

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

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

RECOMMANDATION DE LA CEI

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

(affiliated to the International Organization for Standardization — ISO)

IEC RECOMMENDATION

Publication 56-4A

1974

Premier complément à la Publication 56-4 (1972)

Disjoncteurs à courant alternatif à haute tension

Quatrième partie: Essais de type et essais individuels

Annexe E - Méthodes de détermination des ondes de la tension transitoire de rétablissement présumée

First supplement to Publication 56-4 (1972)

High-voltage alternating-current circuit-breakers

Part 4: Type tests and routine tests

Appendix E - Methods of determining prospective transient recovery voltage waves



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**
Publié trimestriellement
- **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.

Autres publications de la CEI établies par le même Comité d'Etudes

L'attention du lecteur est attirée sur la page 3 de la couverture, qui énumère les autres publications de la CEI préparées par le Comité d'Etudes qui a établi la présente publication.

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**
Published quarterly
- **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 (I.E.V.), 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 I.E.V. 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 publications prepared by the same Technical Committee

The attention of readers is drawn to the inside of the back cover, which lists other IEC publications issued by the Technical Committee which has prepared the present publication.

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

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

RECOMMANDATION DE LA CEI

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

(affiliated to the International Organization for Standardization — ISO)

IEC RECOMMENDATION

Publication 56-4A

1974

Premier complément à la Publication 56-4 (1972)

Disjoncteurs à courant alternatif à haute tension

Quatrième partie: Essais de type et essais individuels

Annexe E - Méthodes de détermination des ondes de la tension transitoire de rétablissement présumée

First supplement to Publication 56-4 (1972)

High-voltage alternating-current circuit-breakers

Part 4: Type tests and routine tests

Appendix E - Methods of determining prospective transient recovery voltage waves



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

ANNEXE E — MÉTHODES DE DÉTERMINATION DES ONDES DE LA TENSION TRANSITOIRE DE RÉTABLISSEMENT PRÉSUMÉE

Articles

1. Introduction	6
2. Résumé général des méthodes recommandées	8
3. Etude détaillée des méthodes recommandées	8
3.1 Groupe 1 — Coupure directe d'un courant de court-circuit	8
3.2 Groupe 2 — Injection de courant à fréquence industrielle	10
3.3 Groupe 3 — Injection de courant de condensateur	12
3.4 Groupes 2 et 3 — Méthodes d'étalonnage	14
3.5 Groupe 4 — Modèles de réseaux	14
3.6 Groupe 5 — Calcul à partir des paramètres du circuit	16
3.7 Groupe 6 — Enclenchement à vide de réseaux d'essai comprenant des transformateurs	16
4. Comparaison des méthodes	16
FIGURES	22

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
PREFACE	5

APPENDIX E — METHODS OF DETERMINING PROSPECTIVE TRANSIENT RECOVERY VOLTAGE WAVES

Clause	
1. Introduction	7
2. General summary of the recommended methods	9
3. Detailed consideration of the recommended methods	9
3.1 Group 1 — Direct short-circuit switching	9
3.2 Group 2 — Power-frequency current injection	11
3.3 Group 3 — Capacitance current injection	13
3.4 Groups 2 and 3 — Methods of calibration	15
3.5 Group 4 — Model networks	15
3.6 Group 5 — Calculation from circuit parameters	17
3.7 Group 6 — No-load switching of testing systems including transformers	17
4. Comparison of the methods	17
FIGURES	22

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**PREMIER COMPLÉMENT À LA PUBLICATION 56-4 (1972)
DISJONCTEURS À COURANT ALTERNATIF À HAUTE TENSION**

QUATRIÈME PARTIE: ESSAIS DE TYPE ET ESSAIS INDIVIDUELS

Annexe E: Méthodes de détermination des ondes de la tension transitoire de rétablissement présumée

PRÉAMBULE

- 1) Les décisions ou accords de la CEI en ce qui concerne les questions techniques, préparées 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 recommandation a été établie par le Sous-Comité 17 A: Appareillage à haute tension, du Comité d'Etudes N° 17 de la CEI: Appareillage.

Un premier projet a été discuté lors de la réunion de Washington en 1970.

A la suite de cette réunion, un nouveau projet, document 17A(Bureau Central)101, fut soumis à l'approbation des Comités nationaux suivant la Règle des Six Mois en février 1973.

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

Afrique du Sud (République d')	Japon
Allemagne	Pologne
Australie	Portugal
Belgique	Roumanie
Canada	Royaume-Uni
Danemark	Suède
Espagne	Suisse
Etats-Unis d'Amérique	Turquie
Finlande	Union des Républiques
France	Socialistes Soviétiques
Israël	Yougoslavie

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**FIRST SUPPLEMENT TO PUBLICATION 56-4 (1972)
HIGH-VOLTAGE ALTERNATING-CURRENT CIRCUIT-BREAKERS**

PART 4: TYPE TESTS AND ROUTINE TESTS

Appendix E: Methods of determining prospective transient recovery voltage waves

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 recommendations and the corresponding national rules should, as far as possible, be clearly indicated in the latter.

PREFACE

This recommendation has been prepared by Sub-Committee 17A, High-voltage Switchgear and Controlgear, of IEC Technical Committee No. 17, Switchgear and Controlgear.

A first draft was discussed at the meeting held in Washington in 1970.

As a result of this meeting, a new draft, document 17A(Central Office)101, was submitted to the National Committees for approval under the Six Months' Rule in February 1973.

The following countries voted explicitly in favour of publication:

Australia	Romania
Belgium	South Africa (Republic of)
Canada	Spain
Denmark	Sweden
Finland	Switzerland
France	Turkey
Germany	United Kingdom
Israel	United States of America
Japan	Union of Soviet
Poland	Socialist Republics
Portugal	Yugoslavia

PREMIER COMPLÉMENT À LA PUBLICATION 56-4 (1972)
DISJONCTEURS À COURANT ALTERNATIF À HAUTE TENSION
QUATRIÈME PARTIE: ESSAIS DE TYPE ET ESSAIS INDIVIDUELS

Annexe E: Méthodes de détermination des ondes de la tension transitoire de rétablissement présumée

Page 114

Remplacer « A l'étude » par le texte suivant:

ANNEXE E

**MÉTHODES DE DÉTERMINATION DES ONDES DE LA TENSION TRANSITOIRE
DE RÉTABLISSEMENT PRÉSUMÉE**

1. Introduction

Les formes de l'onde de la tension transitoire de rétablissement (TTR) consécutives à la coupure de courants de court-circuit dépendent de deux facteurs principaux qui sont: ceux dépendant des caractéristiques du circuit (inductance, capacitance, résistance, impédance d'onde, etc.) et ceux provenant des caractéristiques du disjoncteur (tension d'arc, conductibilité post-arc, condensateurs et résistances intercalaires, etc.).

Il existe des méthodes recommandées pour déterminer la forme de l'onde de la TTR qui ne serait due qu'aux seules caractéristiques du circuit et qui constitue la TTR présumée.

Etant donné que tout dispositif de mesure a une influence sur la forme de l'onde de la TTR présumée, des précautions convenables et, éventuellement, des corrections sont nécessaires.

Il existe des méthodes utilisables pour l'évaluation de la TTR présumée aussi bien pour les circuits des stations d'essais de court-circuit que pour les réseaux, et les méthodes recommandées sont énumérées et décrites brièvement en tenant compte des caractéristiques de la TTR qui sont actuellement spécifiées pour les valeurs nominales et pour les essais.

L'expérience des stations d'essais et des réseaux a montré qu'après la coupure d'un courant de court-circuit, non seulement une oscillation à une seule ou à plusieurs fréquences se superpose à l'onde de tension à fréquence industrielle, mais qu'il existe également des composantes à caractère exponentiel et d'amplitude et de durée importantes. Ces dernières ont des constantes de temps qui dépendent des caractéristiques des éléments du circuit, par exemple alternateurs, transformateurs, lignes, etc. Ces composantes exponentielles ont pour effet de rendre la valeur de crête de la TTR et sa vitesse d'accroissement inférieures à celles qui existeraient si seules les composantes oscillatoires s'étaient superposées à la tension à fréquence industrielle. Ceci est indiqué sur la figure 1, page 22, et toute méthode de mesure doit tenir compte de cette influence.

