

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

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

RECOMMANDATION DE LA C. E. I.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

(affiliated to the International Organization for Standardization — ISO)

I. E. C. RECOMMENDATION

Publication 56-1-A

Additif à la deuxième édition (1954) — Supplement to the second edition (1954)

1959

Règles de la C.E.I. pour les disjoncteurs à courant alternatif

Additif au Chapitre I: Règles relatives au fonctionnement lors de courts-circuits

- a) Recommandations pour les essais par la méthode d'essai direct sur des éléments séparés, relatifs aux pouvoirs de fermeture et de coupure des disjoncteurs.
 - b) Méthodes de détermination des formes de l'onde de la tension transitoire de rétablissement propre à un circuit.
-

I.E.C. Specification for alternating current circuit-breakers

Supplement to Chapter I: Rules for short-circuit conditions

- a) Recommendations for the unit testing by direct methods of circuit-breakers for making-capacity and breaking-capacity.
 - b) Methods of determining inherent restriking-voltage waveforms.
-



Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale

1, rue de Varembe
Genève, Suisse

IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60056-1A:1959

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

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

RECOMMANDATION DE LA C. E. I.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

(affiliated to the International Organization for Standardization — ISO)

I. E. C. RECOMMENDATION

Publication 56-1-A

Additif à la deuxième édition (1954) — Supplement to the second edition (1954)

1959

Règles de la C.E.I. pour les disjoncteurs à courant alternatif

Additif au Chapitre I: Règles relatives au fonctionnement lors de courts-circuits

- a) Recommandations pour les essais par la méthode d'essai direct sur des éléments séparés, relatifs aux pouvoirs de fermeture et de coupure des disjoncteurs.
 - b) Méthodes de détermination des formes de l'onde de la tension transitoire de rétablissement propre à un circuit.
-

I.E.C. Specification for alternating current circuit-breakers

Supplement to Chapter I: Rules for short-circuit conditions

- a) Recommendations for the unit testing by direct methods of circuit-breakers for making-capacity and breaking-capacity.
 - b) Methods of determining inherent restriking-voltage waveforms.
-



Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale

1, rue de Varembe
Genève, Suisse

SOMMAIRE

	Pages
PRÉAMBULE	4
PRÉFACE	4
A. — RECOMMANDATIONS POUR LES ESSAIS PAR LA MÉTHODE D'ESSAI DIRECT SUR DES ÉLÉMENTS SÉPARÉS, RELATIFS AUX POUVOIRS DE FERMETURE ET DE COUPURE DES DISJONCTEURS	
1. Introduction	8
2. Définitions	8
a) Élément de coupure	8
b) Élément de fermeture	10
c) Essais directs sur éléments séparés	10
d) Tension de rétablissement à fréquence de service d'un élément	10
e) Tension transitoire de rétablissement d'un élément	10
f) Tension appliquée à un élément	10
3. Conditions que doit remplir le disjoncteur	10
a) Identité des éléments	10
b) Etat du milieu extincteur de l'arc	10
c) Alimentation en agent d'extinction	10
d) Indépendance des canaux d'échappement des gaz	10
e) Répartition de la tension	12
4. Détermination de la répartition de la tension entre les éléments	12
a) Méthode de mesure	12
i) Éléments de coupure	12
ii) Éléments de fermeture	12
b) Influence des conditions de mise à la terre et des masses avoisinantes	12
c) Influence des salissures extérieures	14
5. Essais directs sur éléments séparés	14
a) Essais de coupure	14
i) Choix des éléments à essayer	14
ii) Tension de rétablissement	14
b) Essais de fermeture	16
i) Choix des éléments à essayer	16
ii) Tension appliquée	16
c) Cycles d'essais	16
B. — MÉTHODES DE DÉTERMINATION DES FORMES DE L'ONDE DE LA TENSION TRANSITOIRE DE RÉTABLISSEMENT PROPRE A UN CIRCUIT	
1. Introduction	18
2. Résumé général des méthodes recommandées	18
3. Considération détaillée des méthodes recommandées	20
4. Comparaison des méthodes	26
Tableau 1: Méthodes principales de détermination des formes de l'onde de la tension transi- toire de rétablissement propre au circuit	28
Figures	34-37
Bibliographie	38

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
PREFACE	5
A. — RECOMMENDATIONS FOR THE UNIT TESTING BY DIRECT METHODS, OF CIRCUIT-BREAKERS FOR MAKING-CAPACITY AND BREAKING-CAPACITY	
1. Introduction	9
2. Definitions	9
a) Breaking-unit	9
b) Making-unit	11
c) Unit test by direct methods	11
d) Unit recovery-voltage	11
e) Unit restriking-voltage	11
f) Unit applied-voltage	11
3. Conditions with which the circuit-breaker must comply	11
a) Identical nature of the units	11
b) Condition of the arc-extinguishing medium	11
c) Supply of the arc-extinguishing medium	11
d) Operating conditions of exhaust channels	11
e) Voltage distribution	13
4. Determination of the voltage distribution among units	13
a) Method of measurement	13
i) For breaking-units	13
ii) For making-units	13
b) Influence of circuit earthing and of adjacent objects	13
c) Effect of external pollution	15
5. Unit tests by direct methods	15
a) Breaking tests	15
i) Choice of the units for test	15
ii) Recovery-voltage	15
b) Making tests	17
i) Choice of the units for test	17
ii) Applied voltage	17
c) Test duties	17
B. — METHODS OF DETERMINING INHERENT RESTRIKING-VOLTAGE WAVEFORMS	
1. Introduction	19
2. General summary of the recommended methods	19
3. Detailed consideration of the recommended methods	21
4. Comparison of the methods	27
Table 1: Main methods of determining inherent restriking-voltage waveforms	29
Figures	34-37
Bibliography	38

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

RÈGLES DE LA C.E.I. POUR LES DISJONCTEURS A COURANT ALTERNATIF

ADDITIF AU CHAPITRE I: RÈGLES RELATIVES AU FONCTIONNEMENT LORS DE COURTS-CIRCUITS

- a) **Recommandations pour les essais par la méthode d'essai direct sur des éléments séparés, relatifs aux pouvoirs de fermeture et de coupure des disjoncteurs.**
- b) **Méthodes de détermination des formes de l'onde de la tension transitoire de rétablissement propre à un circuit.**

PRÉAMBULE

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

PRÉFACE

La présente publication constitue un supplément au Chapitre I: Règles relatives au fonctionnement lors de courts-circuits, de la deuxième édition des Règles de la C.E.I. pour les disjoncteurs à courant alternatif, qui fait l'objet de la Publication 56-1 de la C.E.I., éditée en 1954.

Elle comporte deux additifs au Chapitre I:

- a) **Recommandations pour les essais par la méthode d'essai direct sur des éléments séparés, relatifs aux pouvoirs de fermeture et de coupure des disjoncteurs.**
- b) **Méthodes de détermination des formes de l'onde de la tension transitoire de rétablissement propre à un circuit.**

L'inclusion de recommandations pour les essais des disjoncteurs par la méthode d'essai direct sur des éléments séparés fut décidée lors de la réunion du Comité d'Etudes N° 17 tenue à Opatija en 1953, où le premier projet fut discuté. A la suite de ces discussions, un nouveau projet fut soumis aux Comités nationaux en avril 1954, pour approbation suivant la Règle des Six Mois.

Les commentaires reçus furent discutés à Londres en 1955 et un projet définitif fut diffusé aux Comités nationaux pour approbation suivant la Procédure des Deux Mois.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

I.E.C. SPECIFICATION FOR ALTERNATING CURRENT CIRCUIT-BREAKERS

SUPPLEMENT TO CHAPTER I: RULES FOR SHORT-CIRCUIT CONDITIONS

- a) Recommendations for the unit testing by direct methods of circuit-breakers for making capacity and breaking capacity.
- b) Methods of determining inherent restriking-voltage waveforms.

FOREWORD

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

PREFACE

The present publication forms a supplement to Chapter I: Rules for short-circuit conditions, of the second edition of the I.E.C. Specification for alternating current circuit-breakers, which was issued as I.E.C. Publication 56-1 in 1954.

It consists of two additions to Chapter I:

- a) Recommendations for the unit-testing, by direct methods, of circuit-breakers for making-capacity and breaking-capacity.
- b) Methods of determining inherent restriking-voltage waveforms.

The inclusion of Recommendations for the unit testing of circuit-breakers was decided upon at the meeting of Technical Committee No. 17 held in Opatija, in 1953, when the first draft was discussed. As a result of these discussions, a further draft was submitted to the National Committees for approval under the Six Months' Rule in April 1954.

The comments received were discussed in London in 1955 and a final draft was circulated to the National Committees for approval under the Two Months' Procedure in March 1957.

Les Comités nationaux des pays suivants ont voté explicitement en faveur de la publication:

Allemagne	Pays-Bas
Autriche	Pologne
Belgique	Royaume-Uni
Danemark	Suède
Etats-Unis d'Amérique	Suisse
Finlande	Union des Républiques Socialistes
France	Soviétiques
Italie	Union Sud-Africaine
Japon	Yougoslavie

Le second additif: Méthodes de détermination des formes de l'onde de la tension transitoire de rétablissement propre à un circuit, fut mis en discussion pour la première fois lors de la réunion tenue à Munich en 1956. A la suite de cette réunion, un projet fut soumis aux Comités nationaux en janvier 1958, pour approbation suivant la Règle des Six Mois.

