

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

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

RAPPORT DE LA CEI

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

(affiliated to the International Organization for Standardization — ISO)

IEC REPORT

Publication 427

Première édition — First edition

1973

**Rapport sur les essais synthétiques des disjoncteurs
à courant alternatif à haute tension**

**Report on synthetic testing of high-voltage
alternating current circuit-breakers**



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.

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.

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

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

RAPPORT DE LA CEI

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

(affiliated to the International Organization for Standardization — ISO)

IEC REPORT

Publication 427

Première édition — First edition

1973

**Rapport sur les essais synthétiques des disjoncteurs
à courant alternatif à haute tension**

**Report on synthetic testing of high-voltage
alternating current circuit-breakers**



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
Articles	
1. Introduction	6
2. Domaine d'application	6
3. Définitions	6
SECTION UN — GÉNÉRALITÉS	
4. Description du processus de coupure	8
5. Bref examen des circuits d'essais synthétiques utilisant des méthodes d'injection	14
6. Equivalence entre les circuits d'essais synthétiques et les circuits d'essais directs	20
SECTION DEUX — PRESCRIPTIONS SPÉCIFIQUES ET PROCÉDURE D'ESSAI	
7. Conformité avec la Publication 56 de la CEI	26
8. Prescriptions générales pour la procédure d'essai	28
9. Défauts en ligne	40
10. Méthodes de prolongation de la durée de l'arc	40
11. Procédure pour régler et ajuster les circuits d'essais	42
ANNEXE A — Estimation de l'influence de la tension d'arc sur la réduction de l'amplitude et de la durée de l'alternance de courant à fréquence industrielle	50
ANNEXE B — Exemples de procédure d'essai par la méthode « pas à pas »	56
ANNEXE C — Enregistrements spécifiques aux essais synthétiques	60
FIGURES	64

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
PREFACE	5
Clause	
1. Introduction	7
2. Scope	7
3. Definitions	7
SECTION ONE — GENERAL	
4. Description of the process of interruption	9
5. Brief review of synthetic test circuits using injection methods	15
6. Equivalence of synthetic test circuits and direct test circuits	21
SECTION TWO — SPECIFIC REQUIREMENTS AND TEST PROCEDURE	
7. Compliance with IEC Publication 56	27
8. General requirements for test procedure	29
9. Short-line faults	41
10. Methods of prolonging the arc duration	41
11. Procedure for setting and adjusting the test circuits	43
APPENDIX A — Estimation of the influence of arc-voltage in reducing the amplitude and duration of the power-frequency current loop	51
APPENDIX B — Examples of testing procedure with the “step-by-step” method	57
APPENDIX C — Data to be recorded for synthetic tests	61
FIGURES	64

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**RAPPORT SUR LES ESSAIS SYNTHÉTIQUES DES DISJONCTEURS
À COURANT ALTERNATIF À HAUTE TENSION**

PRÉAMBULE

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

PRÉFACE

Le présent rapport a été établi par le Sous-Comité 17A: Appareillage à haute tension, du Comité d'Etudes N° 17 de la CEI: Appareillage.

Des projets furent discutés lors des réunions tenues à Arnhem en 1968 et à Washington en 1970. A la suite de ces réunions, un projet définitif, document 17A(Bureau Central)94, fut soumis à l'approbation des Comités nationaux suivant la Règle des Six Mois en septembre 1971.

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

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

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**REPORT ON SYNTHETIC TESTING OF HIGH-VOLTAGE ALTERNATING
CURRENT CIRCUIT-BREAKERS**

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

Drafts were discussed at the meetings held in Arnhem in 1968 and in Washington in 1970. As a result of these meetings, a final draft, document 17A(Central Office)94, was submitted to the National Committees for approval under the Six Months' Rule in September 1971.

