                                                                 | 22    |
| 9 Propriétés de l'isolation en présence des tensions à fréquence industrielle et des surtensions temporaires                                                                  | 24    |
| 10 Probabilité de décharge disruptive d'une isolation soumise à des chocs de tension                                                                                          | 24    |
| 11 Appareils comportant des enroulements                                                                                                                                      | 30    |
| SECTION QUATRE — DISPOSITIFS DE PROTECTION                                                                                                                                    |       |
| 12 Généralités                                                                                                                                                                | 30    |
| 13 Parafoudres à résistance variable (non linéaire)                                                                                                                           | 30    |
| 14 Parafoudres à expulsion                                                                                                                                                    | 32    |
| 15 Éclateurs                                                                                                                                                                  | 34    |
| 16 Application des différents types de dispositifs de protection                                                                                                              | 36    |
| SECTION CINQ — COORDINATION ENTRE CONTRAINTES ET TENUE<br>CONSIDÉRATIONS COMMUNES AUX GAMMES A, B ET C                                                                        |       |
| 17 Détermination de l'isolation en fonction de la tension de service à fréquence industrielle et des surtensions temporaires Problèmes de pollution et de vieillissement      | 38    |
| 18 Pollution                                                                                                                                                                  | 38    |
| 19 Vieillissement                                                                                                                                                             | 40    |
| SECTION SIX — COORDINATION ENTRE CONTRAINTES ET TENUE DANS LA GAMME DE TENSIONS A                                                                                             |       |
| 20 Choix de la tension de tenue nominale à fréquence industrielle                                                                                                             | 40    |
| 21 Choix de la tension de tenue nominale aux chocs de foudre                                                                                                                  | 40    |
| SECTION SEPT — COORDINATION ENTRE CONTRAINTES ET TENUE DANS LA GAMME DE TENSIONS B                                                                                            |       |
| 22 Choix de la tension de tenue nominale à fréquence industrielle et de la tension de tenue nominale aux chocs de foudre                                                      | 50    |
| SECTION HUIT — COORDINATION ENTRE CONTRAINTES ET TENUE DANS LA GAMME DE TENSIONS C                                                                                            |       |
| 23 Détermination de l'isolation en fonction de la tension à fréquence industrielle et des surtensions temporaires                                                             | 52    |
| 24 Détermination de l'isolation en fonction des surtensions de manœuvre et des surtensions de foudre                                                                          | 52    |
| 25 Organigramme de la détermination et de la coordination de l'isolement d'une installation électrique                                                                        | 60    |
| ANNEXE A — Transmission des surtensions à travers les transformateurs                                                                                                         | 66    |
| ANNEXE B — Validité des essais des articles 52, 53 et 54 de la Publication 71-1 de la CEI                                                                                     | 76    |
| ANNEXE C — Évaluation statistique de la protection réalisée par éclateurs                                                                                                     | 82    |
| ANNEXE D — Exemples d'application                                                                                                                                             | 88    |
| ANNEXE E — Distances dans l'air entre les parties conductrices sous tension et les structures mises à la terre donnant une tension spécifiée de tenue aux chocs par temps sec | 92    |
| TABLEAUX                                                                                                                                                                      | 94    |
| FIGURES                                                                                                                                                                       | 106   |

## CONTENTS

|                                                                                                                                                        |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| FOREWORD                                                                                                                                               | Page<br>5 |
| PREFACE                                                                                                                                                | 5         |
| SECTION ONE — SCOPE AND REFERENCE TO EXISTING IEC PUBLICATIONS                                                                                         |           |
| Clause                                                                                                                                                 |           |
| 1 Scope                                                                                                                                                | 7         |
| 2 Reference to existing IEC publications                                                                                                               | 7         |
| SECTION TWO — VOLTAGE STRESSES IN SERVICE                                                                                                              |           |
| 3 General                                                                                                                                              | 9         |
| 4 Power-frequency voltages                                                                                                                             | 11        |
| 5 Temporary overvoltages                                                                                                                               | 11        |
| 6 Switching and lightning overvoltages                                                                                                                 | 15        |
| 7 Determination of expected overvoltage levels                                                                                                         | 19        |
| SECTION THREE — INSULATION WITHSTAND                                                                                                                   |           |
| 8 General                                                                                                                                              | 23        |
| 9 Insulation behaviour at power-frequency voltages and temporary overvoltages                                                                          | 25        |
| 10 Probability of disruptive discharge of insulation under impulse voltages                                                                            | 25        |
| 11 Apparatus with windings                                                                                                                             | 31        |
| SECTION FOUR — PROTECTIVE DEVICES                                                                                                                      |           |
| 12 General                                                                                                                                             | 31        |
| 13 Non-linear resistor-type surge arresters                                                                                                            | 31        |
| 14 Expulsion-type surge arresters                                                                                                                      | 33        |
| 15 Spark gaps                                                                                                                                          | 35        |
| 16 Application of different protective devices                                                                                                         | 37        |
| SECTION FIVE — CO-ORDINATION BETWEEN STRESSES AND WITHSTAND<br>CONSIDERATIONS COMMON TO RANGES A, B AND C                                              |           |
| 17 Insulation design to power-frequency operating voltage and temporary overvoltages Problems of pollution and ageing                                  | 39        |
| 18 Pollution                                                                                                                                           | 39        |
| 19 Ageing                                                                                                                                              | 41        |
| SECTION SIX — CO-ORDINATION BETWEEN STRESSES AND WITHSTAND IN VOLTAGE RANGE A                                                                          |           |
| 20 Selection of the rated power frequency withstand voltage                                                                                            | 41        |
| 21 Selection of the rated lightning-impulse withstand voltage                                                                                          | 41        |
| SECTION SEVEN — CO-ORDINATION BETWEEN STRESSES AND WITHSTAND IN VOLTAGE RANGE B                                                                        |           |
| 22 Selection of the rated power-frequency withstand voltage and the rated lightning-impulse withstand voltage                                          | 51        |
| SECTION EIGHT — CO-ORDINATION BETWEEN STRESSES AND WITHSTAND IN VOLTAGE RANGE C                                                                        |           |
| 23 Insulation design with respect to power-frequency voltage and temporary overvoltages                                                                | 53        |
| 24 Insulation design with respect to switching and lightning overvoltages                                                                              | 53        |
| 25 Block-diagram of the insulation design and co-ordination of an electrical installation                                                              | 61        |
| APPENDIX A — Surge transference through transformers                                                                                                   | 67        |
| APPENDIX B — Validity of the tests in Clauses 52, 53 and 54 of IEC Publication 71-1                                                                    | 77        |
| APPENDIX C — Statistical evaluation of the protective effect of spark gaps                                                                             | 83        |
| APPENDIX D — Examples of application                                                                                                                   | 89        |
| APPENDIX E — Clearances in air between live conductive parts and earthed structures to secure a specified impulse withstand voltage for dry conditions | 93        |
| TABLES                                                                                                                                                 | 95        |
| FIGURES                                                                                                                                                | 106       |

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

COORDINATION DE L'ISOLEMENT

Deuxième partie: Guide d'application

PRÉAMBULE

- 1) Les décisions ou accords officiels de la CEI en ce qui concerne les questions techniques, préparés par des Comités d'Etudes où sont représentés tous les Comités nationaux s'intéressant à ces questions, expriment dans la plus grande mesure possible un accord international sur les sujets examinés
- 2) Ces décisions constituent des recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux
- 3) Dans le but d'encourager l'unification internationale, la CEI exprime le vœu que tous les Comités nationaux adoptent dans leurs règles nationales le texte de la recommandation de la CEI, dans la mesure où les conditions nationales le permettent. Toute divergence entre la recommandation de la CEI et la règle nationale correspondante doit, dans la mesure du possible, être indiquée en termes clairs dans cette dernière

PRÉFACE

La présente publication a été établie par le Comité d'Etudes N° 28 de la CEI: Coordination de l'isolement

Elle constitue la deuxième partie de la Publication 71 de la CEI: Coordination de l'isolement, et remplace la Publication 71A (1962) de la CEI: Supplément à la Publication 71, Recommandations pour la coordination de l'isolement Guide d'application

Les travaux relatifs au Guide d'application furent abordés lors de la réunion tenue à Milan en 1971; les projets concernant les différentes sections du texte furent discutés au cours de la réunion tenue à Athènes en 1972. A la suite de cette réunion, le projet, document 28(Bureau Central)42, fut soumis à l'approbation des Comités nationaux suivant la Règle des Six Mois en novembre 1973

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

|                                |                         |
|--------------------------------|-------------------------|
| Afrique du Sud (République d') | Italie                  |
| Allemagne                      | Norvège                 |
| Argentine                      | Pays-Bas                |
| Australie                      | Pologne                 |
| Autriche                       | Roumanie                |
| Belgique                       | Royaume-Uni             |
| Danemark                       | Suède                   |
| Espagne                        | Suisse                  |
| Etats-Unis d'Amérique          | Turquie                 |
| Finlande                       | Union des Républiques   |
| France                         | Socialistes Soviétiques |
| Israël                         | Yougoslavie             |

Lors de la mise au point du texte en vue de la publication, il a été tenu compte des modifications entraînées par les changements apportés au texte du projet de la Publication 71-1 de la CEI. En outre, des modifications rédactionnelles suggérées par les Comités nationaux ont été introduites. Elles n'affectent pas le sens du texte original.

*Autres publications de la CEI citées dans la présente publication:*

|                      |                                                                                                      |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Publications N°s 60: | Techniques des essais à haute tension                                                                |
| 71-1:                | Coordination de l'isolement,<br>Première partie: Termes, définitions, principes et règles            |
| 99-1:                | Parafoudres,<br>Première partie: Parafoudres à résistance variable pour réseaux à courant alternatif |
| 99-1A:               | Premier complément à la Publication 99-1                                                             |
| 99-2:                | Deuxième partie: Parafoudres à expulsion                                                             |
| 282-1:               | Coupe-circuit à fusibles haute-tension,<br>Première partie: Coupe-circuit limiteurs de courant       |

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

INSULATION CO-ORDINATION

Part 2: Application Guide

FOREWORD

- 1) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, prepared by Technical Committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with
- 2) They have the form of recommendations for international use and they are accepted by the National Committees in that sense
- 3) In order to promote international unification, the IEC expresses the wish that all National Committees should adopt the text of the IEC recommendation for their national rules in so far as national conditions will permit. Any divergence between the IEC recommendation and the corresponding national rules should, as far as possible, be clearly indicated in the latter

PREFACE

This publication has been prepared by IEC Technical Committee No. 28, Insulation Co-ordination

It constitutes the second part of IEC Publication 71, Insulation Co-ordination, and supersedes IEC Publication 71A (1962): Supplement to Publication 71, Recommendations for insulation co-ordination Application Guide

Work relating to the Application Guide was first begun during the meeting held in Milan in 1971; the drafts concerning the various sections of the text were discussed during the meeting held in Athens in 1972. As a result of this meeting, the draft, Document 28(Central Office)42, was submitted to the National Committees for approval under the Six Months' Rule in November 1973.

The following countries voted explicitly in favour of publication:

|             |                            |
|-------------|----------------------------|
| Argentina   | Poland                     |
| Australia   | Romania                    |
| Austria     | South Africa (Republic of) |
| Belgium     | Spain                      |
| Denmark     | Sweden                     |
| Finland     | Switzerland                |
| France      | Turkey                     |
| Germany     | Union of Soviet            |
| Israel      | Socialist Republics        |
| Italy       | United Kingdom             |
| Netherlands | United States of America   |
| Norway      | Yugoslavia                 |

When the final text was being revised for publication, modifications stemming from changes in the text of the draft of IEC Publication 71-1 were included. Moreover, modifications in the wording suggested by the National Committees were introduced. These do not affect the meaning of the original text.

*Other IEC publications quoted in this publication:*

|                       |                                                                                     |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Publications Nos. 60: | High-voltage Test Techniques                                                        |
| 71-1:                 | Insulation Co-ordination,<br>Part 1: Terms, Definitions, Principles and Rules       |
| 99-1:                 | Lightning Arresters,<br>Part 1: Non-linear Resistor Type Arresters for A.C. Systems |
| 99-1A:                | First Supplement to Publication 99-1                                                |
| 99-2:                 | Part 2: Expulsion-type Lightning Arresters                                          |
| 282-1:                | High-voltage Fuses,<br>Part 1: Current-limiting Fuses                               |

## COORDINATION DE L'ISOLEMENT

### Deuxième partie: Guide d'application

#### SECTION UN — DOMAINE D'APPLICATION ET RÉFÉRENCE AUX PUBLICATIONS EXISTANTES DE LA CEI

##### 1 Domaine d'application

La présente publication constitue un guide pour le choix de la tenue diélectrique des matériels, des parafoudres ou éclateurs de protection et de la mesure dans laquelle il apparaît utile de limiter les surtensions de manœuvre

L'objet de la présente publication n'est pas de donner des règles à suivre strictes pour la coordination de l'isolement et les projets, mais d'indiquer dans quelle direction on doit rechercher des solutions rationnelles et économiquement justifiables

Ainsi, dans la présente publication ne seront pris en considération que certains cas généraux, étant évident que des installations dont la conception présenterait un caractère exceptionnel ou qui seraient comprises dans des réseaux de caractéristiques très particulières devront être l'objet d'études spéciales confiées à des ingénieurs expérimentés

Le présent Guide d'application est basé sur les appareils de type et de caractéristiques nominales existant à la date de sa parution. Ce guide ne sera pas considéré comme un obstacle à l'adoption d'appareils nouveaux ou présentant des caractéristiques nouvelles qui apparaîtraient et feraient leurs preuves ultérieurement

Comme la Publication 71-1, la Publication 71-2 ne concerne que l'isolement phase-terre

Comme la Publication 71-1, la Publication 71-2 traite séparément les trois gammes suivantes de tensions les plus élevées pour le matériel:

- gamme A: de 1 kV (cette valeur exclue) à moins de 52 kV;
- gamme B: de 52 kV à moins de 300 kV;
- gamme C: 300 kV et au-dessus

Elle couvre le cas des installations de tension supérieure à 1 kV, quelles que soient leur nature et leur situation, qu'elles soient ou non exposées à la foudre, mais ne traite pas des lignes aériennes. Cependant, les méthodes d'essais s'appliquent à ces dernières

##### 2 Référence aux publications existantes de la CEI

Plusieurs publications de la CEI contiennent des normes applicables respectivement aux niveaux de tenue et de protection considérés séparément. Ainsi:

- a) La Publication 71-1 de la CEI: Coordination de l'isolement, Première partie: Termes, définitions, principes et règles, donne les définitions des termes utilisés ici; elle fournit la série des valeurs normalisées des tensions de tenue nominales aux chocs de foudre et de manœuvre, les tensions de tenue nominales de courte durée à fréquence industrielle, ainsi que les tableaux contenant les combinaisons recommandées entre la tension la plus élevée pour le matériel et ces tensions de tenue nominales
- b) La Publication 99-1 de la CEI: Parafoudres, Première partie: Parafoudres à résistance variable pour réseaux à courant alternatif, indique les caractéristiques des parafoudres à résistance non linéaire relatives à la protection vis-à-vis des chocs de foudre et ce, jusqu'à une tension nominale de 198 kV. Les valeurs normalisées des tensions nominales au-dessus de 198 kV ne sont pas données dans la Publication 99-1 de la CEI. Cependant, des valeurs indicatives sont données jusqu'à 396 kV. Les valeurs relatives aux surtensions de manœuvre sont à l'étude