Les mesures ont montré que l'inductance des divers éléments du circuit variait avec la fréquence, par suite de l'effet d'écran des courants de Foucault à l'intérieur des conducteurs, de la terre et des circuits magnétiques. En même temps que d'autres facteurs qui tendent à réduire les tensions instantanées, ceci introduit une constante de temps variant de centaines de microsecondes pour certains alternateurs jusqu'à des dizaines de microsecondes pour les transformateurs, les valeurs exactes dépendant de la conception du matériel particulier et de la fréquence des composantes de la TTR. Dans certains cas, il peut en résulter une réduction de la valeur de crête de la TTR atteignant 25%.

Il est donc important de tenir compte de ces facteurs pour l'évaluation de la TTR présumée d'une station d'essais ou d'un réseau et on donne des indications relatives aux méthodes recommandées.

Note. — Quelle que soit la méthode utilisée, les valeurs réelles de la TTR présumée mesurées dans la station d'essais doivent être conformes aux valeurs spécifiées dans la Publication 56 de la CEI: Disjoncteurs à courant alternatif à haute tension (3^e édition).

Lorsque le temps t_2 de la crête de la TTR dépasse, par exemple 1 250 μ s, en plus des influences décrites précédemment, la valeur instantanée de la tension à fréquence industrielle a, dans tous les cas, déchu de plus de 6% à

FIRST SUPPLEMENT TO PUBLICATION 56-4 (1972) HIGH-VOLTAGE ALTERNATING-CURRENT CIRCUIT-BREAKERS

PART 4: TYPE TESTS AND ROUTINE TESTS

Appendix E: Methods of determining prospective transient recovery voltage waves

Page 115

Replace "Under consideration" by the following text:

APPENDIX E

METHODS OF DETERMINING PROSPECTIVE TRANSIENT RECOVERY VOLTAGE WAVES

1. Introduction

The waveforms of the transient recovery voltage (TRV) resulting from the breaking of short-circuit currents depend on two main factors, namely: those dependent on the circuit characteristics (inductance, capacitance, resistance, surge impedance, etc.), and those arising from the circuit-breaker characteristics (arc voltage, post-arc conductivity, capacitors and switching resistors, etc.).

Methods are recommended for determining the waveform of the TRV as produced solely by the circuit characteristics, this being the "prospective TRV".

Since any measuring device will have some effect upon the waveform of the prospective TRV, suitable precautions, and possibly corrections, are necessary.

Methods are available for the evaluation of the prospective TRV of both short-circuit test-plant circuits and power systems, and the recommended methods are enumerated and briefly described, taking into account the TRV characteristics which are now specified for rating and testing.

Experience on testing-plants and also on systems has shown that following the breaking of a short-circuit current, not only is a single or multi-frequency oscillation superimposed on the power-frequency voltage wave, but exponential components of substantial size and duration are also present. The latter have time constants which are dependent upon the characteristics of the components of the circuit, e.g., generators, transformers, lines, etc. These exponential components have the effect of depressing the peak value of the TRV and the rate-of-rise to below those which would have occurred if the oscillatory components alone had been superimposed on the power-frequency voltage. This is shown on Figure 1, page 22, and any method used for measurement must take this effect into account.

Measurements have shown that the inductance of the various circuit components varies with frequency, owing to the screening effects of eddy currents within the conductors, the earth and the magnetic circuits. Together with other factors tending to reduce instantaneous voltages, this introduces a time constant varying from hundreds of microseconds for some generators down to tens of microseconds for transformers, the exact values depending upon the design of the particular equipment and the frequency of the components of the TRV. In some cases this can result in a depression of the peak value of the TRV by as much as 25%.

It is therefore important that these factors are taken into account when assessing the prospective TRV of either a test-plant or system, and guidance is given in connection with the recommended methods.

Note. — Irrespective of the method used, the actual values measured in the test plant for the prospective TRV shall be in accordance with the values specified in IEC Publication 56: High-voltage Alternating-current Circuit-breakers (3rd edition).

Where the time co-ordinate t_2 of the crest of the TRV exceeds, say, 1 250 μ s, then in addition to the effects described above, the instantaneous power-frequency voltage will, in any case, have decreased by more than 6%.

50 Hz et de plus de 10% à 60 Hz. On doit, par conséquent, prendre en considération cette influence supplémentaire lors de l'utilisation de méthodes de détermination de la TTR présumée faisant intervenir une tension de rétablissement à fréquence industrielle ou lorsqu'on effectue des calculs utilisant les constantes du circuit.

La valeur instantanée de la composante à fréquence industrielle qui suit immédiatement le passage à zéro du courant dépend également du facteur de puissance en court-circuit et du pourcentage de la composante apériodique de la dernière alternance du courant, et peut ainsi être inférieure à la pleine valeur de crête. Pour des courants symétriques et des facteurs de puissance en court-circuit égaux ou inférieurs à 0,15, la réduction ne dépasse pas 1,5% et est ainsi peu importante pour les circuits des stations d'essais; elle peut être importante pour les facteurs de puissance plus élevés qui peuvent exister en service.

Pour la TTR nominale correspondant aux défauts aux bornes (voir l'article 7 de la Publication 56-2 de la CEI: Disjoncteurs à courant alternatif à haute tension — Caractéristiques nominales (3^e édition)), on a introduit un retard pour tenir compte de l'influence de la capacité localisée du côté de la source du disjoncteur. Les retards correspondants ont également été spécifiés pour les circuits d'essais qui s'y rapportent (voir paragraphe 7.5 de la Publication 56-4 de la CEI: Disjoncteurs à courant alternatif à haute tension — Essais de type et essais individuels (3^e édition)). Il est recommandé d'utiliser pour la mesure de la TTR une méthode permettant de déterminer ces retards.

Pour certains disjoncteurs, les caractéristiques nominales pour les défauts en ligne sont également spécifiées (voir l'article 8 de la Publication 56-2 de la CEI) et la TTR présumée correspondant aux essais de défaut en ligne a été spécifiée. La capacité localisée entre le disjoncteur et la ligne donnera également naissance à un retard de la composante de la TTR côté ligne. Pendant les essais, il est souhaitable de mesurer et d'enregistrer le retard du côté ligne et il est recommandé d'utiliser une méthode convenant pour cette détermination.

2. Résumé général des méthodes recommandées

On classe comme suit les méthodes fondamentales utilisées pour la détermination des formes de l'onde de la TTR présumée:

- Groupe 1 — Coupure directe du courant de court-circuit;
- Groupe 2 — Injection de courant à fréquence industrielle;
- Groupe 3 — Injection de courant de condensateur;
- Groupe 4 — Modèles de réseaux;
- Groupe 5 — Calcul à partir des paramètres du circuit;
- Groupe 6 — Enclenchement à vide de réseaux d'essai comprenant des transformateurs.

Les groupes 1 à 6 conviennent pour les stations d'essai de court-circuit.

Les groupes 1, 4 et 5 sont recommandés pour les réseaux.

Les groupes 2 et 3 peuvent être appliqués aux éléments des réseaux.

Lors de l'utilisation des groupes 1, 2, 3, 4 ou 6, il est recommandé de vérifier soigneusement les circuits d'enregistrement de la tension afin de s'assurer que l'ensemble de l'étalonnage demeure constant dans toute la gamme des fréquences de la TTR à enregistrer et que les déviations en fonction du temps sont linéaires. Il est alors recommandé d'étalonner, en fonction d'une tension connue, l'oscillographe et chaque diviseur de tension. Lors de l'utilisation d'oscillographes cathodiques comportant une base de temps de balayage, il est recommandé de connaître avec précision l'échelle de la déviation en fonction du temps, et de préférence d'utiliser une échelle linéaire afin d'éviter d'effectuer des relevés supplémentaires uniquement en vue de comparaisons, etc.