The following countries voted explicitly in favour of publication:

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

RAPPORT SUR LES ESSAIS SYNTHÉTIQUES DES DISJONCTEURS À COURANT ALTERNATIF À HAUTE TENSION

1. Introduction

A la suite d'une décision prise par le Sous-Comité 17A pendant la réunion d'Arnhem en novembre 1968, cette publication a été établie sous forme de rapport. Ultérieurement, des règles convenables pour les essais synthétiques seront introduites dans les sections correspondantes de la Publication 56-4 de la CEI: Disjoncteurs à courant alternatif à haute tension, Quatrième partie: Essais de type et essais individuels (troisième édition).

En attendant, le présent rapport est destiné à servir de guide aux ingénieurs qui peuvent être intéressés par les essais synthétiques soit au titre du personnel d'une station d'essais, soit comme utilisateurs.

2. Domaine d'application

Les méthodes d'essais synthétiques conviennent pour déterminer les performances des disjoncteurs pour toutes séquences d'essais de coupure *, elles sont particulièrement adaptées quand on désire obtenir une puissance d'essai importante, ou se pourvoir d'une méthode souple qui permette de satisfaire les conditions à remplir pour obtenir des tensions transitoires de rétablissement pouvant varier de façon importante.

La section un de ce rapport traite des bases générales et des principes fondamentaux ** appropriés aux essais synthétiques des disjoncteurs.

La section deux de ce rapport traite des conditions particulières à remplir en vue de la détermination des performances de coupure des disjoncteurs à haute tension par l'emploi de méthodes d'essais synthétiques utilisant des méthodes soit d'injection de courant, soit d'injection de tension.

3. Définitions

Les définitions suivantes s'appliquent au présent rapport:

3.1 Essai direct

Essai de court-circuit dans lequel la tension appliquée, le courant, la tension de rétablissement, transitoire et à fréquence industrielle, sont tous obtenus à l'aide d'un *seul* circuit (une seule source de puissance). Cette source peut être un réseau ou des alternateurs spéciaux comme ceux utilisés dans les stations d'essais de court-circuit. Les tensions de rétablissement appliquées et à fréquence industrielle du circuit correspondent à la tension de la source de puissance.

3.2 Essai synthétique

Essai de court-circuit dans lequel la totalité du courant ou la plus grande partie de celui-ci est obtenue à partir d'une source (circuit de courant à fréquence industrielle) et dans lequel la tension transitoire de rétablissement est obtenue en totalité ou en partie à partir d'une ou de plusieurs sources séparées (circuits de tension); cette tension correspond à la tension nominale du disjoncteur en essai. La tension de la source de courant à fréquence industrielle peut être une fraction de la tension du circuit de tension.

* Des méthodes d'essais synthétiques et des cycles d'essais pour les essais de fermeture, de refermeture, etc., sont à l'étude (voir également les articles 7 et 8).

** Il existe, dans certains pays, des brevets qui protègent des détails de certains circuits d'essais synthétiques. Il est recommandé aux utilisateurs éventuels de méthodes d'essais synthétiques de vérifier eux-mêmes qu'ils ne sont pas des contre-facteurs en utilisant certains circuits. En variante, ils devront s'assurer, auprès des détenteurs de ces brevets, si ces derniers consentent à leur délivrer une licence appropriée.

REPORT ON SYNTHETIC TESTING OF HIGH-VOLTAGE ALTERNATING CURRENT CIRCUIT-BREAKERS

1. Introduction

Resulting from a decision taken by Sub-Committee 17A during the meeting at Arnhem in November 1968, this publication has been prepared as a report. Later, suitable rules for synthetic testing will be introduced into the relevant section of IEC Publication 56-4, High-voltage Alternating-current Circuit-breakers, Part 4: Type Tests and Routine Tests (third edition).

Meanwhile, this report is intended for the guidance of engineers who may be concerned with synthetic testing either as test station personnel or as users.

2. Scope

Synthetic testing methods are suitable for determining the performance of circuit-breakers for any breaking test-duty,* especially where it is desired to obtain a high test power or to provide a flexible method of covering a wide range of transient recovery-voltage requirements.

Section One of this report deals with the general background and fundamental principles ** applicable to the synthetic testing of circuit-breakers.

Section Two of this report deals with the particular requirements for determining the breaking performance of high-voltage circuit-breakers using synthetic testing methods employing either current injection or voltage injection methods.