# INSULATION CO-ORDINATION

## Part 2: Application Guide

### SECTION ONE — SCOPE AND REFERENCE TO EXISTING IEC PUBLICATIONS

#### 1 Scope

This publication provides some guidance on the selection of the electric strength of equipment, of surge arresters or protective spark gaps, and on the extent to which it will be useful to control switching overvoltages

The object of this publication is not to give strict rules for insulation co-ordination and design, but to provide guidance toward rational and economical solutions

Therefore it is intended to consider only a few basic cases in this publication, it being evident that installations constituting exceptions to normal design, or included within systems having exceptional characteristics, will require special study by experienced engineers

This Application Guide is based on apparatus types and ratings in use at the time of publication. As new equipment and equipment characteristics are developed and proved, this guide should not be interpreted as a limit to their adoption

Like Publication 71-1, Publication 71-2 covers only phase-to-earth insulation

Like Publication 71-1, Publication 71-2 deals separately with the three following ranges of the highest voltage for equipment:

- range A: above 1 kV and less than 52 kV;
- range B: from 52 kV to less than 300 kV,
- range C: 300 kV and above

It covers installations of all kinds and in all situations involving voltages higher than 1 kV, whether or not they are exposed to lightning, with the exception of overhead lines. However, the test procedures apply also to the latter

#### 2 Reference to existing IEC publications

Several IEC publications give standards which deal respectively with the withstand and protective levels considered separately. Thus:

a) IEC Publication 71-1, Insulation Co-ordination, Part 1: Terms, Definitions, Principles and Rules, contains the definitions of terms to be found here, it gives the series of standard values of the rated lightning and switching impulse withstand voltage, the rated withstand voltages of short duration at power frequency, as well as the tables of the recommended combinations between the highest voltage for equipment and these rated withstand voltages

b) IEC Publication 99-1, Lightning Arresters, Part 1: Non-linear Resistor Type Arresters for A C Systems, gives the protective characteristics under lightning impulses of non-linear resistor type surge arresters for ratings up to 198 kV. Standard ratings above 198 kV are not included in IEC Publication 99-1. However, values for guidance are given up to 396 kV. Values for switching impulses are under consideration

Les caractéristiques figurant dans la Publication 99-1 de la CEI correspondent aux parafoudres habituellement utilisés. Cependant, il existe des parafoudres possédant de meilleures caractéristiques de protection, et leur normalisation est à l'étude. La Publication 99-1A de la CEI, Premier complément à la Publication 99-1, constitue un guide pour le choix des parafoudres.

c) La Publication 99-2 de la CEI, Parafoudres, Deuxième partie: Parafoudres à expulsion, fournit les caractéristiques au choc des parafoudres à expulsion. On ne trouve aucune référence à ce type d'appareil dans la Publication 71-1 de la CEI, mais il est encore utilisé sur quelques réseaux, en particulier pour des tensions de la gamme A.

d) La Publication 282-1 de la CEI, Coupe-circuit à fusibles haute tension, Première partie: Coupe-circuit limiteurs de courant, donne la liste des surtensions maximales admissibles lors de la coupure d'un courant de défaut par un fusible à haute tension.

e) La Publication 60 de la CEI, Technique des essais à haute tension, décrit les méthodes à employer pour produire et mesurer les tensions et les courants d'essais ainsi que les techniques d'essais appropriées, elle recommande les méthodes à employer pour l'étalonnage et le contrôle des appareils de mesure.

Il n'existe aucune publication de la CEI en ce qui concerne les caractéristiques de protection des éclateurs.

## SECTION DEUX — CONTRAINTES DE TENSION EN SERVICE

### 3 Généralités

Les contraintes diélectriques sur les isolants peuvent être classées de la façon suivante:

- tensions à fréquence industrielle, dans les conditions normales d'exploitation,
- surtensions temporaires;
- surtensions de manœuvre;
- surtensions de foudre.

Dans la Publication 71-1 de la CEI, les surtensions sont classées non pas selon leur cause, mais selon la forme de l'onde de tension, forme qui détermine les effets sur les isolations et les dispositifs de protection.

Le terme « surtensions temporaires » désigne les surtensions entretenues ou les surtensions ayant plusieurs crêtes successives, avec un décrément de l'amplitude tel qu'elles soient comparables à des surtensions entretenues à fréquence industrielle ou à fréquence harmonique.

Les termes « surtensions de manœuvre » ou « surtensions de foudre » désignent les surtensions telles que seule la valeur de crête la plus élevée soit normalement à retenir, et qui peuvent être assimilées en ce qui concerne leurs effets sur les isolations et les dispositifs de protection respectivement aux chocs de manœuvre normalisés (à front lent) ou aux chocs de foudre normalisés (à front raide) utilisés pour les besoins des essais. Les appellations ci-dessus ont été choisies parce que ces deux types de surtensions sont souvent, mais pas toujours, provoqués respectivement par des manœuvres dans le réseau ou par des coups de foudre.

Par exemple, la mise sous tension d'une ligne connectée à un transformateur engendre une surtension qui peut être regardée comme « de manœuvre » ou temporaire selon le décrément des crêtes successives (c'est-à-dire suivant les paramètres du circuit). Autre exemple: un défaut phase-terre, bien qu'il soit de la catégorie des manœuvres (le phénomène est le même que si un disjoncteur met une phase à la terre), peut donner naissance à des surtensions à front raide semblables à des surtensions dues à la foudre, à l'opposé, une onde de foudre traversant un transformateur du fait du couplage magnétique entre les enroulements, peut être la cause sur le secondaire du transformateur d'ondes à front lent, semblables à celles dues à des manœuvres.

The characteristics given in IEC Publication 99-1 refer to surge arresters in general use. However, surge arresters with better protective characteristics are available and their standardization is at present under consideration. IEC Publication 99-1A, First Supplement to Publication 99-1, gives guidance on the selection of surge arresters.

c) IEC Publication 99-2, Lightning Arresters, Part 2: Expulsion-type Lightning Arresters, gives the impulse characteristics of expulsion-type surge arresters. No reference is made in IEC Publication 71-1 to this type of arrester, but it is still being used on some supply systems, particularly for voltages in range A.

d) IEC Publication 282-1, High-voltage Fuses, Part 1: Current-limiting Fuses, lists the maximum overvoltages permitted during the interruption of fault current by a high-voltage fuse.

e) IEC Publication 60, High-voltage Test Techniques, describes the methods for generation and measurement of test voltages and currents and the appropriate test procedures, and recommends methods for calibration and checking of measuring devices.

There is no IEC publication for the protective characteristics of spark-gaps.

## SECTION TWO — VOLTAGE STRESSES IN SERVICE

### 3 General

Dielectric stresses on insulation may be classified as follows:

- power-frequency voltages, under normal operating conditions,
- temporary overvoltages;
- switching overvoltages;
- lightning overvoltages.

In IEC Publication 71-1, overvoltages are classified with reference to the shape of the voltage wave which determines their effect on insulation and on protective devices, without reference to the cause of the overvoltages.

The term “temporary overvoltages” refers to sustained overvoltages, or to overvoltages having several successive peaks, with a decrement of amplitude such as to be comparable with a sustained overvoltage at power frequency or at harmonic frequency.

The terms “switching overvoltages” or “lightning overvoltages” refer to overvoltages for which only the highest peak value has to be considered and which can be represented, with regard to their effects on insulation and protective devices, by the long-fronted standard switching impulses or short-fronted standard lightning impulses used for test purposes. The foregoing names have been chosen because such overvoltages often—but not always—originate from switching operations or lightning discharges.

For example, the energization of a transformer-terminated line gives rise to an overvoltage that may be regarded as a “switching” or temporary overvoltage depending on the decrement of the successive peaks (i.e. depending on the circuit parameters). As another example: a phase-to-earth fault, although actually a switching operation (the same phenomenon would arise if a phase conductor was connected to earth by a circuit-breaker operation), may give rise to steep-front overvoltages, similar to those due to lightning; on the other hand, a lightning surge transferred through a transformer by inductive coupling between windings may produce on the secondary side of the transformer long-fronted waves, similar to those due to switching operations.

## 4 Tensions à fréquence industrielle

Dans les études de coordination de l'isolement, les surtensions et les chocs de tension étant définis par la valeur de crête de la tension entre phase et terre, il est commode d'utiliser la valeur de crête entre phase et terre de la tension de service du réseau, laquelle est  $\sqrt{2}/\sqrt{3} = 0,816$  fois la tension efficace entre phases habituellement utilisée

Dans des conditions normales d'exploitation, la tension à fréquence industrielle peut varier quelque peu en amplitude et on peut décrire cette variation par une loi de distribution probabiliste autour de la valeur moyenne de la tension d'exploitation. Les paramètres de cette loi diffèrent d'un point à un autre du réseau. En ce qui concerne la détermination et la coordination de l'isolement, la tension à fréquence industrielle est supposée toutefois constante et égale à la tension la plus élevée pour le matériel, tension qui, dans la gamme C de tensions ne diffère pratiquement pas de la tension la plus élevée du réseau, avec par conséquent une valeur de crête entre phase et terre de  $U_m \sqrt{2}/\sqrt{3}$

Dans les gammes A et B jusqu'à 72,5 kV, la tension la plus élevée pour le matériel peut être sensiblement supérieure à la tension la plus élevée du réseau, comme cela est indiqué dans la note de l'article 5 de la Publication 71-1 de la CEI. Pour les besoins de la normalisation, on suppose toutefois que l'isolation du matériel doit toujours être capable de se comporter correctement à la tension la plus élevée pour le matériel du niveau immédiatement supérieur, sinon égal, à la tension la plus élevée du réseau

## 5 Surtensions temporaires

La sévérité des surtensions temporaires est principalement caractérisée à la fois par leur amplitude et leur durée

L'importance des surtensions temporaires, en ce qui concerne la coordination de l'isolement, est double:

- d'une part, les caractéristiques des surtensions temporaires là où est installé le parafoudre présentent une grande importance pour son choix,
- d'autre part, la répétition de crêtes de surtensions successives de polarités opposées, même si ces crêtes n'atteignent pas l'amplitude de certaines autres surtensions, peut être déterminante pour la conception tant de l'isolation interne des matériels que de leur isolation externe (surfaces exposées à la pollution)

Les surtensions temporaires proviennent généralement:

- a) de défauts à la terre;
- b) de variations brusques de charge;
- c) de phénomènes de résonance et de ferrorésonance

### 5.1 Défauts à la terre

La surtension à fréquence industrielle sur les phases saines, lorsqu'une autre phase est mise accidentellement à la terre, dépend, en un point particulier du réseau, de la situation du neutre du réseau par rapport à la terre, telle qu'elle est caractérisée par le facteur de défaut à la terre en ce point

*Note* — Dans l'évaluation des facteurs de défaut à la terre, il faut tenir compte des remarques suivantes:

- Généralement, dans le calcul de ce facteur en un point donné on suppose, pour simplifier, que le défaut est situé en ce même point; cependant, dans certains cas particuliers, il peut être souhaitable d'étudier l'influence d'autres emplacements de défaut sur ce facteur
- En théorie, il y a autant de valeurs particulières du facteur de défaut à la terre en un point donné qu'il y a de configurations différentes possibles pour le réseau. Le facteur caractéristique au point considéré est la plus élevée des valeurs correspondant aux différentes configurations du réseau qui peuvent se présenter en pratique
- Les configurations de réseau qui doivent être prises en considération sont celles qui existent durant le défaut; ainsi, il faut prendre en considération les changements dans le réseau qui sont provoqués par le défaut lui-même, par exemple du fait du fonctionnement des disjoncteurs
- Pour de nombreux réseaux, il peut être suffisant de retenir une valeur unique du facteur de défaut à la terre, qui couvre toutes les possibilités de situation du défaut dans le réseau
- L'attention est attirée sur le fait que la tension la plus élevée à fréquence industrielle qui peut apparaître sur une phase saine au cours d'un défaut à la terre particulier, ne dépend pas seulement de la valeur du facteur de défaut à la terre, mais aussi de la valeur de la tension entre phases au moment du défaut. Cette tension entre phases est généralement prise égale à la tension

## 4 Power-frequency voltages

In insulation co-ordination processes, since overvoltages and impulse voltages are defined in terms of their peak values to earth, it is also convenient to make use of the phase-to-earth peak value of the system voltage, which is  $\sqrt{2}/\sqrt{3} = 0.816$  times the usual r m s phase-to-phase voltage

Under normal operating conditions, power-frequency voltage can be expected to vary somewhat in magnitude and may be described by means of a probability distribution about the average operating value. The parameters of this distribution will differ from one point of the system to another. For purposes of insulation design and co-ordination, power-frequency voltage should however be considered as constant and equal to the highest voltage for equipment, which in voltage range C does not materially differ from the highest system voltage, with a phase-to-earth peak value of  $U_m \sqrt{2}/\sqrt{3}$

In range A and in range B up to 72.5 kV, the highest voltage for equipment may be substantially higher than the highest system voltage, as indicated in the note under Clause 5 of IEC Publication 71-1. For the sake of standardization, it is however assumed that equipment insulation will always be able to operate satisfactorily at the highest voltage for equipment immediately above, if not equal to, the highest system voltage.

## 5 Temporary overvoltages

The severity of temporary overvoltages is mainly characterized both by their amplitude and duration.

The importance of temporary overvoltages in insulation co-ordination is twofold:

- on the one hand, the characteristics of temporary overvoltages at the surge arrester location are of great importance in surge arrester selection;
- on the other hand, the repetition of successive overvoltage peaks of opposite polarity, even if of lower amplitude than some other overvoltages, may determine the design of both the internal insulation of equipment as well as the external insulation (surfaces exposed to contamination).

Temporary overvoltages generally arise from:

- a) earth faults;
- b) sudden changes of load;
- c) resonance and ferro-resonance.

### 5.1 Earth faults

The overvoltage at power frequency on the sound phases when another phase is accidentally earthed depends, at a given point of the system, on the treatment of the system neutral with respect to earth, as characterized by its earth fault factor at that point.