Les Comités nationaux des pays suivants ont voté explicitement en faveur de la publication:

Allemagne	Pays-Bas
Autriche	Roumanie
Belgique	Royaume-Uni
Danemark	Suède
Etats-Unis d'Amérique	Suisse
France	Tchécoslovaquie
Hongrie	Union des Républiques Socialistes
Italie	Soviétiques
Japon	Union Sud-Africaine
Norvège	Yougoslavie

The National Committees of the following countries voted explicitly in favour of publication:

Austria	Poland
Belgium	Sweden
Denmark	Switzerland
Finland	Union of South Africa
France	Union of Soviet Socialist
Germany	Republics
Italy	United Kingdom
Japan	United States of America
Netherlands	Yugoslavia

The second addition, Methods of determining inherent restriking voltage waveforms, was first discussed at the meeting held in Munich in 1956. As a result of this meeting, a draft was submitted to the National Committees for approval under the Six Months' Rule in January 1958.

The National Committees of the following countries voted explicitly in favour of publication:

Austria	Norway
Belgium	Rumania
Czechoslovakia	Sweden
Denmark	Switzerland
France	Union of South Africa
Germany	Union of Soviet Socialist
Hungary	Republics
Italy	United Kingdom
Japan	United States of America
Netherlands	Yugoslavia

A. — RECOMMANDATIONS POUR LES ESSAIS PAR LA MÉTHODE D'ESSAI DIRECT SUR DES ÉLÉMENTS SÉPARÉS, RELATIFS AUX POUVOIRS DE FERMETURE ET DE COUPURE DES DISJONCTEURS

1. Introduction

Lorsque la puissance maximum de court-circuit disponible dans une station d'essai n'est pas suffisante pour permettre d'effectuer la série complète des essais de court-circuit, telle qu'elle figure au chapitre I de la Publication 56 de la C.E.I., sur un disjoncteur à pôles séparés, et lorsque la partie de chaque pôle qui sert à la coupure se compose de plusieurs éléments de coupure montés électriquement en série, des essais directs sur éléments séparés peuvent être effectués. Le guide ci-après, concernant des essais supplémentaires de cette nature à effectuer sur un ou plusieurs de ces éléments, est recommandé comme fournissant la meilleure indication sur le pouvoir de coupure du disjoncteur qui puisse être obtenue avec la puissance disponible dans la station d'essai considérée.

De même, si la partie de chaque pôle qui sert à la fermeture se compose de plusieurs éléments de fermeture en série, le guide ci-après, concernant des essais supplémentaires à effectuer sur un ou plusieurs de ces éléments, est recommandé comme fournissant la meilleure indication sur le pouvoir de fermeture du disjoncteur qui puisse être obtenue avec la puissance disponible dans la station d'essai considérée.

De tels essais sont désignés sous le nom d'essais directs sur éléments séparés. Ils consistent en essais à pleine puissance effectués sur un élément ou sur un groupe d'éléments. Avant de procéder à des essais par éléments séparés, cependant, le disjoncteur complet ou un pôle complet du disjoncteur doit être essayé comme il est indiqué à l'article 5 c) du présent additif.

Les essais supplémentaires spécifiés dans cet additif sont applicables seulement aux types de disjoncteurs qui satisfont aux conditions prescrites à l'article 3.

Les essais directs sur éléments séparés effectués sur un disjoncteur ne satisfaisant pas complètement à ces conditions peuvent dans certains cas, et pourvu que des précautions appropriées soient prises, fournir également des renseignements utiles sur les pouvoirs de fermeture et de coupure de ce disjoncteur, mais ils ne peuvent pas être considérés comme des essais par éléments séparés valables aux termes des présentes recommandations.

Note: D'autres méthodes d'essai des disjoncteurs, telles que les essais synthétiques, les essais conjugués, etc. sont à l'étude.

2. Définitions

Les termes ci-après utilisés dans le présent additif ont les significations suivantes:

- a) *Élément de coupure.* Un élément de coupure est une partie d'un disjoncteur servant à la coupure en commun avec d'autres éléments identiques et qui est construite d'une façon telle que son comportement lors de la coupure par l'ensemble du disjoncteur ne soit pas influencé par le fonctionnement des autres parties de ce disjoncteur.
- b) *Élément de fermeture.* Un élément de fermeture est une partie d'un disjoncteur servant à la fermeture en commun avec d'autres éléments identiques et qui est construite d'une façon telle que son comportement lors de la fermeture par l'ensemble du disjoncteur ne soit pas influencé par le fonctionnement des autres parties de ce disjoncteur.

Note 1. Un même élément peut être à la fois un élément de coupure et un élément de fermeture. Chaque élément de coupure ou de fermeture peut comporter plusieurs intervalles de coupure ou de fermeture en série, chacun de ces intervalles pouvant lui-même être constitué par des intervalles principaux et des intervalles auxiliaires.

Note 2. Chaque fois que le terme « élément » sera employé dans cet additif, il signifiera aussi bien « élément de coupure » que « élément de fermeture » selon le cas.

A. — RECOMMENDATIONS FOR THE UNIT TESTING BY DIRECT METHODS OF CIRCUIT-BREAKERS FOR MAKING-CAPACITY AND BREAKING-CAPACITY

1. Introduction

When the maximum short-circuit power available at a testing station is not sufficient to make the full series of short-circuit tests, as given in Chapter I of I.E.C. Publication 56, on a circuit-breaker of the segregated-pole type, and when that part of each pole which serves for breaking incorporates several breaking units electrically connected in series, unit-tests by direct methods may be made. The following guide for supplementary tests of this kind, to be made on one or more of the units, is recommended for providing the best indication of the breaking-capacity of the circuit-breaker which can be obtained with the available power of the relevant testing station.

Similarly, if that part of each pole which serves for making incorporates several making-units in series, the following guide for supplementary tests, to be made on one or more of the units, is recommended for providing the best indication of the making-capacity of the circuit-breaker which can be obtained with the available power of the relevant testing-station.

Such tests are referred to as unit tests by direct methods. They consist of full scale tests made on a unit or group of units. Before making unit tests by direct methods, however, the complete circuit-breaker, or one complete pole of the circuit-breaker, shall be tested as set out in Clause 5 c) of this supplement.

The supplementary tests specified in this supplement are applicable only to those types of circuit-breakers which comply with the conditions specified in Clause 3.

Unit tests by direct methods made on a circuit-breaker which does not entirely comply with these conditions may, in certain cases and provided that suitable precautions are taken, also give useful information on the breaking-capacity and making-capacity of such a circuit-breaker, but such tests cannot be considered as valid unit tests in accordance with these Recommendations.

Note: Other methods of testing circuit-breakers, such as synthetic tests, two-part tests, etc., are under consideration.

2. Definitions

The terms used in this supplement have the following definitions:

- a) *Breaking-unit.* A breaking-unit is a part of a circuit-breaker which serves for breaking in common with other identical units, and which is so constructed that its behaviour during breaking by the whole circuit-breaker is not influenced by the operation of the other parts of the circuit-breaker.
- b) *Making-unit.* A making-unit is a part of a circuit-breaker which serves for closing in common with other identical units, and which is so constructed that its behaviour during closing by the whole of the circuit-breaker is not influenced by the operation of the other parts of the circuit-breaker.

Note 1. A breaking-unit may also be a making-unit. Each breaking-unit or making-unit may have several breaks or gaps in series, and each of these may itself incorporate main and auxiliary breaks or gaps.

Note 2. Wherever the term "unit" is used in this supplement, it refers to either breaking-unit or making-unit, whichever is appropriate.

- c) *Essais directs sur éléments séparés.* Un essai direct sur éléments séparés est un essai de détermination des pouvoirs de coupure ou de fermeture effectué sur un élément ou un groupe d'éléments avec le plein courant correspondant au cycle d'essai et sous la fraction appropriée de la tension de rétablissement (ou de la tension appliquée) spécifiée pour l'essai du disjoncteur complet.
- d) *Tension de rétablissement à fréquence de service d'un élément.* La tension de rétablissement à fréquence de service d'un élément est la tension de rétablissement qui se manifeste aux bornes d'un élément de coupure ou d'un groupe d'éléments de coupure, au cours du fonctionnement du disjoncteur complet.

Cette tension dépend de la tension de rétablissement aux bornes du pôle complet du disjoncteur, du nombre d'éléments de coupure ou de groupes d'éléments de coupure par pôle, et de la répartition de la tension entre ces éléments ou groupes d'éléments.
- e) *Tension transitoire de rétablissement d'un élément.* La tension transitoire de rétablissement d'un élément est la tension transitoire de rétablissement qui se manifeste aux bornes d'un élément de coupure ou d'un groupe d'éléments de coupure au cours du fonctionnement du disjoncteur complet. Sa valeur de crête et sa vitesse d'accroissement dépendent de la tension transitoire de rétablissement aux bornes du pôle complet du disjoncteur, du nombre d'éléments de coupure ou de groupes d'éléments de coupure par pôle, et de la répartition de la tension entre ces éléments ou groupes d'éléments.
- f) *Tension appliquée à un élément.* La tension appliquée à un élément est la tension appliquée qui se manifeste aux bornes d'un élément de fermeture, ou d'un groupe d'éléments de fermeture, au cours du fonctionnement du disjoncteur complet. Sa valeur dépend de la tension appliquée aux bornes du pôle complet du disjoncteur, du nombre d'éléments de fermeture ou de groupes d'éléments de fermeture par pôle, et de la répartition de la tension entre ces éléments ou groupes d'éléments.