3. Etude détaillée des méthodes recommandées

3.1 Groupe 1 — Coupure directe d'un courant de court-circuit

Ces méthodes comportent 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 TTR qui en résulte à l'aide d'un oscillographe. Idéalement, il est recommandé que le courant coupé soit symétrique, ou de tenir compte de la variation de di/dt s'il existe une asymétrie appréciable. Avec ces méthodes, il est essentiel de tenir compte de l'influence du disjoncteur. A ce point de vue, les caractéristiques les plus importantes sont: la tension d'arc et la conductibilité post-arc.

at 50 Hz and more than 10% at 60 Hz. Consequently, this further effect must be taken into consideration when using methods of determining the prospective TRV which involve a power-frequency recovery-voltage, or where calculations are made using circuit constants.

The instantaneous value of the power-frequency component immediately following current zero is also dependent upon the short-circuit power-factor and upon the percentage d.c. component of the last loop of current, and may thus be less than the full crest value. For symmetrical currents and short-circuit power-factors of 0.15 or less, the reduction is not more than 1.5%, and so is of little importance on test-plant circuits; it may be of significance at higher power-factors which may occur in service.

For the rated TRV for terminal faults (see Clause 7 of IEC Publication 56-2: High-voltage Alternating-current Circuit-breakers—Part 2: Rating, 3rd edition), a time delay has been introduced to allow for the influence of local capacitance on the source side of the circuit-breaker. Corresponding time delays have also been specified for the relevant test-circuits (see Sub-clause 7.5 of IEC Publication 56-4: High-voltage Alternating-current Circuit-breakers—Part 4: Type Tests and Routine Tests, 3rd edition), and the method used for measuring the TRV should be capable of resolving these time delays.

For some circuit-breakers the rated characteristics for short-line faults are also specified (see Clause 8 of IEC Publication 56-2, 3rd edition), and during short-line fault tests the corresponding prospective TRV has been specified. Local capacitance between the circuit-breaker and the line will also produce a time-delay in the line side TRV component. During testing, it is desirable to measure and record the line side delay and the method used should be suitable for evaluating this.

2. General summary of the recommended methods

The basic methods for determining the prospective TRV waveforms are classified as follows:

- Group 1 — Direct short-circuit switching;
- Group 2 — Power-frequency current injection;
- Group 3 — Capacitance current injection;
- Group 4 — Model networks;
- Group 5 — Calculation from circuit parameters;
- Group 6 — No-load switching of testing systems including transformers.

Groups 1-6 are suitable for short-circuit test-plants.

Groups 1, 4 and 5 are recommended for power systems.

Groups 2 and 3 can be used for portions of power systems.

When using Groups 1, 2, 3, 4 or 6, the voltage recording circuits should be carefully checked to ensure that the overall calibration is constant over the range of TRV frequencies to be recorded, and that time deflections are linear. The oscillograph and any voltage divider should then be calibrated against a known voltage. Where cathode-ray oscillographs with a swept time base are used, the deflection/time scale should be accurately known, and preferably this should be linear to avoid replotting for comparative purposes, etc.

3. Detailed consideration of the recommended methods

3.1 Group 1 — Direct short-circuit switching

These methods involve the breaking of an actual short-circuit current, established by means of a solid metallic connection in the system under investigation and recording the resultant TRV by an oscillograph. Ideally, the current broken should be symmetrical; or allowance made for the change in di/dt if there is appreciable asymmetry. With these methods, it is essential to allow for the influence of the circuit-breaker. The most important characteristics in this respect are: arc-voltage and post-arc conductivity.

Du fait de la tension d'arc, la tension aux bornes des contacts du disjoncteur peut ne pas être nulle à l'instant de l'interruption de l'arc et de ce fait, la TTR ne part pas d'une tension nulle mais de la valeur de la tension d'arc à l'instant du passage à zéro du courant. La TTR commence donc en dessous de la ligne de tension nulle pour traverser cette dernière ultérieurement (voir la figure 3, page 23).

En conséquence, la valeur de crête de la tension est supérieure à ce qu'elle serait dans le cas d'un disjoncteur idéal (tension d'arc nulle) (voir la figure 2, page 23). Un effet semblable mais plus prononcé résulte de l'interruption nettement en avance sur le passage naturel du courant par zéro (arrachement du courant) ce qui peut se produire pour un petit courant (voir la figure 4, page 24). De plus, si la TTR présumée comprend plusieurs composantes oscillatoires, l'arrachement du courant peut faire apparaître une forme d'onde qui est nettement différente de celle qu'on obtiendrait avec un disjoncteur « idéal ».

Ainsi, c'est un disjoncteur comportant une faible tension d'arc immédiatement avant le passage à zéro du courant et ne provoquant pas d'arrachement du courant qui convient le mieux pour les méthodes directes.

On peut compenser l'influence de la tension d'arc comme l'indique la figure 6, page 25, à condition que la valeur de crête de la tension d'arc ne dépasse pas 10% de la valeur de crête de la TTR.

En principe, la compensation de la tension d'arc ne convient que pour les TTR comportant une composante transitoire à une seule fréquence: on peut néanmoins l'utiliser aussi avec une bonne approximation pour les oscillations transitoires à plusieurs fréquences si l'amplitude de la principale composante oscillatoire prédomine.

Le courant post-arc, c'est-à-dire le courant traversant la distance de coupure pendant l'accroissement de la TTR peut influencer la forme de l'onde de cette dernière par amortissement, réduisant ainsi sa vitesse d'accroissement et sa valeur de crête (voir la figure 5, page 24). L'emploi de résistances en parallèle avec la chambre de coupure du disjoncteur produit un effet semblable.

Il s'ensuit donc qu'en plus des exigences relatives à une faible tension d'arc et à l'absence d'arrachement du courant, il est recommandé d'utiliser pour les méthodes de coupure directe du courant de court-circuit un disjoncteur non muni de résistances shunt et ne présentant pas une importante conductibilité post-arc.

En particulier, lorsqu'on peut faire fonctionner la station d'essais avec une excitation convenablement réduite, l'interrupteur à vide peut souvent constituer un disjoncteur presque « idéal ». Toutefois, il est recommandé de s'assurer que le dispositif utilisé ne présente pas d'arrachement de courant important dans le circuit particulier étudié.

On peut parfois améliorer de façon appropriée les caractéristiques des disjoncteurs utilisés pour la coupure directe, par exemple en retardant l'instant de la séparation des contacts en vue d'obtenir une durée d'arc courte et une tension d'arc faible.

Avec ces méthodes, on coupe un courant réel de court-circuit dans le circuit étudié et la TTR enregistrée tient compte, plus ou moins, des influences qui contribuent à réduire la tension de rétablissement. Pour cette raison, selon les caractéristiques du disjoncteur, les méthodes directes peuvent être les plus adaptées à l'évaluation de la TTR présumée et sont fréquemment utilisées pour le contrôle des autres méthodes. Toutefois, les méthodes directes sont moins bien adaptées à la mesure des retards, et en particulier du retard de la TTR côté ligne, dans le cas du défaut en ligne.

3.2 Groupe 2 — Injection de courant à fréquence industrielle

En général, ces méthodes ne sont utilisées qu'avec un circuit hors tension, bien que des schémas permettant d'effectuer des mesures avec un circuit sous tension soient en cours de développement. Ces méthodes sont donc principalement utilisées dans les stations d'essais ou lorsqu'une partie d'un réseau peut être étudiée hors tension. Elles ne tiennent donc pas compte des phénomènes d'effet couronne ou de saturation magnétique.