**Note** — In the evaluation of earth fault factors, the following remarks should be considered:

- In general, in order to evaluate this factor at a given location it is assumed, for simplicity, that the fault is located at the point for which the factor is desired; but, in some special cases, it may be desirable to investigate the effect of other fault locations on this factor.
- In principle, there are as many particular values of the earth fault factor at a given location as different possible configurations of the system. The factor which characterizes the location considered is the highest of the values that correspond to the different system configurations which may occur in practice.
- The system configurations which have to be considered are those which exist during a fault; thus one should take into consideration those changes in the system which may be produced by the fault itself, for example, on account of the operation of circuit-breakers.
- For many systems, it will be sufficient to consider only one value of the earth fault factor which covers all possible fault locations on the system.
- Attention is drawn to the fact that the highest voltage at power frequency which may appear on a sound phase during a particular earth fault does not depend only on the value of the earth fault factor, but also on the value of the phase-to-phase voltage at the time of the fault. This phase-to-phase voltage will generally be taken as the highest system voltage, as given in

la plus élevée du réseau telle qu'elle résulte de la définition 4 de la Publication 71-1 de la CEI; mais dans certains cas, en vue de prévoir le fonctionnement des dispositifs de protection et de déterminer leurs caractéristiques, il est nécessaire de prendre en compte une valeur plus élevée de la tension entre phases qui peut apparaître au point considéré dans des conditions anormales de fonctionnement non retenues dans la définition rappelée ci-dessus

De nombreux réseaux ou installations appartenant à la gamme A et certains appartenant à la gamme B fonctionnent avec leur neutre mis à la terre à travers une impédance de valeur élevée ou une bobine d'extinction, ou encore avec leur neutre isolé. En ce qui concerne la coordination de l'isolement, on doit alors particulièrement prendre garde aux facteurs de défaut à la terre.

Indépendamment du facteur de défaut à la terre, des surtensions de valeur particulièrement élevée peuvent se produire sur les réseaux appartenant aux gammes A et B en cas de:

- a) défaut à la terre sur réseau à neutre à la terre par bobine d'extinction lorsque le circuit est sous-compensé;
- b) arcs intermittents à la terre sur réseau à neutre isolé et parfois sur réseau à neutre à la terre par bobine d'extinction

## 5.2 Variations brusques de charge

Dans les conditions d'exploitation usuelles, la tension entre phases ne dépasse pas la valeur de la tension la plus élevée du réseau telle qu'elle est donnée à l'article 4 concernant les définitions de la Publication 71-1 de la CEI, mais des valeurs plus élevées peuvent être temporairement atteintes en cas de coupure brusque de charges actives et réactives importantes, ces valeurs dépendent de la structure du réseau après perte des charges et des caractéristiques des sources (puissance de court-circuit au poste, régulation de vitesse et de tension des alternateurs, etc.)

De telles montées en tension peuvent être particulièrement importantes en cas de coupure de charge à l'extrémité d'une ligne longue (à cause de l'effet Ferranti). Elles concernent principalement l'appareillage situé côté source par rapport au disjoncteur ouvert à l'autre extrémité.

*Note* — En ce qui concerne les surtensions, il faut tenir compte des différents types de structures de réseau. Les cas extrêmes sont les suivants: structures comprenant des lignes relativement courtes, avec des puissances de court-circuit élevées aux postes d'extrémité; structures comprenant des lignes longues avec des puissances de court-circuit de valeur faible du côté source. Avec ces dernières structures, que l'on rencontre normalement dans les premières étapes du développement d'un réseau à très haute tension, il peut se produire des surtensions à fréquence industrielle plus élevées, si une charge importante est brusquement coupée.

Les caractéristiques des réseaux font que les surtensions de ce type sont plus sévères dans la gamme de tensions C que dans la gamme B, pour ce qui est de la gamme A, les surtensions de ce type apparaissent dans les circuits comprenant alternateur et transformateur.

## 5.3 Résonance et ferrorésonance

Les surtensions temporaires dues à ces causes apparaissent généralement à la fermeture de circuits absorbant une forte puissance capacitive (lignes, câbles, lignes avec compensation série) et possédant des inductances non linéaires (transformateurs, réactances shunt) ou à la suite de variations brusques de charge.

Ces situations se rencontrent généralement pour les réseaux des gammes B et C dans les cas suivants:

- a) Une ligne faiblement chargée, alimentée ou terminée par un transformateur, peut par exemple être le siège d'oscillations harmoniques et de surtensions notables, si la fréquence naturelle du réseau correspondant à ses éléments linéaires est égale à l'un des harmoniques du courant magnétisant des transformateurs.
- b) Des oscillations et des surtensions subharmoniques peuvent apparaître dans les réseaux compensés par condensateurs séries avec des lignes fermées sur des transformateurs de puissance peu chargés ou des réactances shunt dans le cas où la tension appliquée, la résistance effective du circuit, pour laquelle il faut tenir compte de la présence des machines synchrones, et la capacitance du circuit ont des valeurs comprises entre certaines limites.
- c) Lorsque des filtres d'harmoniques sont connectés à un réseau comportant des éléments saturables, des oscillations dues à des résonances entre ces éléments et les condensateurs des filtres peuvent se développer.

Definition 4 of IEC Publication 71-1; but, in some cases, in order to predict the operation of protective devices and specify their characteristics, it is necessary to take into account the increased value of the phase-to-phase voltage that may appear at the selected location under abnormal operating conditions not covered by the definition referred to above

Within range A and in some cases within range B, many systems or installations are operated with their neutral earthed through a high impedance, an arc-suppression coil or with their neutral isolated. For the purpose of insulation co-ordination, particular attention must therefore be paid in these cases to the earth fault factor

Independently of the earth fault factor, particularly high overvoltages may arise in range A and range B systems in the case of:

- a) earth faults in a system the neutral of which is earthed through an arc-suppression coil when the circuit is under-compensated,
- b) arcing earth faults in a system the neutral of which is isolated and in some cases in a system the neutral of which is earthed through an arc-suppression coil

## 5.2 Sudden changes of load

In usual conditions of operation, the phase-to-phase voltage does not exceed the value of the highest voltage of the system as given by Clause 4 concerning definitions of IEC Publication 71-1, but higher values may temporarily be reached in the case of sudden disconnection of large active and reactive loads, these values depend on the system layout after disconnection and on the characteristics of the sources (short-circuit power at the station, speed and voltage regulation of the generators, etc.)

This voltage rise may be especially important in the case of load rejection at the remote end of a long line (Ferranti effect). It affects mainly the apparatus at the station connected on the source side of the remote open circuit-breaker

*Note* — From the point of view of overvoltages, a distinction should be made between various types of system layouts. As extreme cases we can consider: those with relatively short lines and high values of the short-circuit power at the terminal stations; and those with long lines and low values of the short-circuit power at the generating site. With the latter layouts, as are usual in an extra-high-voltage system in its initial stage, much higher overvoltages at power frequency may result when a large load is suddenly disconnected

Due to the characteristics of the systems, overvoltages of this kind are more severe in voltage range C than in voltage range B; overvoltages of this kind, in voltage range A, occur in generator-transformer circuits

## 5.3 Resonance and ferro-resonance

Temporary overvoltages due to these causes generally arise when circuits with large capacitive elements (lines, cables, series-compensated lines) and inductive elements (transformers, shunt reactors) having non linear-magnetizing characteristics are energized, or as a result of sudden changes of load

These situations are generally found for systems in ranges B and C in the following cases:

- a) A lightly loaded line, fed or terminated by a transformer, can show for example harmonic oscillations and pronounced overvoltages if the natural frequency of the linear part of the system corresponds to one of the harmonics of the transformer magnetizing current
- b) Subharmonic oscillations and overvoltages can occur in systems compensated by series capacitors and terminated by lightly loaded power transformers or shunt reactors if the impressed voltage, the effective circuit resistance, which is strongly influenced by synchronous machines, and the circuit capacitance fall between certain limits
- c) If harmonic filters are connected to a system containing saturable elements, oscillations due to resonances between these elements and the filter capacitors can develop

Ces phénomènes de ferrorésonance provoqués par le régime transitoire de fermeture du circuit peuvent être de caractère permanent ou durer pendant plusieurs périodes à fréquence industrielle, en fonction de la constante de temps du courant de mise sous tension du transformateur

Sur les réseaux de la gamme A, les causes de résonance et de ferrorésonance sont:

- d) Résonance entre des impédances inductives et capacitives, par exemple lorsqu'on utilise des condensateurs pour l'amélioration du facteur de puissance
- e) Ferrorésonance due à la fermeture ou l'ouverture non simultanée des phases d'un transformateur dont le secondaire n'a qu'une faible charge capacitive
- f) Ferrorésonance apparaissant sur un transformateur sur le secondaire duquel est branchée une charge inductive à noyau de fer, telle qu'un transformateur de tension, particulièrement sur manœuvre d'enclenchement
- g) Ferrorésonance apparaissant lorsque est ouverte une phase d'un circuit alimentant un transformateur dont le primaire n'est pas à la terre, en particulier s'il s'agit d'un circuit de câbles. Pour les valeurs les plus élevées de tension dans la gamme A, la capacité de la traversée du transformateur peut suffire à provoquer la ferrorésonance dans ces conditions

## 6 Surtensions de manœuvre et de foudre

Dans le présent Guide, on désigne sous le nom de surtensions de manœuvre celles qui peuvent être assimilées à un choc de manœuvre de forme normalisée, c'est-à-dire à une onde apériodique dont le front a une durée de l'ordre de quelques centaines de microsecondes et la queue de l'ordre de milliers de microsecondes. Elles exercent des contraintes diélectriques sur les différentes parties d'une isolation sensiblement dans la même proportion que les tensions à fréquence industrielle, mais ne sont pas répétitives et, en général, n'est à prendre en considération que la valeur d'une seule crête de l'une ou l'autre polarité.

Les surtensions de foudre sont celles que l'on peut assimiler à un choc de foudre de forme normalisée, c'est-à-dire une onde apériodique dont le front a une durée de l'ordre de la microseconde et la queue de l'ordre de quelques dizaines de microsecondes. Du fait de la raideur de leur front, elles exercent des contraintes diélectriques plus fortes que les précédentes sur l'isolation longitudinale des enroulements inductifs, mais du fait de leur courte durée, les contraintes qu'elles exercent sont en général mieux supportées, à amplitude égale, par une isolation donnée. Toutefois, cet effet est plus ou moins notable suivant la nature de l'isolation.

Ces surtensions proviennent en général:

- a) de l'enclenchement et du réenclenchement d'une ligne;
- b) de défauts et d'extinction de défauts;
- c) de coupure de courants capacitifs et de courants inductifs moyens ou faibles;
- d) de la perte d'une charge,
- e) de coups de foudre (première composante ou composantes suivantes d'un coup de foudre)

*Note* — Pour les cas a) à d), les surtensions dépendent des caractéristiques du matériel, spécialement des disjoncteurs, des transformateurs et des réactances shunt. Elles peuvent généralement être réduites grâce à un choix judicieux de ces caractéristiques, par exemple dans le cas a), en utilisant des résistances d'insertion ou des réactances shunt, et dans le cas c), à l'aide de parafoudres placés entre le disjoncteur et le transformateur.

### 6.1 Surtensions de manœuvre dues à l'enclenchement et au réenclenchement

Les surtensions dues à l'enclenchement et au réenclenchement monophasé ou triphasé présentent une grande importance pour le choix de l'isolement du réseau dans la gamme C.

Pour les autres gammes de tension, sauf cas particulier, ces surtensions présentent moins d'importance.

### 6.2 Surtensions de manœuvre dues à des défauts et à leur extinction

Pour la gamme A et pour certains cas peu nombreux de la gamme B dans les conditions énumérées aux points a) et b) du paragraphe 5.1, des surtensions de manœuvre importantes peuvent apparaître à la naissance du défaut.

These ferro-resonance effects following energization processes can either be sustained or last several cycles of the power frequency depending on the time constant of transformer inrush currents

Causes of resonance and ferro-resonance in systems of range A are:

- d) Resonance between inductive and capacitive components, e.g. when capacitors are used for power-factor correction
- e) Ferro-resonance which can occur in non-simultaneous closure or disconnection of the phases of a transformer the secondary of which is loaded by a small capacitance only
- f) Ferro-resonance occurring on a transformer having on the secondary side an iron-cored inductive load such as a voltage transformer, particularly when being switched in
- g) Ferro-resonance which can occur when one phase of a circuit supplying an unearthed primary transformer is opened particularly if the circuit is a cable. At the highest end of range A, transformer bushing capacitance may be sufficient to cause ferro-resonance under these conditions

## 6 Switching and lightning overvoltages

For the purpose of this Guide, switching overvoltages are, as stated above, of a type which can be simulated by a standard switching impulse, i.e. an aperiodic wave with a front duration of the order of hundreds of microseconds and a tail duration of the order of thousands of microseconds. They stress the various parts of an insulation in about the same proportions as power-frequency voltages, but are not repetitive and only one peak of either polarity is normally significant.

Lightning overvoltages are those which can be simulated by a standard lightning impulse, i.e. an aperiodic wave with a front duration of the order of one microsecond and a tail duration of the order of several tens of microseconds. Due to the front steepness, they stress more than the former the longitudinal insulation of inductive windings, and because of their shorter duration, a generally somewhat higher stress at equal amplitude can be withstood by a given insulation. The magnitude of this effect depends on the type of insulation being considered.

These overvoltages generally arise from:

- a) line energization and re-energization;
- b) faults and fault clearing;
- c) switching of capacitive currents and of small or moderate inductive currents,
- d) load rejections;
- e) lightning strokes (first or subsequent components of a lightning flash)

*Note* — The overvoltages in cases a) to d) depend on the characteristics of the equipment, especially of the circuit breakers, transformers and shunt reactors. They may generally be reduced by suitable choice of these characteristics, i.e. in case a) by using pre-insertion resistors or shunt reactors, and in case c) by using surge arresters connected between the circuit-breaker and the transformer.

### 6.1 Switching overvoltages due to line energization and re-energization

Overvoltages due to closing and to single-phase and three-phase reclosing are of great importance in the selection of system insulation in range C.

These overvoltages, except in special cases, are not of particular importance in the other ranges of voltages.

### 6.2 Switching overvoltages due to faults and fault clearing

In range A and in relatively few cases in range B under the conditions listed in Items a) and b) of Sub-clause 5.1, high switching overvoltages can arise at the initiation of a fault.

Pour toutes les gammes de tension, des surtensions importantes peuvent se produire à l'occasion de défauts à la terre dans des circuits composites comprenant des lignes aériennes et des transformateurs raccordés par câbles

Aux tensions les plus élevées de la gamme C, on cherche normalement à maîtriser les surtensions dues à l'enclenchement ou au réenclenchement des lignes. En conséquence, il faut porter une attention particulière aux surtensions de manœuvre dues aux défauts et à leur extinction (défauts phase-terre simples et doubles, extinction de ces défauts)

### 6.3 Surtensions de manœuvre dues à la coupure de courants capacitifs et inductifs

Dans la gamme A, la coupure de courants inductifs ou capacitifs peut provoquer des surtensions nécessitant une attention spéciale que ce soit dans des réseaux de distribution à haute tension ou dans des installations industrielles et des centrales. Pour les premiers, des surtensions importantes peuvent se produire si le disjoncteur se déionise assez rapidement pour provoquer un passage à zéro prématuré du courant, appelé arrachement de courant.

On doit particulièrement considérer les manœuvres suivantes :

- a) coupure des courants de démarrage des moteurs;
- b) coupure de courants inductifs, par exemple coupure du courant magnétisant d'un transformateur ou d'une réactance;
- c) manœuvre et fonctionnement de fours à arc et des transformateurs associés, au cours desquels peuvent se produire des arrachements de courant;
- d) manœuvre de câbles à vide et de batteries de condensateurs;
- e) coupure de courants par des fusibles à haute tension.