3. Definitions

For the purpose of this report, the following definitions shall apply:

3.1 *Direct test*

A short-circuit test in which applied voltage, current, transient and power-frequency recovery-voltages are all obtained from a *single* circuit (a single power source), which may be a power system or special alternators as used in short-circuit testing stations, the applied and power-frequency recovery-voltages of the circuit corresponding to the voltage of the power source.

3.2 *Synthetic test*

A short-circuit test in which all of the current, or a major portion of it, is obtained from one source (power-frequency current circuit), and in which the transient recovery-voltage is obtained wholly or in part from one or more separate sources (voltage circuits); this voltage corresponding to the rated voltage of the tested circuit-breaker. The voltage of the power-frequency current source may be a fraction of that of the voltage circuit.

* Synthetic testing methods and test-duties for making tests, auto-reclosing, etc., are under consideration (see also Clauses 7 and 8).

** There are patents in some countries which are still in force covering details of certain synthetic testing circuits. It is recommended that intending users of synthetic test methods should satisfy themselves therefore that their proposed circuits do not infringe current patents. Alternatively, they should ascertain from the patentees whether they would be agreeable to the granting of an appropriate licence.

3.3 *Injection de courant*

Schéma d'essais synthétiques dans lequel la source de tension est connectée sur le circuit d'essais *avant* le zéro de courant et alimente ainsi en courant le disjoncteur en essai pendant la période du zéro de courant.

3.4 *Injection de tension*

Schéma d'essais synthétiques dans lequel la source de tension est connectée sur le circuit d'essais *après* le zéro de courant. Le circuit de courant à fréquence industrielle alimente en courant le disjoncteur en essai pendant la période du zéro de courant.

3.5 *Courant post-arc*

Courant qui circule à travers l'espace entre les contacts d'arc d'un disjoncteur après que le courant principal et la tension d'arc sont devenus nuls et que la tension transitoire a commencé à croître.

3.6 *Courant déformant*

Différence entre le courant présumé (c'est-à-dire le courant dans un circuit ne subissant pas de tension d'arc) et le courant d'arc (c'est-à-dire le courant qui traverse le disjoncteur en essai et qui est influencé par la tension d'arc).

SECTION UN — GÉNÉRALITÉS

4. **Description du processus de coupure**

4.1 *Les quatre périodes*

La forme de l'onde de courant dans le circuit dépend du facteur de puissance du circuit en court-circuit et de l'instant où le courant commence à circuler dans le circuit, cet instant étant repéré par rapport à l'onde de tension du circuit (voir figure 1, page 64).

Pendant la coupure d'un courant de court-circuit, la forme de l'onde du courant qui circule à travers l'arc dépend de l'instant où les contacts se séparent, cet instant étant repéré par rapport au courant.

Le courant atteindra une valeur de crête qui dépend des valeurs des composantes périodique et apériodique. La durée d'une alternance de courant dépend essentiellement de la fréquence du circuit et de la valeur de la composante apériodique.

La circulation du courant dans l'arc produit des effets thermiques et électromagnétiques qui doivent être supportés par le disjoncteur.

La durée de l'arc dépend des caractéristiques du disjoncteur en relation avec le circuit dans lequel il opère.

Pendant la durée de la circulation du courant à travers l'arc, il existe le long de l'espace inter-électrode une chute de tension qui dépend de la caractéristique instantanée courant/tension d'arc. Cette caractéristique est une fonction de la forme particulière de l'espace interélectrode, du fluide utilisé pour l'extinction et dépend aussi d'autres facteurs tels que: longueur de l'arc, diamètre, pression, température et constante de temps thermique.

La tension d'arc entraîne une déformation de l'onde de courant par rapport à la forme qu'elle aurait si l'arc n'existait pas puisque cette tension engendrera un courant déformant qui réduira l'amplitude du courant et peut modifier la durée d'une alternance du courant d'arc.

3.3 *Current injection*

A synthetic test schema in which the voltage source is switched into the test circuit *before* current-zero, thus providing the current through the tested circuit-breaker during the current-zero period.