Le principe de la méthode repose sur l'injection d'un courant relativement petit dans le circuit et l'enregistrement de la réponse du circuit lorsque le courant est interrompu par un appareil de connexion idéal, c'est-à-dire par un dispositif comportant une tension d'arc et un courant post-arc négligeables.

Une source convenable de courant injecté est constituée par un transformateur monophasé alimenté par le réseau local à basse tension, le secondaire fournissant par exemple une gamme de courants et de tensions comprise entre 2 A à 200 V et 300 A à 25 V. Cette gamme couvre l'impédance de la majorité des circuits à considérer. La

Due to the voltage of the arc, the voltage across the circuit-breaker contacts may not be zero at the instant of current interruption, and hence the TRV does not rise from zero voltage but from the value of the arc-voltage at current zero. The TRV thus begins below the voltage zero axis and then crosses the latter (see Figure 3, page 23).

As a result, the peak voltage is higher than in the case of an ideal circuit-breaker (zero arc voltage) (see Figure 2, page 23). A similar but more pronounced effect results from interruption at a markedly premature current zero (current chopping) which may occur if the current is small (see Figure 4, page 24). Furthermore, if the prospective TRV comprises several oscillatory components, current chopping may produce a waveform which is markedly different from that which would obtain with an "ideal" circuit-breaker.

Thus a circuit-breaker with a low arc-voltage immediately before current zero and which does not exhibit current chopping is the most suitable for use with direct methods.

The influence of the arc-voltage may be compensated for as shown in Figure 6, page 25, provided that the peak value of the arc-voltage is not more than 10% of the peak value of the TRV.

In principle, compensation for the arc-voltage is only suitable for TRVs having a single-frequency transient component; nevertheless it may be also used as a good approximation for multi-frequency transients if the amplitude of the main oscillatory component is predominant.

The post-arc current, i.e. the current flowing through the arc-gap during the rise of the TRV, can influence the waveform of the latter by damping, thus reducing its rate-of-rise and peak value (see Figure 5, page 24). A similar effect results from the use of resistors in parallel with the interrupting chamber of the circuit-breaker.

It follows, therefore, that in addition to the requirements relating to low arc-voltage and absence of current chopping, any circuit-breaker used for the direct short-circuit switching methods should not be fitted with shunt resistors and should not exhibit significant post-arc conductivity.

Particularly where the test plant can be operated at a suitably reduced excitation, vacuum interrupters can often be used as nearly "ideal" circuit-breakers. However, it should be ascertained that any device used does not exhibit significant current chopping in the particular circuit under investigation.

The characteristics of circuit-breakers used for direct switching can sometimes be appropriately improved, for example by timing the instant of contact separation to produce a short arc duration and low arc-voltage.

With these methods, an actual short-circuit current is broken in the circuit under investigation and the recorded TRV will take into account, more or less, the effects contributing to depression of the recovery voltage. For this reason direct methods can be—depending upon the characteristics of the circuit-breaker—the most suitable means of obtaining an assessment of the prospective TRV, and are frequently used as the basis for checking other methods. However, direct methods are less suited for measuring time delays, particularly the time delay of the line-side TRV, in the case of short-line fault.

3.2 Group 2 — Power-frequency current injection

In general, these methods are only used with the circuit de-energized, although schemes for making measurements whilst the circuit is live are being developed. These methods are therefore mainly of use in test-plants, or where part of a system can be analysed whilst de-energized. They therefore do not take into account corona or magnetic saturation phenomena.

The basis of the method is the injection of a relatively small current into the circuit and the recording of the response of the circuit when the current is switched off by an ideal switching device, i.e. a device having negligible arc-voltage and post-arc current.

A suitable source of injected current is a single-phase transformer operated from the local low-voltage mains, the secondary giving for example a range of currents and voltages between 2 A at 200 V and 300 A at 25 V. This range will cover the impedances of the majority of the circuits which have to be assessed. A schematic diagram as

figure 7, page 26, représente un schéma correspondant à un exemple d'application de cette méthode ainsi que les détails des éléments. La figure 8, page 27, indique la suite des opérations correspondant au schéma.

Il est recommandé de prendre soin de s'assurer que les capacités propres des dispositifs d'alimentation et de mesure n'ont pas d'influence sur les résultats.

Il est recommandé de mesurer la réponse de tension aux bornes d'entrée du circuit et, lorsque c'est possible, de mettre à la terre une borne du circuit. Lorsqu'une des bornes du circuit d'essai n'est pas mise à la terre, il est essentiel d'isoler complètement de la terre le matériel de mesure et d'injection. Ceci peut être obtenu par l'emploi d'un générateur auxiliaire isolé de la terre et de capacité négligeable par rapport à celle-ci.

L'appareil de connexion le mieux adapté à ce schéma est une diode semi-conductrice. En général, des diodes semi-conductrices comportant des temps de commutation ne dépassant pas 100 ns conviennent. Des temps plus longs sont acceptables pour les TTR de faible fréquence propre équivalente. Pour leur permettre de supporter correctement le courant on peut faire fonctionner en parallèle plusieurs diodes.

Note. — Les caractéristiques des diodes dépendent d'un certain nombre de facteurs, par exemple la valeur du courant direct, la forme et la valeur de la tension inverse; les données fournies par les constructeurs dépendent des méthodes utilisées pour déterminer les caractéristiques.

Pour obtenir une onde de courant symétrique, il peut être nécessaire de faire passer le courant pendant un temps atteignant 20 périodes. Pendant la plus grande partie de ce temps, les diodes sont court-circuitées par un interrupteur qu'on ouvre à la fin de cet intervalle de temps, provoquant ainsi le passage du courant à travers les diodes qui coupent ce dernier à son passage suivant à zéro.

Il est recommandé d'enregistrer le courant injecté et la tension aux bornes du circuit étudié en utilisant une base de temps de vitesse convenable et, de plus, de prendre des enregistrements à grande vitesse du courant et de la tension au passage du courant à zéro. Il est recommandé d'enregistrer la TTR à l'aide d'un oscillographe de sensibilité convenable assurant une déviation d'au moins 30 mm pour la valeur de crête de la tension et comportant une échelle de temps correspondant à au moins 30 mm entre le zéro et la valeur de crête de la tension.

Pour évaluer le retard avec précision, il est nécessaire d'amplifier les échelles de tension et de temps dans la partie initiale de l'onde.

L'enregistrement du courant à plus faible vitesse indique si le courant est symétrique à l'instant de la coupure et l'enregistrement à grande vitesse indique la vitesse de variation, di/dt , immédiatement avant le passage à zéro du courant. Il montre également s'il existe ou non un appréciable courant post-arc provoquant l'amortissement de la TTR ou un arrachement appréciable du courant susceptible de modifier l'amplitude de la TTR.

L'enregistrement de la TTR représente l'oscillation propre transitoire du circuit étudié et tient compte de la plupart des facteurs provoquant une réduction de la tension.

La valeur de crête, etc., peut être déterminée en effectuant un étalonnage de tension avec la pleine puissance du circuit.

3.3 Groupe 3 — Injection de courant de condensateur

Ces méthodes sont semblables à celles du groupe 2, sauf que le courant traversant le circuit provient de la décharge d'un condensateur. Dans ces conditions, la fréquence du courant injecté dépend des valeurs du condensateur et de l'inductance du circuit.

Comme il est recommandé que la fréquence du courant de décharge soit inférieure ou égale à $1/8$ de la fréquence propre équivalente du circuit d'essai, la méthode convient à la mesure des TTR de circuits comprenant des éléments comportant des fréquences propres élevées. Elle est particulièrement utile pour la mesure de caractéristiques des éléments du côté ligne des circuits d'essais de défaut en ligne, dont les fréquences propres sont très élevées et dont les retards correspondants sont petits.

La figure 9, page 28, représente le schéma d'un exemple de circuit d'injection de courant de condensateur ainsi que les détails des éléments. La figure 10, page 29, indique la suite des opérations correspondant au schéma.