Dans la gamme B, les surtensions provoquées par la coupure de courants capacitifs (coupure de lignes à vide, de câbles ou de batteries de condensateurs) peuvent être particulièrement dangereuses puisqu'on ne peut pas toujours tabler sur l'emploi de disjoncteurs sans réamorçage.

### 6.4 Surtensions de manœuvre dues à des variations brusques de charge

Les surtensions dues à des variations brusques de charge peuvent commencer par une surtension de manœuvre importante et se poursuivre par une surtension temporaire.

Des surtensions de cet ordre sont particulièrement importantes aux plus hautes tensions de la gamme C, lorsqu'on essaie d'arriver à un degré poussé de contrôle des surtensions de réenclenchement.

### 6.5 Surtensions de foudre

Les surtensions de foudre proviennent soit de coups directs sur les conducteurs de phase, ou encore d'amorçages en retour, soit de coups à la terre très voisins de la ligne provoquant des surtensions de foudre induites. Les surtensions qui contraignent l'isolation du poste dépendent de la construction de la ligne et de la configuration du réseau. Le schéma du poste proprement dit a une grande importance si le temps de parcours de la surtension à l'intérieur du poste n'est pas négligeable devant la durée du front de la surtension.

Suivant la configuration du réseau, des surtensions dont les caractéristiques de durée sont dans le domaine des surtensions de manœuvre peuvent aussi apparaître en cas de coups de foudre.

Pour les gammes B et C, les coups de foudre qui provoquent des surtensions notables sont uniquement, soit des coups directs sur les conducteurs de phase, soit des coups sur les pylônes ou les câbles de garde suivis d'amorçages en retour.

Dans la gamme A, on doit aussi prêter attention aux coups de foudre induits. En outre, dans cette gamme de tension, les surtensions transmises d'un réseau à tension supérieure par les transformateurs doivent également être prises en considération.

In all the voltage ranges, high overvoltages may arise due to faults to earth in composite circuits including overhead lines and cable-connected transformers

At the highest voltages of range C, a high degree of control of overvoltages caused by line energization and re-energization is normally attempted. For this reason, switching overvoltages due to faults and fault clearing (single and double phase-to-earth faults, and their clearance) need careful consideration

### 6.3 *Switching overvoltages due to switching of inductive and capacitive currents*

In range A, the switching of inductive or capacitive currents can give rise to overvoltages, which may require attention, both in high-voltage distribution systems and in industrial installations and power stations. In the case of the former, high overvoltages may arise if the circuit breaker deionizes so rapidly as to force the current prematurely to zero, so-called current chopping

In particular, the following switching operations should be taken into consideration:

- a) interruption of the starting currents of motors,
- b) interruption of inductive currents, e.g. when interrupting the magnetizing current of a transformer or reactor,
- c) switching and operation of arc furnaces and their transformers which may lead to current chopping;
- d) switching of unloaded cables and of capacitor banks,
- e) interruption of currents by high-voltage fuses

In range B, overvoltages due to the interruption of capacitive currents (switching off unloaded lines, cables or capacitor banks) may be particularly dangerous since the use of restrike-free circuit-breakers cannot always be assumed

### 6.4 *Switching overvoltages due to sudden changes of load*

Overvoltages due to sudden changes of load may start with a high switching surge followed by a temporary overvoltage

Overvoltages of this kind are particularly important at the highest voltages in range C where a high degree of control of reclosing surges is attempted

### 6.5 *Lightning overvoltages*

Lightning overvoltages are caused either by direct strokes to the phase conductors, back-flashovers, or as a result of strokes to earth very close to the line which produce induced lightning surges. The overvoltages by which substation insulation is stressed are a function of the line construction and the system configuration. The configuration of the station itself has a great influence if the travelling time of surges within the station is not negligible in relation to the front time of the surge

Depending on the system configuration, overvoltages with time parameters in the range of switching surges may also arise as a result of lightning strokes

Lightning discharges which produce significant overvoltages in ranges B and C are confined to direct strokes to phase conductors or strokes to towers or earth wires with subsequent back-flashovers

In range A, induced lightning surges must also be considered. Furthermore, in this range, surges transferred through transformers from a higher voltage system need careful consideration

## 7 Détermination des niveaux de surtension à prévoir

### 7.1 Gamme A

Pour les tensions inférieures à 52 kV, les surtensions de manœuvre ne posent généralement pas de problèmes sérieux aux réseaux d'alimentation aériens et la coordination de l'isolement est déterminée par les surtensions de foudre

Pour la même raison, on peut en général négliger les surtensions de manœuvre provenant d'une ligne aérienne et transmises à une installation par l'intermédiaire de transformateurs ou de câbles d'une certaine longueur. Une exception concerne le cas d'une installation reliée aux bornes basse tension d'une ligne alimentant un transformateur à haute tension, en particulier si une résonance apparaît entre les deux réseaux pendant la mise sous tension à la fermeture d'une ou de deux phases

Les amplitudes et les formes d'onde des surtensions de manœuvre produites dans les installations industrielles et dans les centrales varient dans une très large fourchette. Dans la grande majorité des cas, elles sont sans danger et, dans d'autres, les surtensions peuvent présenter des amplitudes et des vitesses de variation importantes. Ainsi, de brusques variations de tension peuvent résulter de réamorçages d'un appareil de connexion, la vitesse de variation de la tension qui en résulte peut être égale à celle produite par un coup de foudre violent et proche.

On dispose d'une très grande expérience pratique acquise dans l'exploitation de diverses installations industrielles et de centrales, il en résulte que les surtensions ou les variations de tension les plus dangereuses peuvent d'habitude être évitées en supprimant la résonance et en choisissant correctement l'appareil de connexion.

A ces niveaux de tension, la représentation détaillée du réseau considéré sur calculateur ou analyseur transitoire ne peut se justifier économiquement que dans des cas particuliers, d'autant qu'une représentation détaillée est nécessaire pour obtenir des résultats précis et qu'une installation complexe comporte fréquemment de nombreux matériels et connexions électriques. De plus, le fonctionnement de certains types d'appareils de connexion et le comportement des arcs à la terre sont difficiles à représenter avec un degré de précision suffisant. L'expérience est souvent le meilleur guide et, dans certains cas exceptionnels, on effectuera intentionnellement des manœuvres à titre d'essais, en enregistrant les phénomènes à la fois à vitesse lente et rapide. C'est de ces essais que l'on tirera les renseignements les plus sûrs, en sorte que la solution découlera à la fois des calculs et des essais de confirmation.

Les amplitudes, les formes d'onde et la fréquence d'apparition des surtensions de foudre sur les réseaux de la gamme A peuvent être évaluées avec un degré de précision raisonnable. Comme la tension d'amorçage au choc des isolateurs utilisés sur les lignes aériennes dans cette gamme de tensions est faible devant la tension appliquée à une telle ligne par un coup de foudre direct, les contraintes susceptibles de solliciter le matériel du poste dépendent en premier lieu du type de construction de la ligne. Ainsi une protection soignée du matériel du poste est nécessaire si celui-ci est relié à une ligne sur poteaux en bois sans mise à la terre des ferrures. Là où les lignes sont montées sur poteaux en acier ou sur poteaux en béton armé, ou bien comportent des ferrures mises à la terre d'une autre manière, on peut se contenter d'une protection réduite.

Les amplitudes et les formes d'onde sont également influencées par les facteurs suivants qui caractérisent la constitution du réseau et la disposition du poste.

a) Impédances d'onde des lignes et câbles reliés au poste. Par exemple, quand une seule ligne est reliée à un transformateur en antenne, la surtension est réfléchie à l'extrémité et l'amplitude de la tension est doublée. Lorsque  $n$  lignes sont reliées au jeu de barres d'un poste, et si le coup de foudre n'est pas proche du poste, la tension sur le jeu de barres devient  $2u/n$ ,  $u$  étant l'amplitude de la surtension transmise le long de la ligne d'où provient la surtension de foudre, pour un coup de foudre proche du poste, il faut tenir compte des réflexions d'onde et un calcul peut s'avérer utile.

b) Câbles comportant une gaine métallique mise à la terre, placés en série avec la ligne ou entre le jeu de barres du poste et l'appareillage à protéger. Tout câble tend à réduire la raideur des ondes pénétrant dans le poste, mais il ne réduit de façon appréciable leurs amplitudes que si sa longueur est d'au moins 1 à 2 km. Dans le cas où la foudre frappe la dernière portée de la ligne avant le poste, un tronçon de câble entre la ligne aérienne et le poste n'apporte pratiquement aucune réduction aux contraintes supportées par le matériel du poste. Des précisions sont données au paragraphe 21.4.

c) Câbles de garde protégeant des lignes aériennes, équipant quelques kilomètres à partir du poste, ces fils sont efficaces contre les coups de foudre rapprochés frappant la ligne au voisinage du poste et qui sont les plus dange-

## 7 Determination of expected overvoltage levels

### 7.1 Range A

For voltages of less than 52 kV, switching overvoltages do not generally constitute a serious problem for overhead supply systems and insulation co-ordination is based on lightning overvoltages

Switching overvoltages transferred from an overhead line into a plant through transformers or lengths of cable can, in general, be ignored for the same reason. An exception is the case of an installation connected to the lower-voltage terminals of a high-voltage transformer feeder, particularly if resonance occurs between the two systems during one- or two-phase energizing.

In industrial plants and power stations, the amplitudes and waveshapes of switching overvoltages generated within the installation vary over a very wide range. In the great majority of cases they are innocuous, in some cases, serious overvoltage amplitudes and rates of change can occur. Thus sudden voltage swings can be caused when a switching device re-strikes, the resulting rate-of-change of voltage can equal that caused by a severe close lightning strike.

A very large amount of practical operational experience is available from different industrial plants and power stations, and the most severe overvoltages or voltage swings can usually be avoided by eliminating resonance and by correct choice of the switching device to be employed.

Detailed representation of the system under consideration on a digital computer or transient network analyser can only be economically justified in particular cases at these voltage levels since accurate representation is needed to obtain accurate results and a complex plant frequently consists of many pieces of equipment and electrical connections. Furthermore, the operation of some types of switching devices and arcing earths is difficult to simulate with a sufficient degree of accuracy. Experience is often the best guide and, in exceptional cases, deliberate switching tests with simultaneous recording (both high-speed and low-speed) will produce the most valuable information so that remedial measures can be taken as the result of subsequent calculations and confirmatory tests.

The amplitudes, waveshapes and frequency of occurrence of lightning overvoltages on systems in range A can be estimated with a reasonable degree of accuracy. As the impulse flashover voltage of insulators used on overhead lines in this range is quite low as compared with the voltage impressed on such a line by a direct lightning stroke, the stresses to which substation equipment is liable to be subjected are primarily determined by the type of line construction. Thus careful protection of substation equipment is required if it is connected to a wood-pole line with un-earthed cross-arms. Reduced protection is permissible where the lines are erected on steel masts, reinforced concrete poles or where metal cross-arms are otherwise earthed.

Amplitudes and waveshapes are also affected by the following factors which characterize the constitution of the system and arrangement of the station:

- a) Surge impedance of those lines or cables which are connected to the station. For example, when only one line is connected to a terminal transformer, the surge is reflected at the termination and is doubled in voltage amplitude; when  $n$  lines of the same surge impedance are connected to the busbars of a station, and if the lightning stroke to the line does not occur close to the station, the voltage at the busbars becomes  $2u/n$ , where  $u$  is the amplitude of the surge voltage transmitted along the line on which the lightning surge originated, in the case of lightning in the vicinity of the sub-station, wave reflection must be taken into account and calculation may prove to be necessary.
- b) Cables with an earthed metallic sheath which are in series with the line or connected between the station busbars and apparatus to be protected. Any cable tends to reduce the steepness of the waves entering the station, but the cable length must be at least 1 or 2 km long before it has a significant effect on the surge amplitude. In the case of a direct lightning stroke to the last span in front of a station, a cable section between overhead line and station affords practically no relief to the station equipment. More details are given in Sub-clause 21.4.

- c) Protective earth wires on the overhead lines extending up to a few kilometres from the station; these are effective against close lightning strikes to the line near the station which are the most dangerous. This pre-supposes

reux. Cela suppose que l'écran constitué par les fils de terre est suffisamment bien conçu pour éviter que des coups directs n'atteignent les conducteurs de phase, et que la résistance de terre du pylône est suffisamment faible pour éviter un amorçage en retour, comme donné au point *e*) ci-dessous

*d*) Eclateurs de protection, ou câbles de garde placés sur une ou deux portées en amont du poste, une réduction appréciable des amplitudes des surtensions sur des lignes à isolement élevé par rapport à la terre peut alors être observée, par exemple pour les lignes sur poteaux en bois à plein isolement

*e*) Résistances de terre et inductances des descentes de terre des pylônes, en particulier au voisinage du poste. Si la résistance de terre ou l'inductance de la descente du pylône ou du poteau a une valeur élevée, un coup de foudre sur le pylône ou le poteau peut provoquer des surtensions élevées sur les conducteurs de phase par suite d'un amorçage en retour entre le pylône atteint et un ou plusieurs conducteurs de phase

Dans la gamme A, les surtensions de foudre transmises à travers un transformateur présentent également de l'importance. Des formules donnant les valeurs des termes électrostatique et électromagnétique des tensions transmises sont indiquées à l'annexe A

## 7.2 Gamme B

Pour la gamme B comme pour la gamme A, les niveaux d'isolement sont généralement tels que les surtensions de manœuvre ne posent que rarement un problème majeur, et la coordination de l'isolement est encore principalement fondée sur les surtensions de foudre apparaissant sur les réseaux comportant des lignes aériennes

En outre, dans cette gamme de tension, il n'y a généralement pas non plus de motif économique déterminant justifiant une étude détaillée des contraintes dues aux surtensions

C'est pourquoi les considérations du paragraphe 7.1 sont encore valables

## 7.3 Gamme C

Dans cette gamme de tension, l'importance des surtensions de manœuvre pour la coordination de l'isolement devient prépondérante, et cela d'autant plus que le niveau de tension augmente. C'est ce qui justifie l'abandon de l'essai traditionnel de 1 min à fréquence industrielle au profit d'un essai aux chocs de manœuvre, jugé plus représentatif

A cause du coût élevé du matériel, on doit, dans cette gamme, s'en tenir à des conceptions plus économes en matière de coordination de l'isolement, alors qu'en contrepartie les conséquences sérieuses d'un défaut exigent une approche plus précise des surtensions prévisibles. Leur évaluation doit être faite pour chaque type de surtensions importantes dans le réseau particulier considéré

Du fait du volume des calculs nécessaires, pratiquement toutes les prévisions de surtensions doivent être faites en utilisant un analyseur transitoire de réseau ou un ordinateur

L'expérience acquise grâce aux études d'une grande variété de réseaux a montré que la recherche de règles générales pour évaluer les surtensions est difficile, du fait du grand nombre de paramètres dont dépend la valeur des surtensions

La résolution des problèmes, que ce soit par la technique du calcul analogique ou par celle du calcul numérique, demande un bon niveau de compétence. Celle-ci est surtout nécessaire pour le choix des cas significatifs (étant donné qu'il est exclu d'étudier tous les cas possibles) pour la réduction du réseau à un nombre raisonnable de lignes et de barres de postes (il est pratiquement impossible de représenter la totalité du réseau dans l'une ou l'autre technique) et pour la représentation des paramètres du réseau et des caractéristiques des appareils

Toutes les fois que ce sera possible, on s'efforcera de vérifier la validité des paramètres utilisés grâce à des essais en réseau

Avec les méthodes raffinées qui sont de plus en plus utilisées en matière de coordination d'isolement aux niveaux de tensions les plus élevés, l'amplitude des surtensions en un point donné, provoquées par un type donné de phénomène, ne peut se définir par une seule valeur (voir la figure 1, page 106). La seule chose que l'on puisse indiquer est la

that shielding by the earth wires is sufficiently well designed to prevent direct strokes reaching the phase conductors, and that the earthing resistance of the tower is sufficiently low to reduce the risk of back flashover, as given in Item *e*) below

*d*) Protective spark gaps or protective earth wires extending over one or two spans in front of the station, these can materially reduce the amplitudes of incoming surges on lines with high insulation to earth, e.g. on fully insulated wood-pole lines

*e*) Earthing resistances and inductances of the down leads of towers, particularly close to the station. In the cases of high values of earthing resistance or the inductance of the down lead of the tower or pole, a lightning strike to such a tower or pole or to an earth wire may cause high overvoltages on the phase conductors by back flashover across the line insulators to one or more phase conductors

In range A, lightning surges transferred through transformers are also important. Analytical expressions for the electrostatic and electromagnetic terms of the transferred voltages are derived in Appendix A.