3.4 *Voltage injection*

A synthetic test schema in which the voltage source is switched into the test circuit *after* current-zero, the power-frequency current circuit providing the current through the tested circuit-breaker during the current-zero period.

3.5 *Post-arc current*

The current which flows through the arc-gap of a circuit-breaker after the main current and arc-voltage have fallen to zero, and the transient recovery-voltage has begun to rise.

3.6 *Distortion current*

The difference between the prospective current (i.e. the current in a circuit having no arc-voltage) and the arc-current (i.e. the current through the tested circuit-breaker influenced by arc-voltage).

SECTION ONE — GENERAL

4. **Description of the process of interruption**

4.1 *The four periods*

The wave-shape of the current in the circuit depends upon the short-circuit power-factor of the circuit and upon the instant of current initiation in the circuit relative to the wave of the circuit-voltage (see Figure 1, page 64).

During the interruption of a short-circuit current, the current which flows through the arc has a wave-shape dependent upon the instant of contact separation relative to the current through the circuit.

The current will reach a peak value depending upon the symmetrical and d.c. component values. The duration of the current per loop depends primarily upon the circuit frequency, and the value of the d.c. component.

The current flow in the arc will produce thermal and electromagnetic effects which will have to be withstood by the circuit-breaker.

Arc-duration is dependent upon the characteristics of the circuit-breaker in relation to the circuit in which it is operating.

During the time that current flows through the arc, there will be a voltage drop across the gap which depends upon the instantaneous arc-voltage/current characteristic. This characteristic is a function of the particular arc-gap design, the arc-extinguishing medium used and it will also depend upon other factors such as arc-length, diameter, pressure, temperature and thermal time constant.

The arc-voltage causes the current wave to deviate from the course it would follow if no arc were present since this voltage will produce a distortion current which will reduce the amplitude and may modify the loop duration of the arc-current.

L'intervalle de temps qui sépare l'instant de la séparation des contacts de l'instant de la disparition du courant principal est la *période d'arc*.

A chaque alternance du courant d'arc, la tension d'arc présente habituellement une croissance ou une décroissance significative juste avant le zéro de courant. Ce phénomène dépend des caractéristiques de l'espace d'arc (voir figure 2, page 65). Il en résulte que la pente du courant s'écarte de la pente correspondant au courant présumé. Ceci correspond à la *période du changement significatif de la tension d'arc avant le zéro de courant*. Solidaire du courant, la tension aux bornes de l'espace interélectrode tombe à zéro et change de polarité pour devenir la tension transitoire de rétablissement.

Après le zéro de courant, sous l'influence de la tension transitoire de rétablissement et de la conductivité résiduelle de l'espace interélectrode, un courant post-arc peut circuler. Ceci correspond à la *période du courant post-arc*.

Après la disparition de tout courant à travers l'espace d'arc, le disjoncteur est contraint de la même façon qu'une distance isolante. Ceci correspond à la *période de contrainte diélectrique*.

Il faut noter qu'il n'est pas possible de déterminer les limites de ces périodes avec une grande précision.

4.2 Le courant déformant

La variation de la tension d'arc avant le zéro de courant engendre une réaction sur le courant circulant dans le circuit. Soit le circuit simplifié de la figure 3, page 66, représentant un court-circuit en service ou en essai direct, la tension U fait circuler un courant i dans un arc présentant une tension d'arc u_a . Un condensateur C est monté en parallèle sur l'arc.

Si on suppose que la tension d'arc $u_a = 0$, le courant de court-circuit présumé i_p (voir figure 4b, page 67) circulera à travers l'arc. L'amplitude et la forme de l'onde de ce courant seront déterminées par l'inductance L , la tension U , la fréquence de cette tension et l'instant où le courant commence à circuler.