On prend les mêmes précautions et la même méthode d'étalonnage que pour le groupe 2, et celles-ci sont indiquées en détail dans le paragraphe 3.4 ci-après.

an example of the application of this method is shown in Figure 7, page 26, together with details of the components. Figure 8, page 27, shows the sequence of operation of the scheme.

Care should be taken to ensure that the inherent capacitances of the supply and measuring devices do not influence the results.

The voltage response should be measured at the input terminals of the circuit and when applicable, one terminal of the circuit should be earthed. In those cases where the test-circuit is not earthed at one of its terminals, it is essential that the measuring and injection equipment are completely isolated from earth. This can be achieved by using an auxiliary generator insulated from earth and having negligible capacitance to earth.

The most convenient switching device for this scheme is a semiconductor diode. In general, semiconductor diodes with hole storage times not exceeding 100 ns have been found to be suitable. Longer times are acceptable where the TRV has a low equivalent natural frequency. To obtain the correct current-carrying capacity, several diodes may be operated in parallel.

Note. — The characteristics of diodes are dependent on a number of factors, e.g. the value of the current in the forward direction, the shape and value of the reverse voltage and the manufacturer's data which are dependent on the methods employed to determine the characteristics.

To achieve a symmetrical current wave, it may be necessary for the current to flow for a time of up to 20 cycles. During most of this time, the diodes will be by-passed by a switch which is opened at the end of this time thus allowing the current to pass through the diodes which will interrupt the current at the following current-zero.

The current injected and the voltage across the circuit under investigation should be recorded using a time base of suitable velocity, and in addition high-speed records of current and voltage at the current-zero should be taken. The TRV should be recorded by an oscillograph of suitable sensitivity giving not less than 30 mm deflection for the peak voltage, and with a time scale not less than 30 mm from zero-to-peak TRV.

To assess the time delay accurately, it will be necessary to amplify the voltage and time scales for the initial part of the wave.

The lower speed record of the current will show whether the current was symmetrical when broken, and the high speed record will give the rate-of-change, di/dt , immediately before current-zero. It will also show whether or not there was any appreciable post-zero current to cause damping of the TRV, or appreciable suppression of the current likely to affect the TRV amplitude.

The TRV record will represent the natural transient oscillation of the circuit under investigation, and will take into account most of the factors causing voltage depression.

The peak value, etc., can be determined using a voltage calibration in terms of the full power of the circuit.

3.3 Group 3 — Capacitance current injection

These methods are similar to Group 2 except that the current through the circuit is obtained from the discharge of a capacitor. Thus, the frequency of the injected current will depend upon the values of the capacitor and the inductance of the circuit.

As the frequency of the discharge current should be $\leq 1/8$ of the equivalent natural frequency of the test circuit, this means that the method is suitable for measuring the TRV of circuits containing components with high natural frequencies. It is particularly useful for measuring the characteristics of the components on the line side of short-line fault testing circuits, the natural frequencies of which are very high, with correspondingly small time delays.

The schematic diagram of an example of a capacitance current injection circuit is shown in Figure 9, page 28, together with details of the components. Figure 10, page 29, shows the sequence of operation of the scheme.

The same precautions and method of calibration are used as for Group 2, and these are detailed in Sub-clause 3.4 below.

3.4 Groupes 2 et 3 — Méthodes d'étalonnage

A partir de la valeur mesurée de la vitesse de variation, di/dt , du courant injecté immédiatement avant le passage à zéro, calculer la valeur efficace équivalente du courant injecté I_1 .

$$I_1 = \frac{\frac{di_1}{dt}}{2 \pi f_1 \sqrt{2}}$$

où f_1 est la fréquence du courant injecté.

Dans ce calcul on admet que:

$$i_1 = I_1 \sqrt{2} \sin 2 \pi f_1 t \simeq I_1 \sqrt{2} \cdot 2 \pi f_1 t$$

Cette approximation est valable quand $t_2 < 1\,250 \mu s$ (ou quand $t_2 < 1\,000 \mu s$ pour la fréquence 60 Hz).

En partant des approximations précédentes, on peut en déduire la règle suivante:

La fréquence du courant injecté doit être inférieure ou égale à 1/8 de la fréquence propre équivalente du circuit étudié. Lorsque le temps t_2 de la TTR présumée est supérieur à $1\,250 \mu s$ ($1\,000 \mu s$ pour 60 Hz), la fréquence du courant injecté doit être égale à la valeur nominale de la fréquence industrielle.

Si la valeur efficace du courant de court-circuit à pleine puissance du circuit est I_{sc} A, l'étalonnage de tension V_{sc}/mm pour la TTR correspondant à I_{sc} sera:

$$V_{sc}/mm = V_1/mm \times \frac{I_{sc}}{I_1} \times \frac{f_{sc}}{f_1}$$

où f_{sc} est la fréquence du courant de court-circuit.

Compte tenu des indications précédentes concernant les TTR présumées comportant de longues durées entre zéro et le temps t_2 , dans le cas où l'écart entre la courbe du courant et la sinusoïde symétrique est trop important pour être négligé, il est recommandé d'utiliser la formule fondamentale:

$$V_{sc}/mm = V_1/mm \frac{\frac{di_{sc}}{dt} i_{sc} \rightarrow 0}{\frac{di_1}{dt} i_1 \rightarrow 0}$$

où $(di_{sc}/dt) i_{sc} \rightarrow 0$ est la vitesse de variation du courant de court-circuit à fréquence industrielle au passage à zéro du courant, avec la fonction définissant le courant

$$i_{sc} = I_{sc} \sqrt{2} \sin 2 \pi f_{sc} \cdot t \simeq I_{sc} \sqrt{2} \cdot 2 \pi f_{sc} t$$

Cette formule s'applique particulièrement à la méthode d'injection de courant de condensateur où le courant a une forme oscillatoire légèrement amortie.

La méthode suivante convient pour obtenir l'étalonnage pour les essais de défaut en ligne:

A partir de l'enregistrement à grande vitesse:

du_1/dt = VATR de la TTR au passage à zéro du courant injecté;

u_1 = première crête de la tension correspondant au courant injecté;

di_1/dt = vitesse de variation du courant injecté à son passage à zéro.

Par le calcul:

$$Z = \frac{du_1/dt}{di_1/dt} = \text{pleine valeur de l'impédance d'onde.}$$

3.5 Groupe 4 — Modèles de réseaux

Dans ces méthodes, un modèle de réseau est composé d'éléments qui doivent être une représentation exacte des éléments du circuit réel. Il est habituellement nécessaire d'imiter les éléments du circuit réel qui ont des constantes réparties par des éléments de modèle ayant des constantes concentrées. De plus, il est essentiel que les caractéris-

3.4 Groups 2 and 3 — Methods of calibration

From the measured value of the rate-of-change, di/dt , of the injected current immediately before zero, calculate the equivalent r.m.s. value of the injected current, I_1 .

$$I_1 = \frac{\frac{di_1}{dt}}{2 \pi f_1 \sqrt{2}}$$

where f_1 = frequency of the injected current.

In this calculation, it is assumed that:

$$i_1 = I_1 \sqrt{2} \sin 2 \pi f_1 t \simeq I_1 \sqrt{2} \cdot 2 \pi f_1 t$$

This is approximately valid when $t_2 < 1\,250 \mu s$ (or when $t_2 < 1\,000 \mu s$ on a 60 Hz basis).

On the basis of the above approximations, the following rule may be derived:

The frequency of the injected current must be $\leq 1/8$ of the equivalent natural frequency of the circuit being measured. For cases where the co-ordinate t_2 of the prospective TRV is greater than $1\,250 \mu s$ ($1\,000 \mu s$ for 60 Hz), the frequency of the injected current must equal the rated power-frequency.

If the r.m.s. value of the full power short-circuit current of the circuit is I_{sc} A, then the voltage calibration V_{sc}/mm for the TRV corresponding to I_{sc} will be:

$$V_{sc}/mm = V_1/mm \times \frac{I_{sc}}{I_1} \times \frac{f_{sc}}{f_1}$$

where f_{sc} = frequency of short-circuit current.