## 7.2 Range B

In range B, as well as in range A, the insulation levels are generally such that switching overvoltages are seldom a major problem and that insulation co-ordination is still mainly based upon lightning overvoltages occurring in overhead line systems.

Furthermore, also in this voltage range, there is usually no decisive economic incentive towards a detailed study of overvoltage stresses.

Thus the considerations in Sub-clause 7.1 continue to apply.

## 7.3 Range C

For this voltage range, the importance of the switching overvoltages in insulation co-ordination becomes predominant, all the more so as the voltage level increases. This is what justifies the substitution of a switching impulse test, considered more representative, for the traditional 1-min power frequency test.

The high cost of equipment then compels consideration of more economical designs of insulation co-ordination, while, in turn, the serious consequences of a failure necessitate a more precise estimation of the overvoltages to be expected. These have to be evaluated for each type of significant overvoltage in the particular system considered.

Because of the extensive computational requirements, virtually all practical overvoltage predictions must be made using transient network analysers or digital computers.

Experience with studies of a wide variety of systems has shown that development of generalized formulae for overvoltages is difficult because of the large number of parameters affecting the overvoltage value.

Both analogue and digital techniques of transient solution require a high level of skill in problem-solving. These skills are principally useful in the selection of significant cases (it being impractical to study all possibilities), in the reduction of the system to a reasonable number of busbars and lines (it is not practical to represent the entire system on either TNA or digital solutions) and in the description of system constants and apparatus characteristics.

Whenever possible, field tests to check the validity of the parameters used are recommended.

In the sophisticated approaches to insulation co-ordination now becoming more and more usual for the highest values of voltage, the amplitudes of the overvoltages to be expected at a given location due to a given type of event cannot be defined by a single value (see Figure 1, see page 106). It is only possible to state the probability  $f_o(U) dU$

probabilité  $f_o(U) dU$  qu'une surtension de valeur comprise entre  $U$  et  $U + dU$  apparaisse,  $f_o(U)$  étant appelé la densité de probabilité des surtensions. La probabilité  $F_o(U')$  que la valeur  $U'$  soit dépassée est alors donnée par l'expression :

$$F_o(U') = \int_{U'}^{\infty} f_o(U) dU \quad (1)$$

## SECTION TROIS — TENUE DES ISOLATIONS

### 8 Généralités

#### 8.1 Isolations autorégénératrices ou non autorégénératrices

Les articles 10 et 11 concernant les définitions de la Publication 71-1 de la CEI font la distinction entre les isolations autorégénératrices et les isolations non autorégénératrices en fonction de leur comportement en cas d'apparition d'une décharge disruptive au cours d'un essai diélectrique. Avec le premier type d'isolation, il est possible de réaliser des essais qui peuvent comporter un risque appréciable de décharges, par exemple en appliquant un grand nombre de chocs à la tension de tenue nominale aux chocs, ou même dans des conditions dans lesquelles les décharges sont volontairement prévues, comme dans un essai de décharge disruptive à 50% fait à des tensions supérieures au niveau de tenue nominale aux chocs.

Sur les isolations non autorégénératrices, une décharge disruptive détruit les propriétés isolantes et, de plus, un grand nombre de chocs à la tension de tenue nominale peut provoquer une détérioration graduelle de l'isolation. C'est pourquoi les isolations non autorégénératrices sont essayées par application d'un nombre limité de chocs à la tension de tenue nominale.

L'information qui peut être directement obtenue sur la tenue diélectrique du matériel peut donc être bien meilleure pour une isolation autorégénératrice. Cependant, dans le cas d'une isolation non autorégénératrice, l'importance économique que le constructeur peut attacher au risque de voir son matériel refusé tend à l'obliger à concevoir le matériel de façon qu'il ne présente qu'une très faible probabilité de défaut au cours des essais. Ces deux faits étant pris en considération, la Publication 71-1 de la CEI ne fait de différence entre les niveaux de tenue aux chocs ni en fonction du type d'isolation ni en fonction de la nature de l'essai.

Du fait qu'une isolation autorégénératrice ne voit ses qualités isolantes ni perdues ni modifiées à la suite d'une décharge disruptive durant un essai diélectrique, il ne faut pas déduire qu'aucune avarie n'apparaîtrait en exploitation si la décharge disruptive était suivie d'un arc de puissance intense.

De plus, les avaries éventuelles des matériels ne sont pas la seule considération à retenir dans le choix du risque acceptable de décharge en exploitation, car il faut aussi tenir compte de la continuité du service. Ainsi, on s'attachera à obtenir une valeur plus faible de la probabilité de défaillance diélectrique pour un jeu de barres que pour des lignes individuelles.

Il faut insister sur le fait que les structures isolantes d'un matériel comportent toujours des éléments autorégénérateurs et des éléments non autorégénérateurs. Généralement, on ne peut donc pas affirmer que l'isolation d'un appareil est autorégénératrice ou non. Mais la probabilité qu'une décharge se produise sur ou dans les éléments non autorégénérateurs en présence d'éléments autorégénérateurs peut être négligeable ou non suivant les types de matériel. Du fait des différences entre les caractéristiques tension-temps d'amorçage dans les isolations solides et dans les isolations dans l'air, cette probabilité tend à croître lorsque la tension des chocs croît : ainsi elle peut être négligeable à la tension de tenue nominale, mais peut devenir appréciable pour des tensions de l'ordre de la tension de décharge disruptive à 50%.

#### 8.2 Choix du type d'essai

Pour certains types de matériels, la probabilité d'apparition d'une décharge électrique dans une isolation non autorégénératrice est négligeable dans le domaine des valeurs des surtensions qui doivent être reproduites au cours des

that an overvoltage value comprised between  $U$  and  $U + dU$  may occur,  $f_o(U)$  being the overvoltage probability density. The probability  $F_o(U')$  that the value  $U'$  may be exceeded is then given by:

$$F_o(U') = \int_{U'}^{\infty} f_o(U) dU \quad (1)$$

### SECTION THREE — INSULATION WITHSTAND

#### 8 General

##### 8.1 *Self-restoring and non-self-restoring insulation*

Clauses 10 and 11, concerning definitions of IEC Publication 71-1, subdivide insulation into self-restoring and non-self-restoring insulation according to its behaviour in the case of occurrence of a disruptive discharge during a dielectric test. On the former kind of insulation, it is possible to carry out tests under conditions that imply an appreciable risk of such discharges, e.g. by applying a large number of impulses at the rated impulse withstand voltage, or even in conditions with deliberately applied discharges as in a 50% disruptive discharge test carried out at voltages above the rated impulse withstand level.

On non-self-restoring insulation, a disruptive discharge destroys the insulating property of the insulation and a large number of impulses at rated withstand voltage may result in a gradual deterioration of the insulation. Non-self-restoring insulation is for these reasons tested by application of a limited number of impulses at rated withstand voltage.

The degree of information on the dielectric strength of the equipment directly obtainable can thus be much higher for self-restoring insulation. However, in the case of non-self-restoring insulation, the economic importance for the manufacturer of the risk of having the equipment rejected tends to compel him to design the equipment for a very low probability of failure under test. Taking these two factors together, no difference is made in IEC Publication 71-1 between impulse withstand levels, in relation to the kind of insulation or the nature of the test.

While self-restoring insulation does not lose or modify its insulating ability following a disruptive discharge in a dielectric test, it should not be inferred that damage may not occur in service if the disruptive discharge is followed by an intense power arc.

Furthermore, possible damage to equipment is not the only consideration to be introduced in the selection of an acceptable risk of discharge in service, as the effect on continuity of supply also has to be considered. For example, a much lower probability of insulation failure is required in the case of busbars than on individual lines.

It must be emphasized that the insulating structures of a piece of equipment are always made up of self-restoring and non-self-restoring parts. Generally it cannot therefore be stated that the insulation of an apparatus is self-restoring or non-self-restoring. But the probability that discharges may occur across or through non-self-restoring parts in the presence of self-restoring parts can, for different types of equipment, be negligible or otherwise. Due to the different voltage-time sparkover characteristics of solid and air insulations, this probability tends to increase with increasing impulse voltage amplitudes, thus it may be negligible at the rated withstand voltage, but may become appreciable around the 50% disruptive discharge voltage.

##### 8.2 *Selection of the type of test*

For some types of apparatus, within the range of overvoltages that tests have to simulate, the probability of a discharge occurring across a non-self-restoring part is negligible. In this case, the discharge probability coincides

essais Dans ce cas, la probabilité de décharge est égale à celle des éléments autorégénératrices de l'isolation des matériels, et l'isolation dans son ensemble peut être appelée « essentiellement autorégénératrice » ou, plus simplement, « autorégénératrice ». Les sectionneurs peuvent être donnés comme un exemple de ce type de matériel, effectivement, même si l'on applique des chocs bien supérieurs à la tension de décharge à 50% pendant un essai de décharge à 50%, des amorçages se produisent dans l'air sans aucune perforation de la porcelaine. Pour ce type de matériel, l'essai de l'article 52 de la Publication 71-1 de la CEI est possible et souhaitable.

Pour les types d'appareils dont l'isolation est en majeure partie, ou en grande partie, non autorégénératrice, à cause du coût élevé de cette partie d'isolation, il est exclu d'essayer l'appareil complet au-delà de la tension de tenue nominale. La tension d'essai est par conséquent limitée à la tension de tenue nominale, ce qui implique déjà un surisolement de la partie non autorégénératrice de façon à rendre négligeable la probabilité de décharge jusqu'à la tension de tenue nominale.

Certains types d'appareils dont une partie de l'isolation est autorégénératrice, mais ne peut être essayée séparément de la partie non autorégénératrice, tels que les traversées et certains types de transformateurs de mesure, exigeraient un grand nombre de chocs pour qu'il soit démontré que leur isolation autorégénératrice est satisfaisante. Mais, le nombre de chocs doit être limité à cause du risque de détérioration graduelle de la partie non autorégénératrice de l'isolation. L'isolation de ce type de matériel, qui peut être appelée mixte, doit être soumise à l'essai de l'article 53 de la Publication 71-1 de la CEI.

Pour quelques types de matériels dont l'isolation est principalement non autorégénératrice, tels que les transformateurs de puissance, l'isolation autorégénératrice (par exemple les traversées) peut être essayée à part conformément à l'article 52 de la Publication 71-1 de la CEI. L'isolation de ce type est dénommée « essentiellement non autorégénératrice » ou, plus simplement, « non autorégénératrice ». Elle est soumise à l'essai de l'article 54 de la Publication 71-1 de la CEI.

Des considérations sur la validité des essais des articles 52, 53 et 54 de la Publication 71-1 de la CEI sont données à l'annexe B.

## 9 Propriétés de l'isolation en présence des tensions à fréquence industrielle et des surtensions temporaires

Généralement, les amorçages dus aux tensions à fréquence industrielle dans les conditions normales d'exploitation ou aux surtensions temporaires sont le résultat d'une détérioration progressive des propriétés isolantes du matériel, ou de réductions exceptionnelles de la tenue diélectrique dues à des conditions ambiantes sévères.

Dans ce dernier cas, la notion de probabilité est applicable au degré de pollution (voir l'article 4).

A cause des difficultés que cela soulèverait, il n'est pas fait usage des concepts statistiques dans le présent Guide en ce qui concerne les propriétés de l'isolation en présence des tensions à fréquence industrielle et des surtensions temporaires (voir aussi les articles 17 et 18).

## 10 Probabilité de décharge disruptive d'une isolation soumise à des chocs de tension

La capacité d'une isolation donnée de résister aux contraintes diélectriques créées par l'application d'un choc de forme donnée et de valeur de crête  $U$ , dans la plupart des cas, a un caractère aléatoire, même si l'on suppose que l'intervalle de temps nécessaire pour réaliser un essai diélectrique sur un matériel est assez petit pour que les conditions d'ambiance et d'isolement puissent être considérées comme constantes, au moins en ce qui concerne les paramètres, tels que pression, température, humidité, etc., qui peuvent être mesurés et qui servent à définir ces conditions d'ambiance et d'isolement pendant les essais.

La probabilité de décharge disruptive d'une isolation soumise à un choc de tension de forme et de polarité données et de valeur de crête  $U$ , considérée dans un court intervalle de temps défini comme ci-dessus (par exemple dans un essai diélectrique) peut être déterminée, si l'isolation est autorégénératrice, en appliquant le choc  $U$  successivement  $N$  fois dans cet intervalle de temps et en comptant le nombre  $N1$  de décharges. La fraction  $\frac{N1}{N}$  fournit une valeur numérique de cette probabilité qui sera d'autant plus précise que le nombre  $N$  sera grand.

with that of the self-restoring parts of the apparatus and its insulation may be called “essentially self-restoring” or, for the sake of simplicity, “self-restoring”. Disconnecting switches may be considered an example of this type, in fact, even when applying impulses well above the 50% discharge voltage during a 50% discharge test, sparkover takes place usually in air without any puncture of the porcelain. For this type of equipment, the test of Clause 52 of IEC Publication 71-1 is possible and recommended.

For types of apparatus with mainly or a large part of non-self-restoring insulation, the high cost of this part of insulation excludes tests of the complete apparatus at higher than rated withstand voltage. The test voltage is therefore limited to the rated withstand voltage as this already implies an overinsulation of the non-self-restoring parts so as to give negligible probability of discharge up to rated withstand voltage.