3. Conditions que doit remplir le disjoncteur

Le disjoncteur doit remplir les conditions suivantes:

- a) *Identité des éléments.* Les différents éléments du disjoncteur doivent être identiques dans leur forme, leurs dimensions et leurs conditions mécaniques de fonctionnement (en particulier, la séparation des contacts lors de la coupure et l'établissement des contacts lors de la fermeture doivent être pratiquement simultanés); seuls les dispositifs de répartition de la tension entre les éléments peuvent différer d'un élément à l'autre.

La séparation ou l'établissement des contacts sont considérés comme étant pratiquement simultanés lorsque la séparation des contacts ou leur établissement a lieu sur l'élément où ils interviennent en dernier, au plus tard 1/4 de période après la séparation ou l'établissement des contacts sur l'élément où ils sont intervenus en premier.
- b) *Etat du milieu extingueur de l'arc.* La construction du disjoncteur doit être telle qu'au cours des opérations de coupure et de fermeture, l'état des milieux où se produisent les arcs (températures, pression, etc.) dans chaque élément, ne soit pas influencé par le fonctionnement des autres éléments.
- c) *Alimentation en agent d'extinction.* Lorsqu'il s'agit de disjoncteurs comportant un apport d'agent d'extinction d'origine externe, comme c'est le cas pour les disjoncteurs à air comprimé ou les disjoncteurs à injection d'huile par impulsion mécanique par exemple, l'alimentation de chaque élément doit être pratiquement indépendante de l'alimentation des autres éléments et la réalisation des canalisations doit être telle que tous les éléments soient alimentés simultanément dans le temps.
- d) *Indépendance des canaux d'échappement des gaz.* La construction du disjoncteur doit être telle que l'état du milieu des canaux d'échappement de chaque élément dans lesquels des gaz ou des vapeurs ionisés peuvent être présents ne soit pas influencé par le fonctionnement des autres éléments.

- c) *Unit test by direct methods.* A unit test by direct methods is a breaking or making capacity test made on a unit or a group of units at the full current required by the test duty and at the appropriate fraction of the recovery-voltage (or applied voltage) specified for the test on the complete circuit-breaker.
- d) *Unit recovery-voltage.* Unit recovery-voltage is the recovery-voltage that appears across the terminals of a breaking-unit or a group of breaking-units during the operation of the complete circuit-breaker. This voltage is dependent upon the recovery-voltage across the terminals of the complete pole of the circuit-breaker, the number of breaking-units or groups of breaking-units per pole, and the distribution of voltage among these units or groups of units.
- e) *Unit restriking-voltage.* Unit restriking-voltage is the restriking-voltage that appears across the terminals of a breaking-unit or group of breaking-units during the operation of the complete circuit-breaker. Its peak value and its rate-of-rise are dependent upon the restriking voltage across the terminals of the complete pole of the circuit-breaker, the number of breaking-units or groups of breaking-units per pole, and the distribution of voltage among these units or groups of units.
- f) *Unit applied voltage.* Unit applied voltage is the applied voltage that appears at the terminals of a making-unit or a group of making-units in the course of the operation of the complete circuit-breaker. Its value is dependent upon the applied voltage across the terminals of the complete pole of the circuit-breaker, the number of making-units or group of making-units per pole, and the distribution of voltage among these units or groups of units.

3. Conditions with which the circuit-breaker must comply

The circuit-breaker shall comply with the following conditions:

- a) *Identical nature of the units.* The various units of the circuit-breaker shall be identical in their shape, in their dimensions and in their mechanical operation (particularly in the practically simultaneous opening and the practically simultaneous closing of the contacts); only the devices for controlling the voltage distribution among units are permitted to be different.

The opening and closing of the contacts is considered to be practically simultaneous when, for the unit in which the contacts separate or touch last, this occurs not later than $1/4$ cycle after the contacts separate or touch in the unit where this occurs first.
- b) *Condition of the arc-extinguishing medium.* The construction of the circuit-breaker shall be such that during the breaking and making operations the condition of the medium in which the arc is created (e.g. temperature and pressure) in each unit is not influenced by the operation of the other units.
- c) *Supply of the arc-extinguishing medium.* For a circuit-breaker using a supply of arc-extinguishing medium from a source external to the units, as is the case for instance with an air-blast circuit-breaker or a circuit-breaker with oil injection by means of a mechanical impulse, the supply to each unit shall for all practical purposes be independent of the supply to the other units and the arrangement of the supply pipes shall be such as to ensure that all the units are fed simultaneously.
- d) *Operating conditions of exhaust channels.* The construction of the circuit-breaker shall be such that the operating conditions of the exhaust channels of each unit, in which ionized gases or vapours may be present, are not influenced by the operation of the other units.

- e) *Répartition de la tension.* Les dispositifs de répartition de la tension entre les éléments doivent être tels que la répartition soit pratiquement indépendante de la valeur du courant coupé et qu'elle soit pratiquement la même pour la tension de rétablissement à fréquence de service et la tension transitoire de rétablissement. La vérification de ces conditions doit être faite par les essais spécifiés à l'article 4 a) et par ceux effectués sur deux éléments comme spécifié dans l'article 5 a), i).

4. Détermination de la répartition de la tension entre les éléments

a) *Méthode de mesure.*

- i) *Éléments de coupure.* Il faut relever à l'oscillographe cathodique la tension transitoire de rétablissement aux bornes des différents éléments lors de trois essais de coupure effectués sur un pôle complet sous la tension de rétablissement spécifiée pour ce pôle du courant correspondant à la fraction la plus élevée du pouvoir de coupure nominal que l'on puisse réaliser. L'oscillographe utilisé devra permettre de relever en même temps la tension aux bornes du pôle complet et la tension aux bornes d'au moins un élément ou groupe d'éléments. Il doit être démontré que le diviseur de tension de l'oscillographe ne perturbe pas la répartition, ce qui peut être vérifié par exemple en faisant successivement les mesures avec deux diviseurs dont l'un a une impédance double de l'autre.

La fraction de référence de la tension aux bornes de chaque élément ou groupe d'éléments est la moyenne des fractions déterminées au cours des trois différents essais de coupure pour la valeur de crête de la tension transitoire de rétablissement. Il sera vérifié que pour chaque élément ou groupe d'éléments et pour chaque essai de coupure, la valeur de la fraction pour chacune des crêtes de la tension transitoire de rétablissement et pour la valeur de crête de la tension de rétablissement à fréquence de service ne diffère pas de plus de 10% de la fraction de référence de cet élément particulier ou de ce groupe particulier d'éléments. S'il en était autrement l'essai par éléments séparés ne serait pas valable.

Note: Pour tenir compte de l'influence de l'amplitude du courant coupé sur la conductivité post-arc il peut être nécessaire d'effectuer le même essai avec le courant correspondant au pouvoir de coupure nominal et la fraction la plus grande possible de la tension de rétablissement, et de tenir compte des résultats dans la détermination de la tension de rétablissement à appliquer selon l'article 5 a) (ii).

- ii) *Élément de fermeture.* La répartition de la tension se mesure à la fréquence de service et sous une tension convenable, les éléments de fermeture étant dans la position « ouvert ». Toutefois, si le disjoncteur comporte des dispositifs de répartition de la tension qui ne sont mis en jeu qu'au cours de la fermeture et s'il n'est pas possible de maintenir les éléments de fermeture dans une position intermédiaire dans laquelle les dispositifs de répartition de la tension interviennent, la répartition de la tension sera mesurée à l'aide d'un oscillographe lors de l'opération de fermeture. La répartition à considérer sera alors celle qui existe immédiatement après la mise en jeu de ces dispositifs.

b) *Influence des conditions de mise à la terre et des masses avoisinantes.*

Pour les disjoncteurs dont les éléments ne sont pas disposés symétriquement par rapport à la terre, la répartition de la tension entre les différents éléments peut varier suivant la position d'un défaut à la terre par rapport au disjoncteur.

Pour tenir compte de l'influence de la dissymétrie des éléments de chaque pôle par rapport à la terre, la détermination de la répartition devra être faite, chacune des bornes du pôle du disjoncteur étant successivement reliée à la terre.

D'autre part, pour tous les disjoncteurs, sauf ceux dont l'ensemble des éléments de chaque pôle est enfermé dans une enveloppe métallique mise à la terre, la répartition de la tension peut varier avec la plus ou moins grande proximité des masses avoisinantes.

- e) *Voltage distribution.* The devices used for voltage distribution among the units shall be such that the distribution is practically independent of the magnitude of the breaking-current and is practically the same both for the recovery-voltage and the restriking-voltage. These conditions shall be verified by the test specified in Clause 4 a) and by the test on two units specified in Clause 5 a) i).

4. Determination of voltage distribution among units

a) *Method of measurement.*

- i) *For breaking-units.* A cathode-ray oscillograph shall be used to record the restriking-voltage across the different units during three breaking tests on a complete pole at the voltage specified for this pole, and at the highest fraction of the rated breaking-capacity that can be obtained. The oscillograph shall record simultaneously the voltage across the complete pole and the voltage across at least one unit or a group of units. It shall be ascertained that the voltage divider of the oscillograph does not influence the voltage distribution. This can be verified, for instance, by taking the measurements successively with two dividers, one of which has double the impedance of the other.