Subject to the provisions given above, concerning prospective TRVs with long times to co-ordinate t_2 , for those cases where the deviation of the curve of the current from the sinusoidal, symmetrical form is too significant to be neglected, the following basic formula should be used:

$$V_{sc}/mm = V_1/mm \frac{\frac{di_{sc}}{dt} \bigg|_{i_{sc} \rightarrow 0}}{\frac{di_1}{dt} \bigg|_{i_1 \rightarrow 0}}$$

where $(di_{sc}/dt) \big|_{i_{sc} \rightarrow 0}$ is the rate-of-change of the power-frequency short-circuit current at current zero, with the current function

$$i_{sc} = I_{sc} \sqrt{2} \sin 2 \pi f_{sc} \cdot t \simeq I_{sc} \sqrt{2} \cdot 2 \pi f_{sc} t$$

This formula will apply particularly to the capacitance-current injection method where the current will be of a slightly damped oscillatory form.

To determine the calibration for short-line fault tests, the following method is suitable:

From the high-speed recording measure:

du_1/dt = the RRRV of the TRV at zero of the injected current;

u_1 = the first voltage peak of the injected circuit;

di_1/dt = the rate-of-change of the injected current at its zero.

By calculation:

$$Z = \frac{du_1/dt}{di_1/dt} = \text{full value of the surge impedance.}$$

3.5 Group 4 — Model networks

In these methods, a model network is assembled from units which must be a true representation of the components of the full-scale circuit. It is usually necessary to imitate the components of the full-scale circuit which have distributed parameters by model units having lumped parameters. In addition, it is essential that the impedance

tiques d'impédance (particulièrement de réactance et de résistance) des éléments du modèle soient, d'aussi près que possible, une véritable imitation de ces caractéristiques des éléments réels à des fréquences atteignant au moins celle correspondant à la TTR à l'étude.

La précision de cette méthode dépend de l'obtention des données exactes concernant les paramètres du circuit à représenter et il est souvent difficile d'obtenir ces données et de les représenter par un petit élément du modèle.

Ceci s'applique particulièrement aux paramètres variant avec la fréquence, de sorte qu'en général cette méthode ne tient pas compte directement de la réduction de la TTR et tend à donner des valeurs un peu plus élevées que celles obtenues à l'aide de courts-circuits directs sur un réseau réel.

Cette méthode est surtout utile pour l'étude de projets de réseaux, car elle ne nécessite pas la mise hors service du réseau et constitue un guide utile à condition de connaître ses limites.

3.6 Groupe 5 — Calcul à partir des paramètres du circuit

Lorsque les données concernant les paramètres des éléments du circuit sont connues, comme pour le groupe 4, il est souvent commode de calculer la forme d'onde de la TTR, en particulier si le circuit n'est pas trop complexe.

En général, la méthode ne tient pas compte des effets de réduction, bien qu'il existe quelque possibilité d'en tenir compte si les données correspondantes du circuit sont disponibles; de même on peut tenir compte de la décroissance de la composante à fréquence industrielle pour les TTR dont le temps t_d dépasse 1 250 μ s.

La méthode comporte les limites du groupe 4, auxquelles on doit ajouter les erreurs propres aux calculs à moins d'avoir obtenu de l'expérience en comparant les résultats de calculs avec des TTR réelles obtenues à partir d'essais mettant en œuvre les techniques des groupes 1, 2, 3 ou 6.

3.7 Groupe 6 — Enclenchement à vide de réseaux d'essai comprenant des transformateurs

Cette méthode consiste à enclencher le transformateur d'essai sur un circuit ouvert et à enregistrer à l'aide d'oscillogrammes l'allure de la tension transitoire aux bornes du circuit secondaire à vide.

La méthode est très utile dans les stations d'essais où le courant de court-circuit est fourni par des alternateurs. Toutefois, il faut que le disjoncteur effectuant l'enclenchement ne comporte pas de résistance shunt, soit dépourvu de préamorçage notable et soit situé géographiquement à proximité immédiate du disjoncteur en essai. De plus, l'application de cette méthode est limitée aux circuits donnant naissance à une TTR à une seule fréquence et cette méthode ne reproduit pas la composante exponentielle correspondant aux courants de Foucault.

4. Comparaison des méthodes

Les diverses méthodes sont classées dans le tableau I avec leurs caractéristiques, leurs avantages et leurs désavantages.

(especially reactance and resistance) characteristics of the model units shall be, as near as possible, a true imitation of those characteristics of the full-scale components at frequencies up to at least that corresponding to the TRV under consideration.

The accuracy of this method depends upon having exact data for the parameters of the circuit to be imitated, and these are frequently difficult to obtain and to simulate on a small model component.

This applies particularly to parameters which vary with frequency, so that this method in general does not directly take into account the depression of the TRV, and tends to give values which are somewhat higher than those obtained with direct short-circuits on a full-scale system.

The method is mainly useful for investigating power systems since it does not require the system to be taken out of service, and will give useful guidance provided that its limitations are recognized.

3.6 Group 5 — Calculation from circuit parameters

When the data concerning the parameters of the components of the circuit are known, as for Group 4, it is often convenient to calculate the waveform of the TRV, particularly if the circuit is not too complex.

In general, the method does not take into account depression effects, although some allowance can be made for these if the relevant data for the circuit are available; similarly the decrement of the power-frequency component, for those TRVs where the time co-ordinate t_2 exceeds 1 250 μ s, can be taken into account.

The method is subject to the limitations of Group 4, plus the errors inherent in calculations unless experience has been gained in checking results with actual TRVs obtained from tests using the techniques of Groups 1, 2, 3 or 6.

3.7 Group 6 — No-load switching of testing systems including transformers

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.

The method is very useful in those test stations where the short-circuit current is obtained by alternators. However the circuit-breaker used for the switching shall have no shunt resistance, be free of any appreciable pre-striking and be located in close proximity to the circuit-breaker under test. Furthermore, this method has a limited application to those circuits producing single frequency TRV and does not reproduce the exponential component which is related to eddy currents.