Such types of apparatus that also have a self-restoring part of insulation that cannot be tested separately from the non-self-restoring part, e.g. bushings and some types of instrument transformers, would require a large number of impulses to prove the adequacy of the self-restoring insulation. The number of impulses must however be restricted because of the possibility of gradual deterioration of the non-self-restoring parts of insulation. Insulation of this type of equipment, that can be called combined, should be tested according to Clause 53 of IEC Publication 71-1.

For some types of equipment with mainly non-self-restoring insulation, e.g. power transformers, the self-restoring insulation (e.g. bushings) can be tested separately according to Clause 52 of IEC Publication 71-1. This kind of equipment is called “essentially non-self-restoring” or, for the sake of simplicity, “non-self-restoring”. Insulation of this kind is verified by means of the test in Clause 54 of IEC Publication 71-1.

Considerations on the validity of the tests in Clauses 52, 53 and 54 of IEC Publication 71-1 are given in Appendix B.

## **9 Insulation behaviour at power-frequency voltages and temporary overvoltages**

In general, sparkover under power-frequency voltage in normal operating conditions and under temporary overvoltages will be caused by progressive deterioration of the insulating properties of the equipment or by exceptional reductions in insulation withstand due to severe ambient conditions.

In the latter case, the concept of probability is applicable to the degree of contamination (see Clause 4).

Because of the difficulties involved, no use of statistical concepts will be made in this Guide in respect of insulation behaviour at power-frequency voltages and temporary overvoltages (see also Clauses 17 and 18).

## **10 Probability of disruptive discharge of insulation under impulse voltages**

The ability of a given insulation to withstand the dielectric stresses caused by the application of an impulse of given waveshape and peak value  $U$  is, in most cases, a random phenomenon, even if we consider a time interval so small (such as that needed to carry out a dielectric test on equipment) that the ambient and insulation conditions may be considered constant, at least with respect to parameters such as pressure, temperature, humidity, etc., which can be measured and which are used to define the ambient and insulation conditions during tests.

The disruptive discharge probability of insulation for an impulse of given waveshape and polarity, and for a peak value  $U$  in a short time interval as defined above (e.g. in a dielectric test) can be determined, if the insulation is self-restoring, by applying the impulse  $U$   $N$  times successively within this time interval, and counting the number  $N1$  of discharges. From the fraction  $\frac{N1}{N}$  a numerical value can be obtained for this probability which will be the more accurate the greater is the value of  $N$ .

La tension disruptive d'une population d'appareils à isolation non autorégénératrice peut être décrite statistiquement à l'aide d'une courbe de distribution qui donne la relation entre l'amplitude de la tension disruptive et la fraction de la population qui ne supporte pas cette tension. Pour déterminer cette courbe de distribution, on doit effectuer des essais avec des tensions d'amplitudes croissant jusqu'à l'amorçage sur un échantillon d'appareils de la population. La précision de la détermination de la courbe sera accrue, si l'on accroît le nombre d'appareils de l'échantillon. Mais, comme une décharge disruptive provoque généralement la destruction de l'appareil en essai, on limitera le nombre d'appareils de l'échantillon pour des raisons économiques.

Actuellement, on ne connaît pas de méthode pour déterminer la probabilité de décharge disruptive d'un appareil unique à isolation non autorégénératrice.

Si nous considérons des chocs de manœuvre ou de foudre de différentes valeurs de crête  $U$ , nous pouvons associer à chaque valeur possible de  $U$  une probabilité de décharge  $P_t$ , et l'on définit ainsi une fonction  $P_t(U)$  pour une isolation donnée dans un court intervalle de temps  $\Delta t$  ou plus simplement au temps  $t$  (voir figure 2a, page 107).

Les valeurs  $P_t(U)$  croissent d'une probabilité voisine de 0 à une probabilité voisine de 100% dans une bande plus ou moins étroite de valeurs de la tension. Généralement, la courbe correspondante peut être représentée par une loi à deux paramètres, l'un de ces paramètres étant lié à la position de la bande de tension et donnant donc une indication du niveau de tenue, et l'autre étant lié à la largeur de la bande et donnant une indication de la dispersion des valeurs de tension qui peuvent donner une proportion appréciable de décharges, et donc aussi de non-décharges.

Généralement, en laboratoire, le paramètre qui définit la position de la courbe de probabilité est pris égal à la tension  $U_{t\ 50}$  qui correspond à la probabilité de décharge (ou de tenue) égale à 50%. L'écart type de la distribution ( $\sigma_t$ ), défini par la racine carrée de la somme des carrés des écarts par rapport à la moyenne est généralement le paramètre choisi pour exprimer la dispersion. Dans le cas d'une distribution gaussienne, il correspond à la moitié de la différence entre les tensions qui donnent des probabilités de décharges de 16% et 84%.

En service, les conditions d'ambiance et d'isolement ne restent pas constantes. C'est pourquoi la courbe de probabilité de décharge de l'isolement, comme définie ci-dessus au temps  $t$ , varie obligatoirement d'un moment à l'autre ( $P_t, P_{t'}$ ) (voir la figure 2a). Pour l'isolement externe, ces variations sont liées principalement aux conditions atmosphériques.

Les conditions d'ambiance et d'isolement étant regardées comme aléatoires, il sera nécessaire de considérer, pour chaque isolation, en plus de la probabilité de décharge  $P_t(U)$  définie comme ci-dessus, une probabilité  $P_T(U)$  de décharge de l'isolement aux surtensions d'amplitude  $U$  susceptibles de se produire à un instant quelconque d'une longue durée de service  $T$ . C'est cette seconde distribution qui est utile pour les études d'isolement (voir la figure 2c, page 107).

Comme pour  $P_t(U)$ , on peut définir  $P_T(U)$  par la tension ( $U_{T\ 50}$ ) qui correspond à la probabilité de décharge (ou de tenue) égale à 50%, et par l'écart type de la distribution  $\sigma_T$ .

Il est commode de définir les variations de  $P_t(U)$  à l'intérieur de l'intervalle de temps  $\Delta T$  par la densité de probabilité  $P_n(U_{t\ 50})$  où  $U_{t\ 50}$  est considérée comme variable aléatoire (voir la figure 2b, page 107). Cette dernière fonction peut à son tour être caractérisée par la tension disruptive 50%,  $U_{T\ 50}$  et par son écart type  $\sigma_n$ .

En supposant pour simplifier que l'écart type  $\sigma_t$  de  $P_t(U)$  est constant dans l'intervalle de temps  $\Delta T$ , on a la relation:

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_n^2} \quad (2)$$

Dans la Publication 71-1 de la CEI, le paramètre qui définit la position de la courbe de probabilité  $P(U)$  est pris égal à la tension qui correspond à une probabilité de tenue de 90% (voir l'article 26 de la Publication 71-1 de la CEI), bien que la tension disruptive 50% à laquelle on s'est référé ci-dessus convienne parfaitement pour des parties isolantes pouvant être soumises à un essai de décharge disruptive à 50%.

La raison de ce choix est que l'essai de décharge disruptive à 50% ne peut être généralisé à tous les types d'isolement. Ainsi, pour avoir les mêmes valeurs de tensions de tenue nominale aux chocs pour tous les matériels, quelle que soit leur isolation, et pour utiliser ces valeurs directement dans les définitions des distributions statistiques, on a estimé qu'il y avait lieu de se référer à une valeur plus élevée (90%) de la probabilité de tenue, la tension de tenue nominale aux chocs  $U_{RW}$  étant prise égale à la valeur la plus faible admissible pour la tension de tenue statistique aux chocs dans des conditions d'essais spécifiés  $U_{t\ 90}$ .

The discharge voltages of a population of non-self-restoring insulation can be described statistically by means of a distribution curve that gives the relation between the amplitude of the discharge voltage and the fraction of the population that will break down at that voltage amplitude. For the determination of this distribution curve, tests must be performed with voltage amplitudes increased up to breakdown on a sample of pieces from the population. The accuracy in the determination of the curve will be increased by increasing the number of pieces in the sample. Because a disruptive discharge normally results in the destruction of the test piece, the number of pieces in the sample must be limited for reasons of economy.

No method is at present known for the determination of the probability of disruptive discharge of a single piece of non-self-restoring insulation.

If we consider either switching or lightning impulses of different peak values  $U$ , we shall be able to associate with every possible value of  $U$  a discharge probability  $P_t$ , thus establishing a relationship  $P_t(U)$  for a given insulation in a short time interval  $\Delta t$  or, for the sake of simplicity, at a time  $t$  (see Figure 2a, page 107).

The values of  $P_t(U)$  increase from near 0 to near 100% probability in a more or less narrow band of voltage values. In general, the resulting curve can be defined by a biparametric law, one parameter being associated with the position of the voltage band and giving an indication of the withstand level, and the other associated with the bandwidth and giving an indication of the scattering of the voltage values which give appreciable proportions of both discharges and non-discharges.

Generally, in a laboratory, the parameter that defines the position of the probability curve is taken as the voltage  $U_{t50}$  which corresponds to the 50% discharge (or withstand) probability. The standard deviation of the distribution ( $\sigma_t$ ), defined by the square root of the sum of the squares of the deviations with respect to the mean is usually taken as the parameter which expresses the scattering. For a Gaussian distribution, it corresponds to half the difference between the voltages that give discharge probabilities of 16% and 84%.

In service, the ambient and insulation conditions do not remain constant. Therefore the discharge probability curve of insulation, as defined above for the time  $t$ , is bound to change from one moment to another ( $P_t, P_{t'}$ ) (see Figure 2a). The variations are determined, as regards external insulation, mainly by atmospheric conditions.

Taking the ambient and insulation conditions as random, it will be necessary to consider for each insulation, in addition to the discharge probability  $P_t(U)$ , as defined above, a discharge probability of insulation  $P_T(U)$  to over-voltages of amplitude  $U$  liable to occur at any instant of a long time interval  $T$  of operation. For the purpose of insulation design, it is this second distribution which is of interest (see Figure 2c, page 107).

Similarly to  $P_t(U)$ ,  $P_T(U)$  can be defined by the voltage ( $U_{T50}$ ) which corresponds to the 50% discharge (or withstand) probability and by the standard deviation of the distribution  $\sigma_T$ .

The variations of  $P_t(U)$  within the time interval  $\Delta T$  may be conveniently defined by the probability density  $P_n(U_{t50})$  where  $U_{t50}$  is considered as a random variable (Figure 2b, page 107). This latter function in turn may be characterized by the 50% discharge voltage  $U_{T50}$  and by its standard deviation  $\sigma_n$ .

On the simplifying assumption that the standard deviation  $\sigma_t$  of  $P_t(U)$  is constant within the time interval  $\Delta T$ , the following relation holds:

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_n^2} \quad (2)$$

In IEC Publication 71-1, the parameter that defines the position of the probability curve  $P(U)$  is taken as the voltage which corresponds to a withstand probability of 90% (see Clause 26 of IEC Publication 71-1), although the 50% discharge voltage which was referred to above is a convenient measure for pieces of insulation that can be submitted to a 50% disruptive discharge test.

The reason for this choice is that the 50% disruptive discharge test cannot be generally applied to all kinds of insulation. Thus, in order to have the same values of the rated impulse withstand voltages for all types of equipment, whatever its insulation, and to use these values directly in the definitions of statistical distributions, it has been deemed appropriate to refer to a higher value (90%) of the withstand probability, the rated impulse withstand voltage  $U_{RW}$  being identical with the lowest permissible value of the statistical impulse withstand voltage under specified test conditions  $U_{t90}$ .

Pour les évaluations du risque de défaut, il est cependant commode d'exprimer les courbes de probabilité de décharge à l'aide de la tension disruptive 50% et de l'écart type

En admettant que  $P_t(U)$  suit une loi de distribution gaussienne avec un écart type égal à  $\sigma_t$ , la différence entre la tension de décharge (ou de tenue) à 50% et la tension de tenue statistique (ou 90%) est donnée par

$$U_{t\ 50} = \frac{U_{t\ 90}}{1 - 1,3\ \sigma_t} \quad (3)$$

$\sigma_t$  dépend de nombreux paramètres (forme d'onde, polarité, configuration de l'objet, nature du diélectrique, etc.) Cependant jusqu'à plus ample informé, on prendra, pour les matériels dans l'air de la gamme C,  $\sigma_t$  égal à 0,03 ou 0,06 selon qu'il s'agit de chocs de foudre ou de manœuvre, à moins qu'une autre valeur n'ait été spécifiée par le Comité d'appareils compétent (voir l'article 52 de la Publication 71-1 de la CEI)

La probabilité de décharge  $P_t(U)$  d'un matériel qui pendant l'essai se comporte comme il est spécifié dans la Publication 71-1 de la CEI, peut alors se définir à l'aide de sa tension disruptive 50% et de son écart type comme suit:

$$U_{t\ 50} = \frac{U_{t\ 90}}{1 - 1,3\ \sigma_t} \geq \frac{U_{RW}}{1 - 1,3\ \sigma_t} \quad (4)$$

La probabilité de décharge  $P_t(U)$ , définie par les paramètres ci-dessus, se rapporte aux conditions d'essais les plus sévères pour le matériel, puisque  $U_{RW}$  est la tension de tenue nominale aux chocs de manœuvre ou de foudre. C'est pourquoi, si les essais de choc doivent être effectués à la fois à sec et sous pluie, la probabilité  $P_t(U)$  se rapporte en général aux conditions sous pluie

La probabilité de décharge en service  $P_T(U)$  d'un matériel donné ne peut se déduire que d'essais en réseau, en fonction du lieu d'installation

Cependant, à titre d'indication générale, la probabilité  $P_T(U)$  d'un matériel répondant aux spécifications de la Publication 71-1 de la CEI peut se définir à partir de l'équation (2), grâce à sa tension de décharge à 50% et son écart type. On a:

$$U_{T\ 50} \geq k \frac{U_{RW}}{1 - 1,3\ \sigma_T} \quad (5)$$

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_n^2}$$

où  $k$  est le rapport entre la tension disruptive 50% d'un matériel donné en service pendant l'intervalle de temps  $\Delta T$ , et la tension disruptive 50% dans les conditions d'essai au choc les plus sévères pour le matériel (à sec ou sous pluie, polarité positive ou négative)

Pour les chocs de manœuvre  $U$  de polarité positive, les valeurs de  $k$  et  $\sigma_n$  relatives à des intervalles de temps  $\Delta T$  présentent peu de différences entre elles, que le temps soit beau ou mauvais. De même, elles dépendent peu du degré de pollution atmosphérique, du moins tant que celle-ci reste faible

Pour les chocs de manœuvre  $U$  de polarité négative, les valeurs de  $k$  et  $\sigma_n$  dépendent beaucoup du type de temps pendant l'intervalle  $\Delta T$  considéré. La coïncidence de mauvais temps (pluie, neige, brouillard plus ou moins épais, etc.) et de pollution non négligeable conduit à des valeurs de  $k$  faibles, le mauvais temps provoque également l'augmentation de la valeur de  $\sigma_n$

Dans le présent Guide, on propose de prendre  $k = 1$  et  $\sigma_n = 5\%$  pour des conditions normales et un intervalle de temps  $\Delta T$  égal à l'année, pour couvrir le cas du choc de la polarité la plus sévère. De cette valeur de  $\sigma_n$  découle une valeur de  $\sigma_T$  un peu inférieure à 8%

Les mêmes valeurs de  $k$  et  $\sigma_n$  sont également proposées pour les chocs de foudre. Cela conduit à une valeur de  $\sigma_T$  approximativement égale à 6%

Ces informations sont seulement données à titre indicatif et il est conseillé de recourir à des données plus détaillées tirées d'essais en réseau et en laboratoire, s'il en existe

For risk-of-failure evaluations, it is however convenient to express the probability curves of insulation discharge in terms of their 50% discharge voltages and standard deviations.