The reference fraction of the voltage across each unit or group of units is the mean of the fractions determined during the three individual tests for the peak value of the restriking-voltage. It shall be verified that, for each unit or group of units and for each test, the value of the fraction for each peak of the restriking-voltage and for the peak value of the recovery-voltage does not differ by more than 10% from the reference fraction of that particular unit or group of units, otherwise unit-testing is not valid.

Note: To take account of the influence of the magnitude of the breaking-current on post-arc conductivity, it may be necessary to make the same test with rated breaking-current and the maximum available fraction of recovery-voltage, and to take the results into consideration in determining the recovery-voltage to be applied in accordance with Clause 5 a) ii).

- ii) *For making-units.* The voltage distribution across making-units shall be measured at the service frequency and at a convenient voltage, the making-units being in the "open" position. However, if the circuit-breaker is fitted with voltage grading devices which are only brought into effect during closing operations, and if it is not possible to hold the making-units in an intermediate position where the voltage grading devices come into effect, the voltage distribution shall be measured by means of an oscillograph during a closing operation. The voltage distribution shall then be considered as that which exists immediately after the devices have been inserted.

b) *Influence of circuit earthing and of adjacent objects*

For circuit-breakers in which the units are not arranged symmetrically with respect to earth, the voltage distribution among the different units may vary according to the position of an earth fault in relation to the circuit-breaker.

To take into account the influence of asymmetrical arrangements of the breaking-units of each pole with respect to earth, the determination of the voltage distribution shall be made with each of the terminals of the pole of the circuit-breaker successively connected to earth.

Furthermore, for all circuit-breakers, except those in which all units of each pole are contained in a metal enclosure connected to earth, the voltage distribution may vary with the proximity of adjacent objects.

Pour tenir compte de l'influence des masses avoisinantes si l'essai est fait sur un pôle d'un disjoncteur tripolaire, c'est le pôle du milieu qui devra être choisi, toutes les coupures des autres pôles étant shuntées et leurs parties métalliques mises à la terre. Dans tous les autres cas une cloison conductrice ou semi-conductrice sera disposée au voisinage du pôle essayé à une distance de ce pôle indiquée par le constructeur, à moins que l'ensemble des éléments de chaque pôle ne soit enfermé dans une enveloppe métallique mise à la terre. Toutefois, lorsque les éléments sont shuntés par des résistances qui laissent passer, sous la tension spécifiée pour le pôle, un courant de 0,25 ampère ou plus, la répartition de la tension est indépendante de la proximité des masses avoisinantes et de ce fait, les précautions indiquées ci-dessus sont inutiles.

- c) *Influence des salissures extérieures.* Les salissures extérieures peuvent avoir de l'influence sur la répartition de la tension entre les éléments parce qu'elles peuvent être différentes d'un élément à un autre. La façon de déterminer cette influence pour des conditions normales de salissure est à l'étude.

Note: Cette influence dépend du rapport entre la résistance superficielle d'un élément ou d'un groupe d'éléments salis et l'impédance du dispositif de répartition correspondant à ce même élément ou groupe d'éléments. Plus ce rapport est grand moins grande sera l'influence de la salissure.

5. Essais directs sur éléments séparés

Le disjoncteur complet ou un pôle complet du disjoncteur doit être utilisé pour les essais.

a) *Essais de coupure.*

- i) *Choix des éléments à essayer.* Des essais directs sur éléments doivent être faits sur le nombre maximum d'éléments en série pouvant être essayés à la station d'essai jusqu'au courant correspondant au pouvoir de coupure nominal du disjoncteur à la tension de rétablissement spécifiée plus loin en ii). En vue de déterminer l'effet éventuel de la conductivité post-arc, les essais devront être effectués, si possible, sur au moins deux éléments en série et la répartition de la tension transitoire de rétablissement aux bornes de chaque élément devra être mesurée.

Cependant, pour les éléments comportant deux intervalles de coupure identiques dont le point commun est accessible, ces essais peuvent être effectués sur un seul élément.

Si l'influence de la conductivité post-arc est de rendre la répartition de la tension transitoire de rétablissement moins uniforme, la tension pour l'essai sur un élément devra être augmentée en conséquence.

Note: La condition que les essais devront être effectués sur un minimum de deux éléments ou de deux intervalles de coupure identiques d'un même élément, comme spécifié précédemment, a été considérée comme nécessaire jusqu'à plus ample information sur l'influence de la conductibilité post-arc sur la répartition de la tension.

- ii) *Tension de rétablissement.* La tension de rétablissement aux bornes de l'élément ou du groupe d'éléments en série essayé devra être au moins égale à la plus élevée de celles relevées aux bornes du nombre correspondant d'éléments en série lors de la détermination de la répartition de la tension entre les éléments, compte tenu de l'influence des masses avoisinantes, des conditions de mise à la terre et de l'influence des salissures extérieures.

Si lors des essais d'un groupe d'éléments la répartition de la tension entre les différents éléments de ce groupe est plus uniforme que lors des essais sur l'appareil complet avec courants réduits, la tension aux bornes du groupe devra être augmentée de façon telle que la tension de rétablissement aux bornes d'un élément soit au moins égale à la tension de rétablissement se présentant sur l'élément le plus sollicité dans le pôle complet du disjoncteur.

Note: La façon de déterminer l'influence des salissures extérieures est à l'étude.

In order to take into account the influence of adjacent objects, if the test is made on one pole of a three-pole circuit-breaker, the centre pole shall be chosen, all the breaks of the other poles being short-circuited and their metal parts being earthed. In all other cases a conducting or semi-conducting partition shall be placed near the tested pole, at a distance from this pole as indicated by the manufacturer, unless all the units of each pole are contained in a metal enclosure connected to earth. However, when the units are shunted by resistors which carry, at the voltage specified for the pole, a current of 0.25 ampere or more, the distribution of the voltage is then independent of the proximity of adjacent objects, and therefore the above-mentioned precautions are unnecessary.

- c) *Effect of external pollution.* External pollution can influence the voltage distribution among the units because it may be different for one unit compared with another. The method for determining this influence for normal pollution is under consideration.

Note: This influence depends upon the ratio between the surface resistance of a polluted unit or a group of units, and the impedance of the voltage distribution device across the same unit or group of units. The larger this ratio, the smaller becomes the influence of pollution.

5. Unit tests by direct methods

The complete circuit-breaker, or the complete pole of a circuit-breaker, shall be available and operated during the tests.

a) *Breaking tests.*

- i) *Choice of the units for test.* Unit tests by direct methods shall be made on the maximum number of units in series which can be tested at the testing station up to the current corresponding to the rated breaking-capacity of the circuit-breaker with a recovery-voltage as specified in ii) below.

In order to determine the effect, if any, of post-arc conductivity, the tests shall, if possible, be made on at least two units in series, and the distribution of restriking-voltage across each unit shall be recorded. However, for units which have two identical breaks with an accessible common point, these tests may be made on only one unit. If the influence of post-arc conductivity is to make the distribution of restriking-voltage less uniform, the voltage for the testing of one unit should be increased accordingly.

Note: The requirement that the tests shall be made on at least two units, or two identical parts of a unit as specified above, is considered to be necessary until further information is available on the influence of post-arc conductivity on the voltage distribution.

- ii) *Recovery-voltage.* The recovery-voltage across the terminals of the test unit or group of units in series shall be not less than the highest recovery-voltage recorded across the corresponding number of units in series during the determination of the voltage distribution among the units, taking into consideration the influence of adjacent objects, earthing conditions and the influence of external pollution.

If, when testing a group of units, the voltage distribution among the different units is more uniform than in the tests on the complete circuit-breaker with reduced currents, the voltage at the terminals of the group shall be increased so that the recovery-voltage at the terminals of a unit is at least equal to the recovery-voltage occurring on the most highly stressed unit in the complete pole of the circuit-breaker.

Note: The method of determining the influence of external pollution is under consideration.

b) *Essais de fermeture.*

- i) *Choix des éléments à essayer.* L'essai par éléments séparés doit être fait sur le nombre maximum d'éléments en série pouvant être essayés à la station d'essai jusqu'au courant correspondant au pouvoir de fermeture nominal du disjoncteur à la tension appliquée spécifiée en ii).
- ii) *Tension appliquée.* La tension appliquée aux bornes de l'élément ou groupe d'éléments en série essayés devra être au moins égale à la tension la plus élevée mesurée aux bornes du nombre correspondant d'éléments en série lors de la détermination de la répartition de la tension entre les éléments, multipliée par le rapport de la tension appliquée comme spécifiée à l'article 59 du Chapitre I à la tension appliquée aux bornes du pôle complet pendant l'essai de mesure de la répartition des tensions.