4. Comparison of the methods

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

TABLEAU I

Méthode	Limites théoriques	Limites pratiques
1.1 — Essais réels avec un disjoncteur idéal.	Aucune. Tous les phénomènes sont correctement représentés.	Absence de disjoncteur idéal pour couvrir toute la gamme des spécifications.
1.2 — Essais à fréquence industrielle à pleine tension et courant limité (ou un essai avec un disjoncteur idéal ou un essai « proche » est réalisable).	Ne tient pas compte des relations non linéaires qui peuvent exister dans le circuit d'essai, c'est-à-dire absence de relation linéaire entre le courant et la tension à une fréquence particulière (à ne pas confondre avec les influences des éléments du circuit qui dépendent du temps).	Absence de disjoncteur idéal pour couvrir toute la gamme des spécifications. L'obtention de la TTR exige des techniques de mesures compliquées; sans cela il est difficile d'interpréter les résultats en présence d'une importante composante à fréquence industrielle. Pour des essais « proches », le dispositif de limitation du courant le plus convenable est une inductance parfaite; autrement un élément du circuit d'essai peut être utilisé lorsqu'il est disponible (par exemple résistance ou condensateur). L'utilisation de tels éléments est vraisemblablement encombrante et chère.
1.3 — Essais à fréquence industrielle à tension réduite avec un disjoncteur idéal sur un circuit d'essai par ailleurs non modifié (c'est-à-dire essais à excitation réduite).	Ne tient pas compte des relations non linéaires qui peuvent exister dans le circuit d'essai, c'est-à-dire absence de relation linéaire entre le courant et la tension à une fréquence particulière (à ne pas confondre avec les influences des éléments du circuit qui dépendent du temps).	Tant qu'un disjoncteur idéal couvrant la gamme complète des spécifications n'est pas disponible, le choix du disjoncteur idéal à utiliser est limité. La synchronisation peut être difficile à réaliser dans les circuits utilisant plus d'un alternateur. L'excitation doit être suffisamment forte pour éviter la déformation de la forme de l'onde. N'est généralement pas possible dans une station d'essai de réseau.
1.4 — Essais réels avec un disjoncteur courant.	Difficulté de séparer les influences du disjoncteur des caractéristiques de la TTR enregistrées durant l'essai.	Choix de disjoncteurs convenables comportant une faible tension d'arc, produisant une déformation négligeable du courant au passage à zéro, possédant un courant post-arc négligeable et sans impédances shunt. Si on ne peut pas effectuer cela, on introduit des erreurs et il est possible d'observer un manque d'uniformité entre les stations d'essais par suite de l'utilisation de disjoncteurs de caractéristiques différentes.
2. — Essais d'un disjoncteur idéal sur un circuit hors tension avec injection de courant à fréquence industrielle.	Ne tient pas compte des relations non linéaires qui peuvent exister dans le circuit d'essai, c'est-à-dire absence de relation linéaire entre le courant et la tension à une fréquence particulière (à ne pas confondre avec les influences des éléments du circuit qui dépendent du temps).	Dans une station alimentée par un réseau, n'est applicable qu'à des éléments de circuit hors tension, par exemple, parties constitutives du défaut en ligne, ou si l'impédance du réseau est négligeable par rapport aux autres impédances du circuit d'essai. Les machines doivent être arrêtées pour éviter les tensions rémanentes. La position du rotor peut avoir, de l'importance s'il existe une différence considérable entre les réactances en phase et en quadrature. Le temps de commutation des diodes de coupure utilisées à la place d'un disjoncteur idéal et pouvant supporter le passage du courant injecté à fréquence industrielle nécessite pour l'essai peut avoir de l'influence sur la TTR si celle-ci comporte des composantes à haute fréquence, par exemple pour les circuits d'essai de défaut en ligne. Les perturbations induites dans le circuit d'essai hors tension et provenant de sources extérieures peuvent avoir de l'influence sur la TTR si la tension d'essai est relativement faible par suite de la très faible réactance du circuit d'essai en liaison par exemple avec le défaut en ligne.

TABLE I

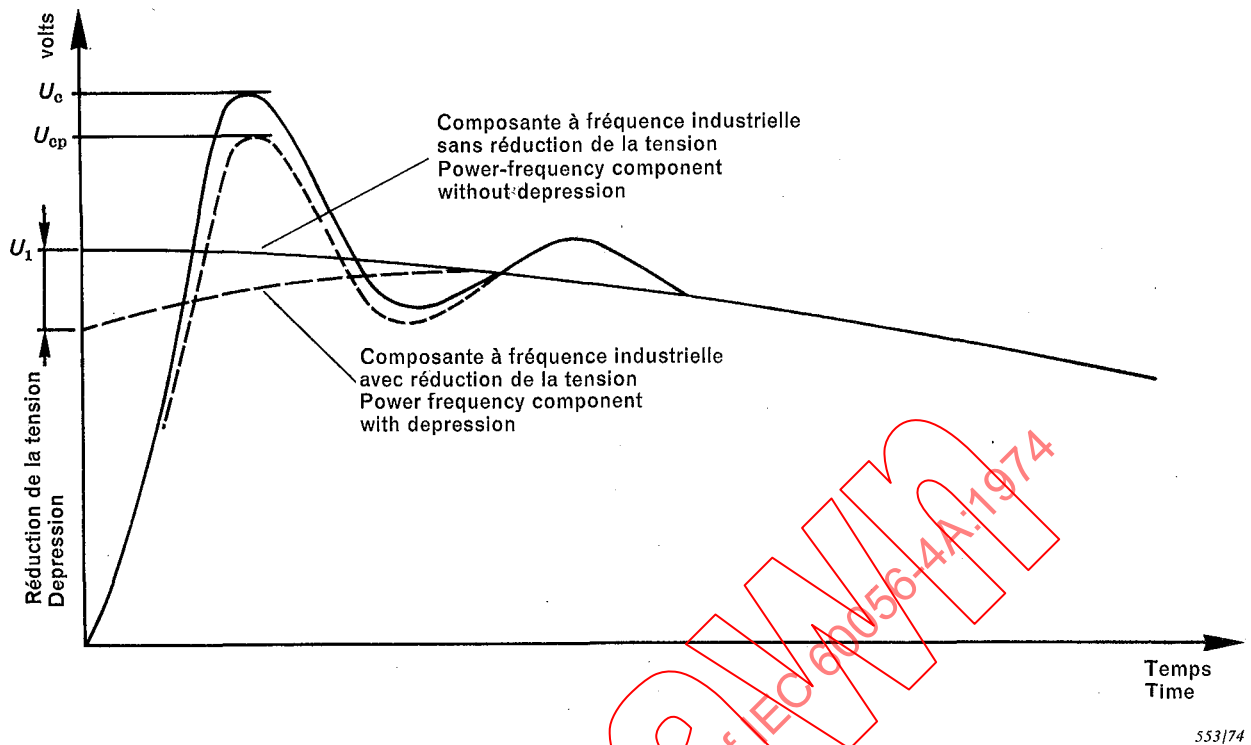
Method	Theoretical limitations	Practical limitations
1.1 — Full scale tests with an ideal circuit-breaker.	None. All phenomena are correctly represented.	Non-existence of an ideal circuit-breaker to cover the full range of requirements.
1.2 — Power-frequency tests at full voltage with a limited current disturbance. (Either an ideal circuit-breaker test or a "close" test is feasible.)	Does not account for non-linearities which may exist in the test circuit, i.e. the absence of a linear relationship between current and voltage at a particular frequency (not to be confused with the effects of time dependent circuit elements).	Non-existence of an ideal circuit-breaker to cover the full range of requirements. Extraction of the TRV requires sophisticated measurement techniques: otherwise it is difficult to interpret results in the presence of a large power-frequency voltage component. For "close" tests, the most suitable current limiting device is a perfect inductance; otherwise an element of the test circuit may be used where it is available (e.g. resistor or capacitor). Elements used are likely to be bulky and expensive.
1.3 — Power-frequency tests at reduced voltage with an ideal circuit-breaker on as otherwise unmodified test circuit (i.e. low excitation tests).	Does not account for non-linearities which may exist in the test circuit, i.e. the absence of a linear relationship between current and voltage at a particular frequency (not to be confused with the effects of time dependent circuit elements).	Whilst ideal circuit-breakers to cover the whole range are not yet available, the selection of the ideal circuit-breaker to be used is limited. With circuits employing more than one generator, synchronization can be difficult to achieve. Excitation must be sufficiently high to avoid waveform distortion. Generally not possible in a network station.
1.4 — Full scale tests with a conventional circuit-breaker.	Difficulty of separating the circuit-breaker effects from the TRV characteristics recorded during test.	Choice of suitable circuit-breakers having a low arc-voltage producing negligible current distortion at current zero, negligible post-arc current and no shunt impedances. In cases where the above cannot be made, errors are introduced and there is the possibility of lack of uniformity between testing stations due to the use of circuit-breakers having different characteristics.
2. — Ideal circuit-breaker tests on a "dead" circuit with power-frequency current injection.	Does not account for non-linearities which may exist in the test circuit, i.e. the absence of a linear relationship between current and voltage at a particular frequency (not to be confused with the effects of time dependent circuit elements).	In a network-fed station, only applicable on "dead" circuit elements, e.g. short-line fault components, or where the impedance of the network is negligible compared with the remainder of the test circuit impedance. Machines must be stationary to avoid remanent voltages. Position of rotor may be important if there is a considerable difference between phase and quadrature reactances. The recovery time of switching diodes as used instead of an ideal circuit-breaker, capable of carrying the necessary injected power-frequency current, may affect the TRV where this contains high frequency components, e.g. in short-line fault test circuits. Interference from external sources induced in the "dead" test circuit may affect the TRV where the measuring voltage is relatively small due to very low test circuit reactance, for example as associated with short-line faults.