Assuming for  $P_t(U)$  a Gaussian distribution with standard deviation  $\sigma_t$ , the difference between the 50% discharge (or withstand) voltage and the statistical (or 90%) withstand voltage is given by:

$$U_{t\ 50} = \frac{U_{t\ 90}}{1 - 1.3 \sigma_t} \quad (3)$$

$\sigma_t$  depends upon numerous parameters (waveshape, polarity, configuration of the object, dielectric nature, etc.) However, on present information, and for equipment of range C in air,  $\sigma_t$  is taken as 0.03 or 0.06 depending on the type of impulse, lightning or switching, unless another value has been specified by the relevant Apparatus Committee (see Clause 52 of IEC Publication 71-1)

The probability of discharge  $P_t(U)$  of a piece of equipment which during the test conforms to what is specified in IEC Publication 71-1 can then be defined in terms of its 50% discharge voltage and its standard deviation, as follows:

$$U_{t\ 50} = \frac{U_{t\ 90}}{1 - 1.3 \sigma_t} \geq \frac{U_{RW}}{1 - 1.3 \sigma_t} \quad (4)$$

The probability of discharge  $P_t(U)$ , defined by the above parameters, refers to the most severe test conditions for the equipment, since  $U_{RW}$  is the rated switching or lightning impulse withstand voltage. Therefore, if impulse tests have to be made in both wet and dry conditions, the probability  $P_t(U)$  refers generally to wet conditions.

The probability of discharge in service  $P_T(U)$  of a given piece of equipment can only be deduced from field tests, depending on the site of installation.

However, as a broad indication, the probability  $P_T(U)$  of a piece of equipment conforming to the specifications of IEC Publication 71-1 can be defined, recalling equation (2), in terms of its 50% discharge voltage and its standard deviation, as follows:

$$U_{T\ 50} \geq k \frac{U_{RW}}{1 - 1.3 \sigma_T} \quad (5)$$

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_n^2}$$

where  $k$  is the ratio between the 50% discharge voltage of a given equipment in service during a time interval  $\Delta T$  and the 50% discharge voltage under the most severe impulse test for the equipment (wet or dry, positive or negative polarity)

For switching impulses  $U$  of positive polarity, the values of  $k$  and  $\sigma_n$  relevant to time intervals  $\Delta T$  of fine dry weather or various bad weather conditions do not show appreciable differences. The same may be said concerning the degree of atmospheric pollution, at least in the range from clean conditions to lightly polluted conditions.

For switching impulses  $U$  of negative polarity, the values of  $k$  and  $\sigma_n$  are highly dependent on the type of weather within the time interval  $\Delta T$  under consideration. Concomitance of bad weather (rain, snow, fog, mist, etc.) and not negligible pollution leads to a low value of  $k$ , bad weather also increases the value of  $\sigma_n$ .

Values of  $k = 1$  and  $\sigma_n = 5\%$  are suggested in this Guide for normal conditions and a time interval  $\Delta T$  equal to the seasonal cycle to cover the worse polarity impulse. This value of  $\sigma_n$  results in a value of  $\sigma_T$  a little lower than 8%.

The same values of  $k$  and  $\sigma_n$  are also suggested for lightning impulses. This gives a value of  $\sigma_T$  equal to 6% approximately.

The information given above is to be considered merely as broadly indicative and it is recommended that use should be made of more detailed data derived from field and laboratory tests, if available.

## 11 Appareils comportant des enroulements

Un appareil comportant des enroulements à haute tension, tel qu'un transformateur ou une réactance, prévu pour tenir seulement un essai en onde pleine, est, dans une certaine mesure, vulnérable à une surtension de grande amplitude coupée à proximité, parce que des contraintes internes plus élevées que celles résultant d'une onde pleine peuvent apparaître entre spires et bobines voisines. Dans un poste, tous les amorçages à la terre donnent naissance à des ondes coupées d'amplitude et de durée variables. Lorsque, par suite de l'utilisation d'éclateurs de protection, des amorçages présentant une grande sévérité sont susceptibles de se produire fréquemment en service, il faut déterminer la tenue des enroulements à ces surtensions grâce à un essai effectué avec une onde coupée convenable. Il appartient au comité d'appareils compétent de prendre les dispositions nécessaires pour un tel essai.

Lorsqu'on utilise des parafoudres à résistance variable pour la protection des transformateurs, la sévérité des ondes coupées est moins grande et leur apparition est moins probable, en pratique, les essais en onde coupée ne sont généralement pas exigés.

Pour tous les types d'appareils comportant des enroulements, tels que les machines tournantes, les transformateurs et les réactances, des variations rapides de tension dues au réamorçage des appareils de coupure peuvent aussi provoquer des répartitions de tension non linéaires analogues à celles causées par les surtensions de foudre. Pour cette raison, il est recommandé qu'un tel matériel, qu'il soit destiné ou non à être utilisé dans des installations soumises à des surtensions de foudre, soit essayé avec une tension de choc de foudre en vue de vérifier la tenue de l'isolation de l'enroulement entre spires et entre bobines.

## SECTION QUATRE — DISPOSITIFS DE PROTECTION

### 12 Généralités

Les dispositifs de protection peuvent être groupés en trois classes

- parafoudres à résistance variable (non linéaire),
- parafoudres à expulsion (gamme A seulement),
- éclateurs

Le choix entre les trois types de dispositifs ci-dessus, qui ne fournissent pas le même degré de protection, dépend de différents facteurs, tels que l'importance des matériels à protéger, les conséquences d'une interruption de service, etc.

Leurs caractéristiques vont être étudiées ci-dessous du point de vue de la coordination de l'isolement.

### 13 Parafoudres à résistance variable (non linéaire)

Ces dispositifs de protection doivent être conçus et installés dans le but de limiter les amplitudes des surtensions contre lesquelles ils protègent le matériel, et doivent être conçus de telle sorte que la tension totale aux bornes du parafoudre durant son fonctionnement ne dépasse pas une valeur retenue comme acceptable. Ces parafoudres sont définis dans la Publication 99-1 de la CEI qui donne aussi leurs caractéristiques. Leur tension nominale est définie comme la valeur spécifiée maximale de la tension efficace à fréquence industrielle admissible entre leurs bornes, à laquelle ils sont conçus pour fonctionner correctement, cette tension peut être appliquée en permanence aux parafoudres sans que leurs caractéristiques de fonctionnement en soient modifiées. En plus de cette aptitude bien déterminée, certains types de parafoudre<sup>1</sup> peuvent tenir correctement : *a*) des tensions supérieures à leur tension nominale pendant des durées courtes spécifiées, ou *b*) un nombre spécifié de décharges successives.

Dans tous les cas, un facteur à contrôler lors du choix d'un parafoudre est son aptitude à interrompre le courant de suite à la tension nominale ou en cas de surtension temporaire, le soumettant à une contrainte qui dépasse sa tension nominale.

<sup>1</sup> Ces types de parafoudres n'existent à l'heure actuelle que pour la gamme C.

## 11 Apparatus with windings

An apparatus with high-voltage windings, such as a transformer or reactor, designed to withstand only full-wave tests, is vulnerable, to a certain extent, to a surge of high amplitude chopped in its vicinity because higher internal stresses than under full-wave conditions can be developed across adjacent turns and coils. All flashovers to earth in a substation result in chopped waves of various degrees of amplitude and steepness. If because of the use of protective spark gaps, flashovers are liable to occur frequently in service, the withstand strength of the windings against surges must be determined by testing with a suitable chopped wave. The provision for such a test is left to the relevant apparatus committee.

Where non-linear resistor-type surge arresters are used for the protection of transformers, chopped wave type surges tend to be less severe and they are less likely to arise, in practice, chopped wave tests are not usually required.

For all types of apparatus having windings, such as rotating machines, transformers and reactors, rapidly changing voltages due to the restriking of switching devices may also produce non-linear voltage distributions similar to those caused by lightning overvoltages. For this reason, it is recommended that such equipment, irrespective of whether or not it is to be used in installations subjected to lightning overvoltages, should be tested with a lightning-impulse voltage to check the winding insulation for voltage withstand across turns and coils.

## SECTION FOUR — PROTECTIVE DEVICES

### 12 General

These devices fall under three classes:

- non-linear resistor-type surge arresters,
- expulsion-type surge arresters (range A only);
- spark gaps

The choice between these three devices, which do not provide the same degree of protection, depends on various factors, e.g. the importance of the equipment to be protected, the consequences of an interruption of service, etc.

Their characteristics will be considered below from the point of view of insulation co-ordination.

### 13 Non-linear resistor-type surge arresters

These protective devices should be designed and installed to limit the magnitudes of overvoltages against which they protect equipment so that the total surge-arrester voltage during operation does not exceed an acceptable value. Surge arresters are defined and their characteristics are given in IEC Publication 99-1. Their rating is defined as the specified maximum permissible r.m.s. value of power-frequency voltage between their terminals at which they are designed to operate correctly; this voltage may be applied continuously to surge arresters without changing their operating characteristics. In addition to this defined capability, some types of surge arresters<sup>1</sup> can successfully withstand either *a*) higher than rated voltage for a specified short duration, or *b*) a specified number of successive discharges.

In either case, a controlling factor in the selection of the surge arrester is its ability to interrupt follow current at its rated voltage or in the case of temporary overvoltages, exceeding its rated voltage.

<sup>1</sup> These types of surge arresters are currently available only for range C.

Il est très important de considérer la valeur prise par la tension aux bornes du parafoudre à tout instant avant et pendant le fonctionnement, pour la détermination des niveaux de protection aux chocs de manœuvre et aux chocs de foudre

### 13.1 Niveau de protection aux chocs de foudre

Le niveau de protection aux chocs de foudre d'un parafoudre est caractérisé par les tensions suivantes:

- a) la tension d'amorçage sous un choc de foudre plein, normalisé (voir le tableau VI de la Publication 99-1 de la CEI)<sup>1</sup>,
- b) la tension résiduelle (de décharge) sous le courant nominal normalisé choisi (voir le tableau VII de la Publication 99-1 de la CEI);
- c) la tension d'amorçage sur front d'onde (voir le tableau VI de la Publication 99-1 de la CEI)

Pour les besoins de la coordination de l'isolement, on prend pour niveau de protection aux chocs de foudre la plus élevée des trois valeurs suivantes:

- tension maximale d'amorçage au choc 1,2/50,
- tension résiduelle maximale au courant spécifié,
- tension maximale d'amorçage sur front d'onde divisée par 1,15 (voir l'article 33 de la Publication 71-1 de la CEI)

Cette évaluation du niveau de protection fournit une valeur conventionnelle qui constitue une approximation généralement acceptable. Pour une meilleure définition de la protection sur front d'onde donnée par un parafoudre, on se reportera à la Publication 99-1 de la CEI.

### 13.2 Niveau de protection aux chocs de manœuvre

Le niveau de protection aux chocs de manœuvre d'un parafoudre est caractérisé par les tensions suivantes:

- a) la tension maximale d'amorçage pour la forme d'onde normalisée, déterminée conformément au paragraphe 61-4 de la Publication 99-1 de la CEI;
- b) la tension totale aux bornes du parafoudre qui est maintenue par le parafoudre au cours des décharges en surtension de manœuvre.

Le niveau de protection aux chocs de manœuvre est la valeur la plus élevée de a) ou b). Tant qu'un essai normalisé applicable à b) n'aura pas été spécifié par le Comité d'Etudes N° 37 de la CEI: Parafoudres, on devra s'adresser aux constructeurs de parafoudres.

## 14 Parafoudres à expulsion

Ces dispositifs de protection fonctionnent en vue de limiter les surtensions et coupent les courants de suite dans les limites de leurs caractéristiques nominales. Leurs tensions résiduelles sont faibles. Les caractéristiques de ces dispositifs sont indiquées dans la Publication 99-2 de la CEI.

Les caractéristiques d'amorçage au choc sont proches de celles des éclateurs de protection, mais elles se situent en général plus bas et ont une forme plus aplatie pour la même distance d'amorçage.

Ces parafoudres peuvent ne pas limiter de façon appréciable l'amplitude du courant de suite avant de couper ce dernier, et leurs caractéristiques nominales d'interruption du courant doivent être comparées au courant de défaut présumé et à la tension transitoire de rétablissement présumée au lieu d'installation.

<sup>1</sup> Les tableaux mentionnés ici donnent pour chaque tension nominale de parafoudre les limites supérieures des diverses tensions ci-dessus. S'il existe des parafoudres de caractéristiques supérieures à celles spécifiées dans la Publication 99-1 de la CEI, on s'adressera aux constructeurs pour obtenir les chiffres valables pour chaque fabrication particulière et on utilisera, pour les études de coordination, les tensions réelles caractérisant la protection par les parafoudres.

A primary point is that the voltage produced across the terminals of the arrester at any moment prior to and during operation must be considered in the determination of the switching impulse protective level and the lightning impulse protective level

### 13.1 *Lightning impulse protective level*

The lightning impulse protective level of a surge arrester is characterized by the following voltages:

- a) the sparkover voltage for a standard full lightning impulse (see Table VI of IEC Publication 99-1)<sup>1</sup>,
- b) the residual (discharge) voltage at the selected standard nominal current (see Table VII of IEC Publication 99-1);
- c) the front-of-wave sparkover voltage (see Table VI of IEC Publication 99-1).

The protective level under lightning impulses is taken for insulation co-ordination purposes as the highest of the three following values:

- maximum sparkover voltage with 1 2/50 impulse,
- maximum residual voltage at the specified current,
- maximum front-of-wave sparkover voltage divided by 1.15 (see Clause 33 of IEC Publication 71-1)

This evaluation of protective level gives a conventional value representing a generally acceptable approximation. For a better definition of wave-front protection by a surge arrester, reference should be made to IEC Publication 99-1.

### 13.2 *Switching impulse protective level*

The switching impulse protective level of a surge arrester is characterized by the following voltages:

- a) the maximum sparkover voltage for the standard wave-shapes specified in Sub-clause 61.4 of IEC Publication 99-1;
- b) the total surge-arrester voltage exhibited by the surge arrester when discharging switching surges

The protective level for switching impulses is the higher value of a) or b). Until a standard test for b) has been specified by IEC Technical Committee No. 37, Lightning Arresters, reference should be made to the surge-arrester manufacturers.