Si lors des essais de fermeture la durée d'arc est plus courte que lors des essais effectués sur l'appareil complet, des essais seront refaits avec une tension appliquée augmentée de façon que la durée d'arc soit au moins égale à celle obtenue sur l'appareil complet.

c) *Cycles d'essais.*

Il devra être fait sur le disjoncteur complet ou sur un pôle complet du disjoncteur les essais ci-dessous selon les spécifications des articles 56 à 65 du Chapitre I:

- I. Tous les cycles d'essais spécifiés à l'article 65, qui pourront être faits à la tension de rétablissement spécifiée.
- II. Un cycle d'essais de coupure à la fraction maximum du pouvoir de coupure nominal exprimé en ampères qui peut être obtenu à la tension de rétablissement spécifiée.
- III. Un cycle d'essais de fermeture à la fraction maximum du pouvoir de fermeture nominal qui peut être obtenu à la tension appliquée spécifiée.
- IV. Le reste des cycles d'essais spécifiés à l'article 65 avec les valeurs de courant correspondantes, mais à la plus haute tension de rétablissement ou à la plus haute tension appliquée qui peuvent être obtenues à la station d'essais.

Les essais directs sur éléments séparés devront être employés pour les valeurs de courant spécifiées à l'article 65 plus grandes que celles auxquelles le disjoncteur complet ou un pôle complet de disjoncteur peuvent être essayés à la tension de rétablissement et à la tension appliquée spécifiées.

Les cycles d'essais à effectuer sur un élément ou un groupe d'éléments varient suivant que le disjoncteur a ou n'a pas d'éléments de coupure et de fermeture différents.

Si l'élément de coupure ou le groupe d'éléments de coupure sont également utilisés pour la fermeture, les essais de coupure et ceux de fermeture devront être effectués sur l'élément ou le groupe d'éléments, conformément aux spécifications de l'article 65, y compris le cycle d'essai N° 4 lorsque celui-ci est réalisable.

S'il y a des éléments de coupure différents de ceux de fermeture, les essais de coupure conformes aux spécifications de l'article 65, y compris le cycle d'essai N° 4 b, devront être effectués sur l'élément prévu pour la coupure. Les essais de fermeture conformes à l'article 65, y compris le cycle d'essai 4 a, devront être effectués sur l'élément prévu pour la fermeture.

Pour les disjoncteurs à refermeture rapide munis d'éléments de coupure distincts de ceux de fermeture, ces derniers servent souvent pour l'opération de fermeture normale et la fermeture rapide est assurée par les éléments de coupure.

Dans ce cas, les essais de coupure et ceux de fermeture, conformes aux spécifications de l'article 65, y compris le cycle d'essai N° 4 lorsqu'il est réalisable, devront être faits sur les éléments de coupure. Des essais de fermeture supplémentaires conformes aux spécifications de l'article 65, y compris le cycle d'essai N° 4 a, devront être effectués sur l'élément ou le groupe d'éléments prévus pour l'opération de fermeture normale.

b) *Making tests.*

- i) *Choice of the units for test.* Unit tests shall be made on the maximum number of units in series which can be tested at the testing station, up to the current corresponding to the rated making-capacity of the circuit-breaker at the applied-voltage as specified in ii) below.
- ii) *Applied voltage.* The applied voltage across the terminals of the test unit or group of units in series shall be not less than the highest voltage recorded across the corresponding number of units in series during the determination of the voltage distribution among the units, multiplied by the ratio of the applied voltage as specified in Clause 59 of Chapter I, to the voltage applied across the complete pole during the voltage distribution test.

If, during the making tests the arc duration is shorter than in tests carried out on the complete circuit-breaker, additional making tests shall be made with an increased applied voltage so that the arc duration is at least equal to that obtained on the complete circuit-breaker.

c) *Test duties.*

Tests shall be carried out in accordance with Clauses 56 to 65 of Chapter I on the complete circuit-breaker, or on one complete pole of the circuit-breaker, as follows:

- I. As many of the test duties specified in Clause 65 that can be made at the specified recovery-voltage.
- II. A breaking test duty at the maximum fraction of the rated breaking-capacity, expressed in amperes, that can be made at the specified recovery-voltage.
- III. A making test duty at the maximum fraction of the rated making-capacity that can be made at the specified applied voltage.
- IV. The remaining test duty or duties specified in Clause 65 with the corresponding values of current, but at the highest recovery-voltage or applied voltage that can be obtained from the test plant.

Unit test by direct methods shall be made at the current values specified in Clause 65, higher than those at which the complete circuit-breaker or complete pole of the circuit-breaker can be tested at the specified recovery and applied voltages.

The test duties, to be made on a unit or group of units, vary according to whether or not the circuit-breaker has separate breaking and making units.

If the breaking-unit or group of units are also used for the making duty, the breaking tests and the making tests in accordance with Clause 65, including, wherever practicable, test duty 4, shall be made on the unit or group of units.

If there are separate breaking and making units, the breaking tests in accordance with Clause 65, including test duty 4 b), shall be made on the unit intended for the breaking duty. The making tests in accordance with Clause 65, including test duty 4 a), shall be carried out on the unit intended for the making duty.

For rapid auto-reclosing circuit-breakers having separate breaking and making units, the latter often serve only for the normal making operation, and the automatic reclosure is performed by the breaking units.

In this case, the breaking tests and the making tests in accordance with Clause 65, including, wherever practicable, test duty 4, shall be carried out on the breaking-units. Additional making tests in accordance with Clause 65, including test-duty 4 a), shall be carried out on the unit or group of units intended for the normal making-duty.

B. — MÉTHODES DE DÉTERMINATION DES FORMES DE L'ONDE DE LA TENSION TRANSITOIRE DE RÉTABLISSEMENT PROPRE A UN CIRCUIT

1. Introduction

La forme d'onde de la tension transitoire de rétablissement consécutive à la coupure du courant dépend de nombreux facteurs qui sont, d'une part, ceux dépendant des caractéristiques du réseau (inductance, capacitance, résistance ohmique, impédance d'onde, effets couronne et de saturation) et d'autre part, ceux provenant des caractéristiques du disjoncteur (tension d'arc, arrachement du courant avant le passage naturel au zéro, conductibilité post-arc et résistance en parallèle, dans le cas d'un disjoncteur équipé de résistances intercalaires).

Il y a des méthodes recommandées pour déterminer avec la plus grande précision qu'il soit possible d'atteindre en pratique la forme d'onde de la tension transitoire de rétablissement qui ne serait due qu'aux seules caractéristiques du réseau. Dans ce qui suit il sera fait référence à cette tension transitoire de rétablissement sous la dénomination de « Tension transitoire de rétablissement propre à un circuit ».

Il existe des méthodes utilisables aussi bien pour l'étude des tensions transitoires de rétablissement dans les stations d'essais de court-circuit que pour celle de ces tensions dans les réseaux de transport d'énergie. Les méthodes recommandées grâce auxquelles il est possible de déterminer la forme d'onde de la tension transitoire de rétablissement propre au circuit sont énumérées et décrites brièvement. Les chiffres entre parenthèses se rapportent à la bibliographie donnée à la page 38. Les diverses méthodes sont également rassemblées dans le tableau 1, pages 28-32, en vue de leur comparaison, en mettant l'accent sur leurs limitations spécifiques.

2. Résumé général des méthodes recommandées

Cinq méthodes de base sont recommandées pour la détermination des formes de l'onde de la tension transitoire de rétablissement propre à un circuit. Les méthodes 1, 2 et 3 conviennent pour les stations d'essais de court-circuit. Les méthodes 1, 4 et 5 sont recommandées pour les réseaux. Les méthodes 2 et 3 peuvent également être appliquées aux éléments de réseaux de transport d'énergie.

- Méthode N° 1 Coupure directe du courant de court-circuit
- 2 Enclenchement à vide des transformateurs d'essai
- 3 Injection d'une impulsion de courant
- 4 Modèles de réseaux (tables à calcul)
- 5 Calcul à partir des paramètres du réseau.

a) Méthode N° 1 — Coupure directe d'un courant de court-circuit

La méthode comporte la coupure d'un courant de court-circuit réel établi au moyen d'une connexion métallique dans le réseau en étude et l'enregistrement de la tension transitoire de rétablissement en résultant sur des oscillogrammes. Les erreurs causées par l'influence de l'arc dans le disjoncteur peuvent être compensées dans les résultats tirés des oscillogrammes, de la manière décrite ultérieurement.

Les erreurs dues à la conductibilité post-arc et qui peuvent se présenter dans les cas où il y a des fréquences d'oscillation très élevées, particulièrement avec les disjoncteurs ayant une action extinctrice de l'arc douce, ne peuvent pas être compensées pour le moment.

Il est recommandé d'autre part d'employer cette méthode par beau temps.

B. — METHODS OF DETERMINING INHERENT RESTRIKING VOLTAGE WAVEFORMS

1. Introduction

The waveform of the restriking-voltage resulting from the breaking of current depends on many factors, viz. on the one hand, those dependent on the system (network) characteristics (inductance, capacitance, ohmic resistance, surge impedance, corona and saturation effects) and, on the other, those arising from the circuit-breaker characteristics (arc-voltage, interruption prior to the natural current zero, post-arc conductivity and shunt resistance, if present, of circuit-breaker switching resistors).

Methods are recommended for determining, with the highest degree of accuracy attainable in practice, the waveform of the restriking-voltage as produced solely by the system characteristics. Hereinafter, this restriking-voltage will be referred to as the "Inherent Restriking-Voltage".

Methods are available for the examination both of short-circuit testing plants and power systems. The recommended methods by which the inherent restriking-voltage waveform may be determined are enumerated and briefly described. The numerals in brackets refer to the bibliography given on page 38. The various methods are also listed in Table 1 pages 29-33, for comparison purposes, with due regard to their specific limitations.