TABLEAU I (suite et fin)

Méthode	Limites théoriques	Limites pratiques
3. — Essais d'un disjoncteur idéal sur un circuit hors tension avec injection de courant à une fréquence supérieure à la fréquence industrielle.	Ne tient pas compte des relations non linéaires qui peuvent exister dans le circuit d'essai. Ne fournit pas directement l'impédance à fréquence industrielle. Donne la forme d'onde et les valeurs correctes de la TTR des circuits à une seule et à plusieurs fréquences à partir du zéro, mais seulement jusqu'au premier maximum pourvu que la fréquence d'injection soit supérieure à la fréquence industrielle et bien inférieure à la fréquence de la TTR. Il n'est pas possible d'évaluer correctement le facteur d'amplitude.	Dans une station alimentée par un réseau, n'est applicable qu'à des éléments de circuit hors tension, par exemple, parties constituantes du défaut en ligne, si l'impédance du réseau est négligeable par rapport aux autres impédances du circuit d'essai. Les machines doivent être arrêtées pour éviter les tensions rémanentes. La position du rotor peut avoir de l'importance s'il existe une différence considérable entre les réactances en phase et en quadrature.
4. — Mesure de la TTR par analyseurs transitoires de réseau.	Des données précises relatives aux caractéristiques du réseau non linéaires et dépendantes de la fréquence ne sont pas toujours disponibles. Une connaissance exacte des éléments du circuit et de leurs paramètres transversaux est nécessaire.	Il est nécessaire de représenter de façon adéquate les éléments du circuit par les éléments de l'analyseur transitoire de réseau, y compris leurs caractéristiques non linéaires et dépendantes du temps.
5. — Calcul des formes d'onde de la TTR.	Des données précises relatives aux caractéristiques du réseau non linéaires et dépendantes de la fréquence ne sont pas toujours disponibles. Une connaissance exacte des éléments du circuit et de leurs paramètres transversaux est nécessaire.	Si l'impédance du réseau n'est pas négligeable par rapport à l'impédance de la station d'essai, il est nécessaire de connaître complètement les conditions correspondantes du réseau à l'instant de l'essai. Représentation précise ou adéquate des éléments du circuit, y compris leurs caractéristiques non linéaires et dépendantes du temps, et en particulier de leurs paramètres transversaux.
6. — Endenchement à vide des transformateurs d'essai.	Des corrections sont nécessaires pour le front de l'onde de tension à fréquence industrielle à moins que les transformateurs ne soient mis sous tension à la crête de l'onde de tension ou près de celle-ci.	Exige le circuit réel des essais de court-circuit. Applicable seulement aux circuits à une seule fréquence.

TABLE I (concluded)

Method	Theoretical limitations	Practical limitations
3. — Ideal circuit-breaker tests on a "dead" circuit with current injection at a frequency above power frequency.	Does not account for non-linearities which may exist in the test circuit. Does not give power-frequency impedance directly. Gives correct wave-shape and values for the TRV of single- and multi-frequency circuits from zero to the first maximum only, provided that the injection frequency is above power-frequency and well below the frequency of the TRV. It is not possible to evaluate amplitude factor correctly.	In a network-fed station, only applicable on "dead" circuit elements, e.g. short-line fault components, of where the impedance of the network is negligible compared with the remainder of the test circuit impedance. Machines must be stationary to avoid remanent voltages. Position of rotor may be important if there is a considerable difference between phase and quadrature reactances.
4. — TRV measurements by transient network analysers.	Precise information of non-linear and frequency dependent characteristics of the network is not always available. Exact knowledge of circuit components and their stray parameters is necessary.	Adequate representation of circuit components in the transient network analyser elements, including their non-linear and time dependent characteristics, is necessary.
5. — Computed TRV waveforms.	Precise information on non-linear and frequency dependent characteristics of the network is not always available. Exact knowledge of circuit components and their stray parameters is necessary.	Where the network impedance is not negligible compared with the test station impedance, complete knowledge of the relevant momentary network conditions is necessary. Accurate or adequate representation of the circuit components, including their non-linear and time-line dependant characteristics and particularly the stray parameters.
6. — No-load switching of testing transformers.	Corrections necessary for power-frequency voltage wave-front unless the transformers are energized at or near the peak of the voltage wave.	Requires actual short-circuit test circuits. Applicable only for single-frequency circuits.



U_c = Valeur de crête spécifiée de la TTR
TRV peak specified

U_{ep} = TTR mesurée avec la réduction de la tension
TRV measured with depression

U_1 = Valeur de crête de la tension à fréquence industrielle sans réduction de la tension
Power-frequency peak without depression

FIG. 1. — Influence de la réduction de la tension sur la valeur de crête de la TTR.
Effect of depression on TRV peak.

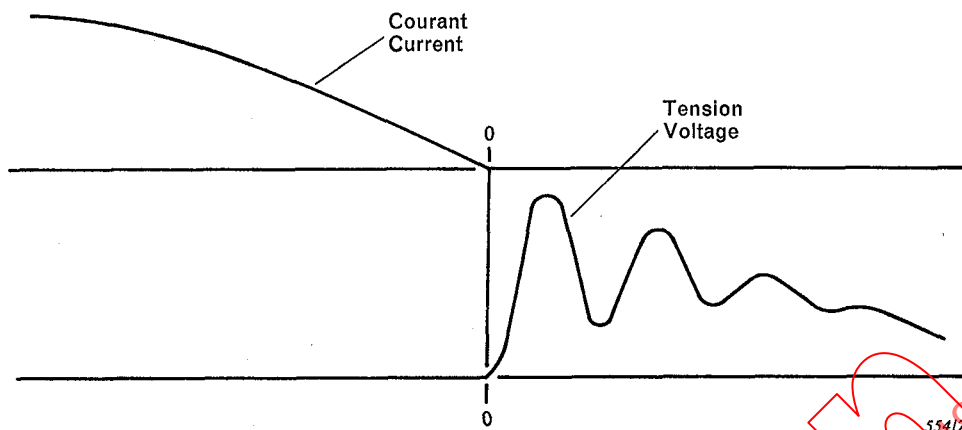


FIG. 2. — TTR pour une coupure idéale.
TRV for ideal breaking.

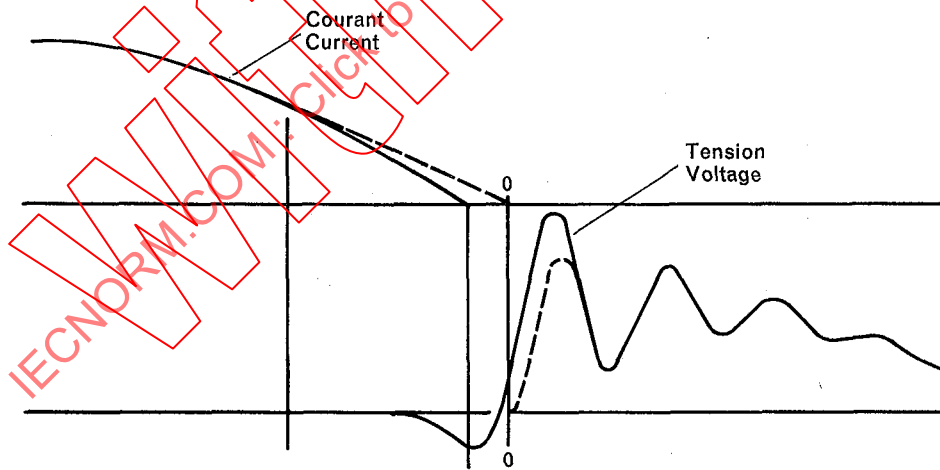


FIG. 3. — Coupure avec seulement la présence d'une tension d'arc.
Breaking with only arc-voltage present.