## 14 **Expulsion-type surge arresters**

These protective devices operate to limit overvoltages and interrupt follow currents within their ratings. They have low residual voltages. The characteristics of these devices are given in IEC Publication 99-2.

The impulse sparkover characteristics resemble those of protective spark gaps, but are in general lower and flatter for the same sparkover distance.

These arresters may not appreciably limit the amplitude of the follow current before interrupting it and may have current-interrupting ratings which must be compared with the prospective fault current and the prospective transient recovery voltage at the point of installation.

<sup>1</sup> The tables mentioned here give for each surge arrester voltage rating the upper limit for each of the above voltages. If better characteristics than those specified in IEC Publication 99-1 are available, the actual voltages for the specific surge arrester will be obtainable from the manufacturers. Thus, it is recommended that the actual voltages for the surge arrester protective characteristics be used for co-ordination studies.

## 15 Éclateurs

L'éclateur est un dispositif de protection contre les surtensions comportant un intervalle d'éclatement à l'air libre entre une électrode sous tension et une électrode à la terre

Les éclateurs ont fait leurs preuves de façon satisfaisante sur des réseaux de tension inférieure ou égale à 245 kV dans les pays où l'activité orageuse est modérée. Le réglage de l'intervalle d'éclatement est souvent un compromis entre protection et continuité de service, mais cette difficulté peut être surmontée en grande partie grâce au réenclenchement automatique rapide.

La tension d'amorçage et le retard à l'amorçage d'un éclateur dépendent principalement de la distance entre électrodes, ils sont influencés par la forme des électrodes et aussi par leur disposition et les distances relatives aux parties voisines sous tension et à la terre.

Pour améliorer le fonctionnement des éclateurs soumis aux surtensions à front raide et leur donner une caractéristique tension-temps d'amorçage plus plate, la configuration géométrique des électrodes tige-tige simples peut être modifiée, par exemple grâce à des formes judicieuses des électrodes et par aménagement d'une électrode auxiliaire centrale. Des éclateurs du type à double intervalle se sont révélés avantageux pour la gamme A dans les régions où l'on est gêné par les oiseaux ou les petits animaux.

### 15.1 Caractéristiques de protection d'un éclateur

Du fait de :

- a) la dispersion de la tension d'amorçage d'un espace d'air,
- b) l'accroissement de la tension d'amorçage lorsque s'accroît l'amplitude de la surtension appliquée dans le cas où l'amorçage a lieu sur le front de l'onde,

la protection obtenue par des éclateurs est moins précise et le niveau de protection ne peut pas être donné de façon aussi exacte que le niveau de protection d'un parafoudre non linéaire.

Le comportement d'un éclateur soumis à un choc (de manœuvre ou de foudre) est caractérisé par la valeur 50% et l'écart type de la tension d'amorçage dans les conditions normalisées d'essais en laboratoire. Puisque les éclateurs sont des isolations typiquement autorégénératrices, ce qui est donné à l'article 10 s'applique aussi à eux. De plus, pour les raisons données au point b) ci-dessus, la connaissance du retard à l'amorçage de l'éclateur pour des valeurs des chocs appliqués bien supérieures à la tension d'amorçage 50% est souvent nécessaire (voir l'annexe C).

### 15.2 Limites d'utilisation des éclateurs de protection

- a) Lorsqu'un éclateur fonctionne du fait d'une surtension et qu'un arc de puissance s'établit, cet arc se maintient fréquemment jusqu'à ce qu'il soit coupé par l'action des appareils de protection du réseau; il en résulte un défaut à la terre dans le cas où le réseau a son neutre directement à la terre, des contraintes mécaniques dans différentes parties des installations du réseau et éventuellement des troubles pour les usagers. L'emplacement de l'éclateur doit donc être décidé en fonction de ses effets sur le système de protection et sur le service.
- b) L'éclateur est inacceptable du point de vue de la continuité du service si sa présence accroît notablement le nombre de défauts dans le cas où les amorçages ne sont ni auto-extincteurs ni interrompus par des disjoncteurs à déclenchement rapide suivi de réenclenchement rapide.
- c) Les éclateurs provoquent une onde coupée augmentant ainsi la probabilité d'onde coupée près des bornes de l'appareil protégé. Cela doit être pris en considération pour l'isolation des enroulements à haute tension (voir également l'article 11).
- d) Les avaries au matériel peuvent être provoquées par l'arc de puissance s'établissant dans l'éclateur, si celui-ci est mal disposé. Par exemple, un éclateur installé sur la traversée d'un transformateur ou d'un disjoncteur doit être à une distance suffisante de la surface de la traversée pour éviter que l'arc de puissance soit soufflé contre l'isolateur.
- e) La disposition relative des éclateurs de chacune des phases doit être choisie de façon à limiter le risque de l'extension d'un arc aux phases voisines qui transformerait un défaut monophasé en défaut triphasé.

## 15 Spark gaps

The spark gap is a surge-protective device which consists of an open air gap between an energized electrode and an earth electrode

On supply systems operating at voltages up to 245 kV, spark gaps have proved satisfactory in practice in some countries with moderate lightning activity. The adjustment of the gap settings is often a compromise between protection and service continuity, but this difficulty can be largely overcome by the use of rapid automatic reclosing.

The sparkover voltage and the time-to-sparkover of the gap depend essentially on the distance between the electrodes, they are influenced by the shape of the electrodes and also by their disposition and distance relative to the neighbouring live and earthed parts.

In order to improve the operation of a spark gap under steep-fronted surges and to provide a flatter impulse sparkover-voltage time characteristic, the geometrical configuration of the simple rod-rod electrode arrangement can be modified, for instance by appropriate shaping of the electrodes and by provision of a central auxiliary electrode. In range A, duplex-type spark gaps have also proved advantageous in regions where birds or small animals are troublesome.

### 15.1 Protective characteristics of a spark gap

Because of:

- a) the dispersion of the sparkover voltage of an air gap,
- b) the increase in the sparkover voltage with increasing amplitude of the applied wave when sparkover takes place on the front of the wave,

the protection obtained by means of spark gaps is less precise and the protective level cannot be given as precisely as the protective level of non-linear surge arresters.

The performance of a spark gap under impulse (switching or lightning) is characterized by the 50% value and the standard deviation of its discharge voltage under standard laboratory conditions. Since spark gaps constitute typical self-restoring insulation, the contents of Clause 10 apply also to them. Furthermore, because of the reasons given in Item b) above, knowledge of the times-to-sparkover of the spark gap for values of the applied impulses well above the 50% sparkover value is often needed (see Appendix C).

### 15.2 Limitations of protective spark gaps

- a) When the spark gap operates on a voltage surge and a power-arc results, this arc frequently persists until disconnected by a fault-protective device of the system, this constitutes a phase-to-earth fault in the case of a system with directly earthed neutral, entails mechanical stresses on the various parts of the system equipment and may cause disturbances to users. The location of the spark gap should therefore be considered in relation to its effect on the system protection and operation.
- b) The spark gap is unacceptable from the point of view of service continuity if its presence noticeably increases the number of circuit outages, provided these flashovers are neither self-extinguishing nor interrupted by means of high-speed tripping circuit-breakers followed by high-speed reclosing.
- c) Spark-gap operation causes chopping of the wave, thus increasing the probability of producing chopped waves close to the terminals of protected apparatus. This has to be taken into consideration for insulation of high-voltage windings (see also Clause 11).
- d) Damage to the equipment may be caused by the power-arc across the spark gap if this is not installed in a suitable position. For instance, if a spark gap is fitted to the bushing of a transformer or circuit-breaker, its distance from the bushing surface must be sufficiently large to prevent a power-arc being blown against the insulator.
- e) The relative arrangement of the spark-gaps of each of the phases must be chosen so as to minimize the risk of an arc spreading to neighbouring phases, which would transform a single-phase fault into a three-phase fault.

## 16 Application des différents types de dispositifs de protection

### 16.1 Protection par parafoudres à résistance variable

La distance séparant l'objet à protéger du parafoudre réduit l'efficacité de celui-ci. En effet, lorsque le parafoudre est séparé de l'objet à protéger, ce dernier est soumis à une surtension supérieure au niveau de protection du parafoudre. Cette surélévation est due, premièrement, à la chute de tension inductive dans les connexions du parafoudre et dans la liaison entre parafoudre et appareil à protéger; deuxièmement, si la durée de propagation entre parafoudre et appareil n'est pas négligeable devant la durée de front de l'onde incidente, à un accroissement de courte durée de la tension aux bornes de l'appareil par rapport au niveau de protection du parafoudre. Aussi, en règle générale, installe-t-on le parafoudre aussi près que possible de l'appareil à protéger. En particulier, il vaut mieux, soit monter le parafoudre sur la cuve du transformateur, soit relier la borne à haute tension et la borne de terre du parafoudre au transformateur par les connexions les plus courtes possible.

De même, il faut placer les parafoudres à proximité des extrémités des câbles, lorsqu'une telle protection est nécessaire, et disposer des connexions aussi courtes que possible entre les bornes du parafoudre, d'une part, et le conducteur de phase et la gaine du câble, d'autre part.

*Note* — Dans le cas où les parafoudres sont placés près de l'appareil à protéger, les coefficients de sécurité suivants sont recommandés:

- a) Gamme A — Pour le matériel de la série I, on prendra un coefficient de sécurité de l'ordre de 1,4 entre le niveau de tenue aux chocs de foudre de l'appareil à protéger et le niveau de protection aux chocs du parafoudre (voir les articles 41 et 42 de la Publication 71-1 de la CEI). Pour le matériel de la série II, dans certains cas particuliers on pourra descendre jusqu'à 1,2.
- b) Gammes B et C — On prend généralement des coefficients de sécurité d'au moins 1,2 pour les surtensions de foudre.
- c) Gamme C — On prend généralement des coefficients de sécurité d'au moins 1,15 pour les surtensions de manœuvre et 1,25 pour les surtensions de foudre.

On tiendra compte également des considérations de la Publication 99-1A de la CEI.

Il est généralement plus facile d'installer des parafoudres à proximité de l'appareil à protéger dans la gamme de tensions A que dans les gammes de tensions B et C.

La surélévation due aux différents facteurs cités ci-dessus dépend de plusieurs conditions: distance du parafoudre, emplacement en amont ou en aval de l'appareil à protéger, caractéristiques de la ligne, capacité de l'appareil à protéger, configuration du poste et raideur de l'onde incidente. Cette surélévation est réduite par toutes les dispositions qui limitent la raideur de l'onde qui parvient au poste (extension des câbles de garde, capacité localisée, câble même de courte longueur, grand nombre de lignes connectées au poste).

### 16.2 Protection par parafoudres à expulsion

Ces parafoudres sont quelquefois utilisés sur les circuits de distribution à haute tension qui ne sont pas munis de fils de garde contre la foudre (gamme A).

La caractéristique tension-temps d'amorçage au choc d'un tel parafoudre est plus plate que celle d'un éclateur à tiges réglé à la même distance d'amorçage, mais pas tout à fait aussi plate que celle de certains types de matériels, tels qu'enroulements de transformateurs ou câbles.

Pour cette raison, un coefficient de sécurité convenable est nécessaire non seulement entre les tensions d'amorçage au choc de foudre du parafoudre et du matériel à protéger, mais également entre les tensions d'amorçage correspondantes sur le front de l'onde. La réalisation de ces conditions est facilitée par la pratique usuelle consistant à installer ces types de parafoudres à proximité du matériel à protéger.

Pour de plus amples informations concernant les applications de ces dispositifs, il est recommandé de se reporter à la Publication 99-2 de la CEI.

### 16.3 Protection par éclateur

La caractéristique tension-temps d'amorçage au choc d'un éclateur est habituellement beaucoup plus incurvée que celles de certains des types d'appareils à protéger, en particulier, celles des transformateurs et des câbles.

Par suite de la forme incurvée de la caractéristique tension-temps d'un éclateur, la distance pour laquelle la protection est assurée pour toutes les surtensions est généralement très faible, en général inférieure à quelques mètres. Si

## 16 Application of different protective devices

### 16.1 Protection with non-linear resistor-type surge arresters

The distance separating the object to be protected from the surge arrester reduces the efficiency of the latter. In fact, when the surge arrester is separated from the object to be protected, the latter is subjected to an overvoltage exceeding the protective level of the arrester. This increase is due, in the first place, to the inductive voltage drop in the arrester connections and in the link between arrester and apparatus to be protected, secondly, if the duration of propagation between arrester and apparatus is not negligible as compared to the duration of the incoming wave front, due to an increase of short duration of the voltage at the terminals of the apparatus with respect to the protective level of the arrester. Thus, it is a general rule to locate the arrester as close as possible to the apparatus to be protected. In particular, surge arresters should preferably either be installed on the transformer tank or its high-voltage and earth terminals should be connected to the transformer by the shortest possible connections.

Similarly, surge arresters should be fitted close to cable terminations if they need protection, with the shortest possible connections between the terminals of the surge arrester and the phase conductor and the cable sheath respectively.

*Note* — In the case of surge arresters close to the apparatus to be protected, the following safety factors are recommended:

- a) Range A — A safety factor of approximately 1.4 should be provided for Series I equipment between the rated lightning impulse withstand level of the apparatus to be protected and the impulse protective level of the surge arrester (see Clauses 41 and 42 of IEC Publication 71-1). For Series II equipment, factors down to 1.2 are accepted for specific cases.
- b) Ranges B and C — Safety factors of at least 1.2 are normally provided for lightning overvoltages.
- c) Range C — Safety factors of at least 1.15 for switching overvoltages and 1.25 for lightning overvoltages are normally adopted.

The considerations in IEC Publication 99-1A should also be taken into account.

The installation of surge arresters close to the apparatus to be protected can be achieved more easily in voltage range A than in voltage ranges B and C.

The increase due to both these factors depends on a number of conditions: distance of the surge arrester and its location ahead of, or behind, the apparatus to be protected, characteristics of the line, capacitance of the apparatus to be protected, arrangement of the station and steepness of the incoming wave. This increase can be limited by all arrangements which limit the steepness of the surge arriving at the station (extension of shielding wires, localized capacitance, cable (even short), large number of connected lines).

### 16.2 Protection with expulsion-type surge arresters

These arresters are sometimes used on high-voltage distribution circuits where shielding against lightning is not provided (range A).

The impulse sparkover voltage-time characteristic of such an arrester is flatter than that of a rod gap of the same sparkover distance, but not quite as flat as that of some types of equipment, for example a transformer winding or a cable.

For this reason, an adequate margin of safety is required, not only for the lightning-impulse sparkover voltage of the arrester and of the equipment to be protected, but also for the corresponding front-of-wave sparkover voltage. These conditions are assisted by the usual practice of installing these types of arrester close to the equipment to be protected.

For further information concerning the applications of these devices, reference should be made to IEC Publication 99-2.

### 16.3 Protection with spark gaps

The impulse sparkover voltage-time characteristic of a spark gap is usually much more curved than those of some of the types of apparatus to be protected, particularly those of transformers and cables.

Due to the curved shape of the voltage-time characteristic of a spark gap, the distance over which protection is ensured for all surges is very small, usually not more than a few metres. If a spark gap is applied for protection