2. General summary of the recommended methods

Five basic methods of determining the inherent restriking-voltage waveforms are recommended. Methods 1, 2 and 3 are suitable for short-circuit testing plants. Methods 1, 4 and 5 are recommended for power systems. Methods 2 and 3 can also be used for portions of power systems.

- | | |
|--------------|---|
| Method No. 1 | Direct short-circuit switching |
| 2 | No-load switching of testing transformers |
| 3 | Current impulse injection |
| 4 | Model networks (systems) |
| 5 | Calculation from system parameters. |

a) Method No. 1. — Direct short-circuit switching

The method involves the breaking of an actual short-circuit current established by means of a solid metallic short-circuit in the system under investigation and the recording of the resultant restriking-voltage on oscillograms. The errors caused by the influence of the circuit-breaker arc may be compensated in the results obtained from the oscillograms, as described later.

The errors produced by post-arc conductivity, which may be present in cases of very high oscillation frequencies, particularly with circuit-breakers having a smooth arc-extinguishing action, cannot be compensated for reliably at the present time.

It is recommended that this method should be used under good weather conditions.

b) *Méthode N° 2 — Enclenchement à vide des transformateurs d'essai*

Cette méthode consiste à enclencher les transformateurs d'essai à circuit secondaire ouvert et à enregistrer à l'oscillographe l'allure de la tension transitoire aux bornes du circuit secondaire.

c) *Méthode N° 3. — Injection d'une impulsion de courant (1) (2) (12) (15)*

Le dispositif d'injection de l'impulsion de courant est connecté aux bornes des contacts ouverts du disjoncteur du circuit mis hors tension et injecte dans le réseau un courant ayant la même forme d'onde que la partie initiale du courant de court-circuit. La tension aux bornes des contacts enregistrée sur l'oscillogramme qui résulte de l'injection d'un tel courant et qui ne tient pas compte des erreurs dues à l'effet couronne et des imperfections du dispositif d'injection, présente en principe la même forme que la tension transitoire de rétablissement du réseau (principe de Thévenin-Heaviside).

d) *Méthode N° 4. — Modèles de réseaux (3) (4) (5) (6) (7)*

Avec cette méthode, les constantes réparties des lignes doivent être représentées avec une précision suffisante par des constantes concentrées équivalentes. L'influence de l'effet couronne ne peut pas être facilement reproduite par cette méthode.

On devra prendre soin que les modèles de réseaux soient de vraies imitations des réseaux réels en ce qui concerne les résistances et les réactances, à des fréquences au moins égales à celle de la tension transitoire de rétablissement en étude.

e) *Méthode N° 5. — Calcul d'après les paramètres du réseau (8) (9) (10) (11) (12)*

Dans des cas relativement simples, la tension transitoire de rétablissement peut être déterminée par le calcul en partant des paramètres du réseau. Dans les réseaux plus compliqués, les approximations supplémentaires nécessaires conduisent à des résultats moins précis.

3. Etude détaillée des méthodes recommandées

Les cinq méthodes sont décrites plus en détail dans cette section.

a) *Méthode N° 1. — Coupure directe d'un courant de court-circuit*

La méthode directe c'est-à-dire la coupure des courants réels de court-circuit peut être employée en principe sans grande difficulté étant donné l'évolution actuelle de la technique. Cependant, dans la méthode directe, les influences du disjoncteur (tension d'arc, arrachement du courant, résistance d'insertion et conductibilité post-arc) peuvent altérer la forme de la tension transitoire de rétablissement. Les figures 1 a à 1 d, pages 34 et 35, illustrent les principaux effets de ces influences. (Ces figures ne concernent pas les disjoncteurs équipés de résistances d'insertion).

Du fait de la tension d'arc, la tension aux bornes des contacts du disjoncteur n'est pas nulle à l'instant de l'extinction de l'arc et de ce fait, la tension transitoire de rétablissement du disjoncteur ne part pas de zéro mais de la valeur de la tension d'arc à cet instant. La tension transitoire de rétablissement commence donc en dessous de la ligne de tension nulle pour traverser cette dernière ultérieurement (figure 1 b). En conséquence, le facteur d'amplitude est supérieur à ce qu'il serait dans le cas d'un disjoncteur idéal (figure 1 a). Un effet semblable résulte d'un arrachement important du courant qui peut se produire par suite de l'instabilité de l'arc (figure 1 c). La conductibilité post-arc, c'est-à-dire la conductibilité qui existe entre les contacts du disjoncteur pendant la montée de la tension, peut influencer la forme d'onde de cette dernière en réduisant son taux d'accroissement et son amplitude (figure 1 d). De ce fait, un disjoncteur ayant une tension d'arc et une conductibilité post-arc aussi faibles que possible, est très satisfaisant pour l'application de la méthode directe. L'influence de la tension d'arc peut être compensée (figure 2):

- i) La fréquence naturelle « f » relevée sur l'oscillogramme est la même que la fréquence naturelle propre au réseau.

b) *Method No. 2. — No-load switching of testing transformer (13)*

This method consists of connecting in the testing transformers on open circuit and recording, by oscillograms, the behaviour of the transient voltage at the open gap of the secondary circuit.

c) *Method No. 3. — Current impulse injection (1) (2) (12) (15)*

The current impulse injector is connected across the open circuit-breaker contacts of the dead system, and injects into the system a current having the same waveform as that of the initial part of the short-circuit current. The voltage (recorded on oscillograms) across the contacts resulting from the injection of such a current, ignoring errors due to corona and to imperfections of the injector apparatus, represents, in principle, the form of the restriking-voltage (Thévenin-Heaviside principle) of the system.

d) *Method No. 4. — Model networks (3) (4) (5) (6) (7)*

With this method, the distributed line constants have to be represented with sufficient accuracy by equivalent lumped constants. The influence of corona cannot easily be reproduced by this method.

Care should be taken that the models are true imitations, as regards resistances and reactances, of the full-scale network at frequencies up to at least that of the restriking-voltage under consideration.

e) *Method No. 5. — Calculation from system parameters (8) (9) (10) (11) (12)*

In relatively uncomplicated cases, the restriking-voltage can be evaluated by calculations employing the parameters of the system. In the more complicated systems, the further approximations required lead to less accurate results.

3. Detailed consideration of the recommended methods

The five methods are described in greater detail in this section.

a) *Method No. 1 — Direct short-circuit switching*

The direct method, i.e. the breaking of genuine short-circuits, may be used in principle without much difficulty, as a result of the present-day progressive technique. However, in the direct method, the circuit-breaker influences (arc-voltage, premature current zero, switching resistances and post-arc conductivity) can affect the form of the restriking-voltage. Figures 1 a) to 1 d), pages 34 and 35, illustrate the main effects of these influences. (These figures do not apply to circuit-breakers with switching resistors).

Due to the voltage of the arc, the voltage across the circuit-breaker contacts is not zero at the instant of current extinction; and hence the circuit-breaker restriking-voltage does not rise from zero but from the value of the arc-voltage at the said instant. The restriking-voltage thus commences below the voltage zero axis and then crosses the latter (Figure 1 b). As a result, the amplitude factor is larger than in the case of an ideal circuit-breaker (Figure 1 a). A similar effect results from markedly premature current zero (current chopping) which may occur due to instability of the arc (Figure 1 c). The post-arc conductivity, i.e. the conductivity existing between the circuit-breaker contacts during the rise of voltage, could influence the waveform of the latter by reducing its rate-of-rise and amplitude (Figure 1 d). Thus a circuit-breaker with the smallest possible arc-voltage and post-arc conductivity is most suitable for use with the direct method. The influence of the arc-voltage may be compensated for (Figure 2):—

- i) The natural frequency “ f ” as derived from the oscillogram is the same as the inherent natural frequency of the system.

- ii) Le facteur d'amplitude propre $\frac{A + B}{B}$ calculé d'après l'oscillogramme est $\frac{A_1 + B + C}{B + C}$
- iii) Le taux d'accroissement propre de la tension transitoire de rétablissement est donc, pour le réseau particulier étudié :

$$VATR = 2E_m f \cdot \frac{A_1 + B + C}{B + C}$$

On devra être très circonspect en compensant l'effet de la tension d'arc dans certains cas où la valeur de la tension d'arc est très grande, par exemple dans le cas des disjoncteurs à soufflage magnétique. La compensation de la tension d'arc n'est pas suffisamment précise lorsque la tension d'arc immédiatement avant l'extinction est supérieure à 25 % de la valeur instantanée de la tension de rétablissement à l'instant de l'extinction de l'arc.

L'arrachement du courant n'a pratiquement aucun effet sur la précision de la compensation.

La compensation de l'effet de la conductibilité post-arc ne peut pas être faite de façon sûre, comme cela a été dit à l'article 1 a).

Dans le cas d'une tension transitoire de rétablissement à plusieurs fréquences, la compensation peut être erronée lorsqu'il y a une instabilité de l'arc ou une montée rapide de la tension immédiatement avant le passage à zéro du courant, parce que ces conditions augmentent l'amplitude de la composante à la fréquence la plus élevée proportionnellement plus que celle de la composante à la fréquence la plus basse. De ce fait, la compensation proposée corrige trop la crête de la fréquence la plus basse et ne corrige pas assez la crête de la fréquence la plus élevée.

Comme cela est bien connu, la tension de rétablissement d'un générateur après un court-circuit n'atteint sa valeur normale de crête qu'après une ou plusieurs demi-périodes de la fréquence d'alimentation, étant même quelque peu plus petite à la première amplitude. Ce phénomène ne se présente pas dans l'emploi des méthodes N° 2, 3, 4 et 5 bien qu'il soit présent à des degrés variés pendant un court-circuit sur un réseau de transport d'énergie. Dans les quatre méthodes mentionnées ci-dessus, l'évaluation de la tension transitoire de rétablissement est faite sur la base d'une tension de rétablissement correspondant à 100 % de la tension nominale.

En vue de traiter sur les mêmes bases le cas des circuits d'essai et celui des réseaux de transport d'énergie, il est habituel d'évaluer la crête de la tension transitoire de rétablissement dans la méthode N° 1 sur la base de la tension de rétablissement mesurée conformément à l'article 60 de la publication 56 de la C.E.I., c'est-à-dire que la valeur de crête de la tension transitoire de rétablissement est évaluée à partir de la tension de rétablissement mesurée et du facteur d'amplitude déterminé d'après l'enregistrement de la forme d'onde de la tension transitoire de rétablissement, bien que la valeur de crête de la tension transitoire de rétablissement réelle soit légèrement plus petite lors de l'interruption.

(b) *Méthode N° 2. — Enclenchement à vide des réseaux d'essais comprenant des transformateurs*

Cette méthode est applicable aux stations d'essais de court-circuit dans le cas des circuits d'essais alimentés par des transformateurs, pourvu que la capacitance du côté de l'alimentation soit négligeable comparée à celle des circuits d'essai, compte tenu du rapport de transformation. Cette méthode est également applicable à un élément d'un réseau de transport d'énergie lorsqu'il est possible d'isoler cet élément.

Les transformateurs d'essai sont mis sous tension en couplage monophasé à la tension normale à fréquence de service, le circuit d'essai étant ouvert à un endroit convenable selon qu'il s'agit d'étudier un circuit d'essai triphasé ou monophasé. La tension transitoire résultante qui est superposée à la tension à fréquence de service a la même forme que la tension transitoire de rétablissement qui serait obtenue lors d'un essai de coupure de court-circuit sur le même réseau.

Si les transformateurs sont mis sous tension sur la partie inclinée du front de l'onde de tension à fréquence de service, une correction tenant compte de la variation de la tension à fréquence de service est nécessaire pour obtenir la vraie forme de la tension transitoire de rétablissement.

- ii) The inherent amplitude factor $\frac{A + B}{B}$ calculated from the oscillogram is: $\frac{A_1 + B + C}{B + C}$
- iii) The inherent rate-of-rise of restriking-voltage (for the particular system) is thus:

$$R. R. R. V. = 2 E_m f \cdot \frac{A_1 + B + C}{B + C}$$

Caution must be exercised in compensating for the effect of arc voltage in certain cases where the value of arc voltage is very high, e.g. magnetic air circuit-breakers. The compensation for arc voltage is not sufficiently accurate when the arc voltage immediately before extinction is greater than 25% of the momentary value of the recovery-voltage at the instant of arc extinction.

Current chopping has practically no effect on the accuracy of the compensation.

Compensation for the effect of post-arc conductivity cannot be made reliably, as mentioned in Clause 1 a).

In the case of a multi-frequency restriking-voltage, the compensation may be in error when there is arc instability or a rapid rise of voltage just before current zero, because these conditions increase the amplitude of the higher frequency component more, in proportion, than that of the lower frequency component. Hence, the proposed compensation over-corrects the lower frequency peak and under-corrects the higher frequency peak.

As is known, the recovery-voltage after a short-circuit of a generator does not attain its normal peak value until after one to several half-cycles of the supply frequency, being somewhat smaller at the first amplitude. This phenomenon is not present when using Methods Nos. 2, 3, 4 and 5, although it will be present in varying degrees during a short-circuit on a power system. In the afore-mentioned four methods, the restriking-voltage evaluation is made on the basis of a recovery-voltage corresponding to 100% rated voltage.

In order to treat testing and power systems on the same basis, it is usual to evaluate the restriking-voltage peak in Method No. 1 on the basis of the recovery-voltage measured in accordance with Clause 60 of I.E.C. Publication No. 56, Chapter I, i.e. the restriking-voltage peak is evaluated from the measured recovery-voltage and the amplitude factor determined from the recorded restriking-voltage waveform, although the actual restriking-voltage peak will be slightly smaller at interruption.

b) Method No. 2. — No-load switching of testing systems including transformers

This method is applicable to short-circuit testing plants in the case of testing circuits fed by transformers, provided that the capacitance on the supply side is negligible compared to the capacitance of the testing circuits, taking into account the transformation ratio. This method is also applicable to a portion of a power system when it is convenient to isolate that portion.

The testing transformers are energized in single-phase connection at normal power-frequency voltage, with the testing circuit open-circuited at an appropriate position, depending on whether a three-phase or a single-phase testing circuit is under investigation. The resulting transient voltage, which is superimposed on the power-frequency voltage, is of the same form as the restriking-voltage that would be obtained on a short-circuit breaking test with the same system.

If the transformers are energized on the sloping part of the power-frequency voltage wavefront, a correction for the changing power-frequency voltage is required to obtain the true restriking-voltage waveform.

En vue d'éviter cette correction et aussi pour obtenir l'amplitude maximale de la tension transitoire de rétablissement, il est nécessaire d'enclencher le transformateur à la crête de l'onde de la tension à fréquence de service ou près de celle-ci.

Dans le cas de tensions transitoires à plusieurs fréquences, les rapports entre les amplitudes des différentes composantes seront différents lorsque les transformateurs sont enclenchés à vide de ceux apparaissant à la suite de l'ouverture d'un court-circuit.

c) *Méthode N° 3. — Injection d'une impulsion de courant*

Cette méthode ne peut être employée que sur un réseau hors tension. Cette condition est facilement remplie dans les stations d'essais alimentées par un ou plusieurs générateurs. Cette méthode peut être appliquée à un élément d'un réseau de transport d'énergie lorsqu'il est possible d'isoler et de mettre hors tension cet élément.

Il n'est pas tenu compte dans la méthode d'injection d'une impulsion de courant du fait que par suite de l'emploi de tensions très faibles (environ 100 V), les effets de certaines influences comme par exemple l'effet couronne et la saturation, ne se manifestent pas alors qu'ils pourraient apparaître avec une tension transitoire de rétablissement en vraie grandeur.

Le dispositif d'injection d'une impulsion de courant a, d'après différentes publications (2) (9), des inexactitudes intrinsèques pouvant atteindre 10%.

Si le dispositif d'injection d'une impulsion de courant applique une onde de courant croissant linéairement au lieu d'une onde de courant sinusoïdale sur l'élément de réseau en étude, des erreurs supplémentaires peuvent se produire aux fréquences propres inférieures à 500 Hz, puisque l'oscillation transitoire de la tension transitoire de rétablissement dure normalement, à ces fréquences, jusqu'à ce que la différence entre l'onde de courant croissant linéairement et celle sinusoïdale soit déjà importante. Dans le cas de tension à plusieurs fréquences, il en résulte une surestimation des fréquences basses par rapport aux fréquences élevées. Comme les fréquences inférieures à 500 Hz sont tout à fait normales pour la tension transitoire de rétablissement des réseaux à haute et à très haute tension, il est très important que le dispositif d'injection produise une onde de courant de forme sinusoïdale. La figure 3 montre, par exemple, la détermination incorrecte de la tension transitoire de rétablissement qui peut résulter d'une onde de courant croissant linéairement, sur un réseau supposé avoir une tension de rétablissement de 100 kV en valeur de crête:

Forme d'onde du dispositif d'injection du courant	Fréquence propre « f » Hz	Facteur d'amplitude	Taux d'accroissement de la tension transitoire de rétablissement V/μ s
Croissant linéairement	100 200	1,8 1,8	38,3 75,0
Sinusoïdale:			
ω = 314	100	1,43	36,7
ω = 314	200	1,67	75,0

En fonction de la tension à circuit ouvert apparaissant aux bornes d'un pôle du disjoncteur après l'interruption du courant, l'erreur susmentionnée peut être corrigée en retranchant le produit de $(1 - \cos \omega t)$ par la valeur de crête de la tension de rétablissement de l'oscillation transitoire enregistrée lorsqu'un courant croissant linéairement est injecté dans le réseau.

(d) *Méthode N° 4. — Modèles de réseaux (tables à calculs)*

Dans cette méthode un modèle de réseau est composé d'éléments qui doivent être une représentation exacte des éléments du réseau réel de transport d'énergie. Il est nécessaire d'imiter les éléments du réseau réel qui ont des constantes réparties par des éléments de modèle ayant des constantes concentrées. Aussi est-il essentiel que les caractéristiques d'impédance (particulièrement de réactance et de résistance) des

In order to avoid this correction and also to obtain the maximum amplitude of the restriking-voltage, it is necessary to switch in the transformers at or near the peak of the power-frequency voltage wave.

In the case of multi-frequency transients, the ratios among the amplitudes of the various components will be different when the transformers are switched on no-load from those occurring as a result of short-circuit interruption.

c) *Method No. 3. — Current impulse injection*

This method may be used only with the system unenergized. This condition is readily obtainable in test plants supplied from local generator(s). This method may be applied to a portion of a power system when it is convenient to isolate and make dead that portion.

No allowance is made in the current-impulse injection method for the fact that, due to the use of very small voltages (about 100 V), the effects of certain influences, for example corona and saturation, are not present which, on the other hand, might show themselves on a full-scale restriking-voltage.

The current-impulse injector has, according to various publications (2) (9), inherent inaccuracies amounting to up to 10 per cent.

If the current-impulse injector impresses a linearly-rising instead of a sinusoidal current waveform upon that part of the system to be investigated, additional errors will be caused at natural frequencies below 500 Hz (c/s), since the transient restriking-voltage oscillation normally lasts, at these frequencies, until the difference between the linearly-rising and the sinusoidal current waveforms is considerable. In the case of multi-frequency voltages, this results in lower frequencies being over-estimated relative to the higher frequencies. Since frequencies below 500 Hz (c/s) are quite normal for the restriking voltage in high and very high voltage systems, it is very important that the injector should generate a current of sinusoidal waveform. Figure 3 shows, for example, the incorrect determination of the restriking-voltage that may arise as a result of a linearly rising current, on a system assumed to have a recovery-voltage peak value of 100 kV:

Waveform of the injector current	Natural frequency "f" Hz (c/s)	Amplitude factor	Rate-of-rise of restriking-voltage V/ μ s
Rising linearly	100	1.8	38.3
	200	1.8	75.0
Sinusoidal: $\omega = 314$	100	1.43	36.7
	200	1.67	75.0

In terms of the open-circuit voltage appearing across a pole of the circuit-breaker after current interruption, the above-mentioned error may be corrected by subtracting the quantity $(1 - \cos \omega t)$ multiplied by the peak value of the recovery-voltage from the transient recorded when a linearly-rising current is injected into the system.

d) *Method No. 4. — Model networks*

In this method, a model network is assembled from units which must be a true representation of the parts of the full-scale power system. It is necessary to imitate parts of the full-scale system which have distributed constants by model units having lumped constants. Also, it is essential that the impedance (especially reactance and resistance) characteristics of the model units shall be, as near as possible, a true

éléments du modèle réduit soient, d'aussi près que possible, une véritable imitation de ces caractéristiques des éléments du réseau réel à des fréquences atteignant au moins celle de la tension transitoire de rétablissement à l'étude.

Cette méthode a l'avantage, bien qu'elle exige un travail important de préparation pour l'étude, de ne pas nécessiter de mettre hors service le réseau réel de transport d'énergie. Cette méthode est valable pour l'étude de projets de nouveaux réseaux de transport d'énergie et des extensions des réseaux existants.

(e) *Méthode N° 5 — Calcul d'après les paramètres du réseau*

Les fréquences propres et les amplitudes de la tension transitoire de rétablissement peuvent être calculées à partir des valeurs de l'inductance et de la capacitance existant dans le réseau étudié. Mais la méthode ne tient pas compte des facteurs d'amortissement qui existent dans un réseau de transport d'énergie ou dans un circuit d'une station d'essais. De ce fait, les valeurs calculées des crêtes et des taux d'accroissement de la tension transitoire de rétablissement sont supérieures à celles existant en pratique.

Dans les réseaux plus compliqués, les approximations supplémentaires nécessaires mènent à des résultats moins précis.

4. Comparaison des méthodes

Les méthodes sont classées dans le tableau 1 avec leurs caractéristiques et leurs avantages et désavantages.

imitation of those characteristics of the full-scale parts at frequencies up to at least that of the restriking-voltage under consideration.

This method, although it requires much work in preparation for the investigation, has the advantage that it does not require the full-scale power system to be taken out of service. This method is valuable for investigating proposed new power systems and extensions of existing systems.

(e) *Method No. 5. — Calculation from system parameters*

The natural frequencies and amplitudes of the restriking-voltage can be calculated from the values of inductance and capacitance present in the system under consideration, but the method does not take into account the damping effects which occur in a power system or a testing plant circuit. Hence, the calculated values of peak and rate-of-rise of restriking-voltage are greater than those occurring in practice.

In the more complicated systems, the further approximations required lead to less accurate results.

4. Comparison of the methods

The methods are listed in Table 1, with their characteristics and advantages and disadvantages.

Tableau 1

PRINCIPALES MÉTHODES DE DÉTERMINATION DES FORMES D'ONDE
DE LA TENSION TRANSITOIRE DE RÉTABLISSEMENT PROPRE A UN CIRCUIT

Méthode		Cas dans lesquels la méthode convient	Influences du réseau dont il est tenu compte par la méthode				Une correction est-elle nécessaire pour tenir compte de l'influence du disjoncteur ?	Critique des méthodes	
No	Nom		Inductance et capacité	Résistance ohmique	Charge du réseau	Effet couronne		Avantages	Désavantages
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
1	Coupure directe d'un courant de court-circuit	Pour les stations d'essais de court-circuit et pour les réseaux de transport d'énergie	oui	oui	oui	oui	oui à moins qu'on ne dispose d'un disjoncteur idéal	essais effectués dans les conditions réelles	Nécessite que le réseau soit en service. Pour déterminer l'allure de la tension transitoire de rétablissement propre au réseau, il devra être tenu compte de toutes les influences éventuelles du disjoncteur. Des précautions doivent être prises si la tension d'arc est trop importante. La prise en considération de la conductibilité post-arc est impossible à l'heure actuelle.
2	Enclenchement à vide des transformateurs d'essai	Pour les stations d'essais de court-circuit et pour les éléments de réseaux	oui	oui	non	oui si l'on emploie la pleine tension nominale	non	supprime les calculs	Nécessite un vrai circuit d'essai de court - circuit. Les corrections sont nécessaires pour tenir compte du front de l'onde de tension à fréquence de service à moins que les transformateurs ne soient enclenchés à la crête de l'onde de tension ou près de cette crête. Applicable seulement aux circuits à une seule fréquence.

Table 1

MAIN METHODS OF DETERMINING INHERENT
RESTRIKING-VOLTAGE WAVEFORMS

Method		Suitability	Influences of the system taken into consideration by the method				Is correction necessary for influences of the circuit-breaker	Criticism of the methods	
No.	Name		Inductance and capacitance	Ohmic resistance	System load	Corona		Advantages	Disadvantages
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
1	Direct short-circuit switching	For short-circuit testing plants and for power systems	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes, unless an ideal circuit-breaker is used	Carried out under genuine conditions	Requires the system in service. To determine the behaviour of the inherent restriking - voltage, allowance must be made for any circuit-breaker influences, if present. Precautions required if arc voltage is excessive. Allowance for post-arc conductivity not practicable at present.
2	No-load switching of testing transformers	For short-circuit testing plants and portions of power systems	Yes	Yes	No	Yes, if full rated voltage is used	No	Cuts down calculations	Requires actual short-circuit test circuit. Corrections necessary for power-frequency voltage wave-front unless the transformers are energized at or near the peak of the voltage wave. Applicable only for single-frequency circuits.

Méthode		Cas dans lesquels la méthode convient	Influences du réseau dont il est tenu compte par la méthode				Une correction est-elle nécessaire pour tenir compte de l'influence du disjoncteur ?	Critique des méthodes	
No.	Nom		Inductance et capacité	Résistance ohmique	Charge du réseau	Effet couronne		Avantages	Désavantages
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
3	Injection d'une impulsion de courant	Pour les stations d'essais de court-circuit et pour les éléments de réseaux	oui	oui	non	non	non	supprime les calculs	Nécessite la mise hors tension du réseau. Des erreurs résultant des oscillations à fréquence basse dans le cas de l'injection d'un courant non sinusoïdal mais possibilité d'en tenir compte.
4	Modèle de réseaux	Pour réseaux de transport d'énergie	Simplifiées et concentrées	Simplifiées et concentrées	Possible	Possible jusqu'à un certain point	non	Ne nécessite pas la disposition du réseau réel	La reproduction du réseau nécessite la connaissance des constantes réparties des lignes et leur conversion en valeurs concentrées simplifiées équivalentes. La négligence de l'effet couronne donne des valeurs trop grandes. On devra prendre garde à ce que les modèles soient de véritables imitations, en ce qui concerne les résistances et les réactances du réseau réel à toutes les fréquences au moins jusqu'à celle de la tension transitoire de rétablissement à l'étude.

Method		Suitability	Influences of the system taken into consideration by the method				Is correction necessary for influences of the circuit-breaker	Criticism of the methods	
No.	Name		Inductance and capacitance	Ohmic resistance	System load	Corona		Advantages	Disadvantages
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
3	Current impulse injection	For short-circuit testing plants and portions of power systems	Yes	Yes	No	No	No	Cuts down calculations	Requires the system to be dead. Errors resulting during long period oscillations in the case of non-sinusoidal injection current but allowances can be made.
4	Model networks	For power systems	Simplified and concentrated	Simplified and concentrated	Possible	Possible to a certain extent	No	Does not require the actual system	Copying of the system requires knowledge of the line distributed constants and their conversion to simplified equivalent lumped values. Neglect of the corona effects produces over-estimated values. Care should be taken that the models are true imitations, as regards resistances and reactances of the full-scale system at frequencies up to at least that of the restriking-voltage under consideration.