Si on suppose que la tension d'alimentation $U = 0$ et qu'une tension d'arc existe, cette tension d'arc engendrera alors la circulation d'un courant. Ce courant i_d est le courant déformant, qui circule partiellement sous la forme d'un courant i_{dL} à travers l'inductance L , et partiellement sous la forme d'un courant i_{dC} à travers le condensateur C (voir figure 4c, page 67). Dans ces conditions, les équations ci-dessous sont applicables.

$$u_a - L \cdot \frac{di_{dL}}{dt} = 0 \quad (1)$$

et

$$C \frac{du_a}{dt} - i_{dC} = 0 \quad (2)$$

De là, on obtient la valeur i_d par l'équation:

$$i_d = i_{dL} + i_{dC} = \frac{1}{L} \int u_a dt + C \cdot \frac{du_a}{dt} \quad (3)$$

Pour un cas plus général, la formule du courant déformant est la suivante:

$$i_d = \frac{d}{dt} \int_0^t A(t - \tau) \cdot u_a(\tau) \cdot d\tau \quad (4)$$

où $A(t)$ est la réponse transitoire du réseau vu des bornes du disjoncteur essayé.

Si les deux tensions U et u_a existent (voir figures 4d et 4e, page 67), le courant résultant est alors donné par

$$i = i_p - i_d \quad (5)$$

The time interval from the instant of contact separation to the instant when the main current ceases is the *period of arcing*.

During each loop of arcing, the arc-voltage usually shows a significant increase, or decrease, just prior to current-zero — depending upon the characteristics of the arc-gap (see Figure 2, page 65). As a result, the rate-of-change of current will deviate from the corresponding rate-of-change of the prospective current. This is the *period of significant change of arc-voltage prior to current-zero*. Together with the current, the voltage across the gap falls to zero and changes polarity to become the transient recovery-voltage.

After current-zero, due to the transient recovery-voltage and the residual conductivity of the gap, a post-arc current can flow. This is the *period of post-arc current*.

After any current through the arc-gap has disappeared, the circuit-breaker will be stressed as an insulating distance. This is the *period of dielectric stress*.

It should be noted that it is not possible to determine the limits of these periods with great accuracy.

4.2 The distortion current

The variation of arc-voltage prior to current zero will produce a reaction on the current flowing in the circuit. In a simplified circuit, as in Figure 3, page 66, representing a short-circuit in service or a direct test, the voltage U supplies an arc-current i with the appropriate arc-voltage u_a . Parallel to the arc is a capacitor C .

If it is assumed that the arc-voltage $u_a = 0$, then a prospective short-circuit current i_p (see Figure 4b, page 67) will flow through the arc, the magnitude and wave-shape of this current being determined by the inductance L , the voltage U , the frequency of this voltage and the moment of current initiation.

If it is assumed that the supply voltage $U = 0$ and that an arc-voltage exists, then the arc-voltage will produce a current flow. This current i_d (see Figure 4c, page 67) is the distortion current, which will flow partly as i_{dL} through the inductance L , and partly as i_{dC} through the capacitor C . For this condition, the following equations apply:

$$u_a - L \cdot \frac{di_{dL}}{dt} = 0 \quad (1)$$

and

$$C \frac{du_a}{dt} - i_{dC} = 0 \quad (2)$$

From these, the following equation for i_d can be obtained:

$$i_d = i_{dL} + i_{dC} = \frac{1}{L} \int u_a dt + C \cdot \frac{du_a}{dt} \quad (3)$$

For the more general case, the formula for the distortion current is:

$$i_d = \frac{d}{dt} \int_0^t A(t - \tau) \cdot u_a(\tau) \cdot d\tau \quad (4)$$

where $A(t)$ is the transitory response of the system seen from the terminals of the tested circuit-breaker.

If both of the voltages, U and u_a are present (see Figures 4d and 4e, page 67), then the resulting current is given by

$$i = i_p - i_d \quad (5)$$

4.3 L'influence du courant déformant pendant la période d'arc

Pendant cette période, le courant déformant i_a , qui est une fonction des caractéristiques de l'espace d'arc et des paramètres du circuit, influence la descente vers le zéro du courant présumé i_p .

En comparaison avec le courant présumé, le courant d'arc résultant présente une distorsion sous les quatre aspects physiques suivants: amplitude du courant, durée d'une alternance, énergie d'arc et di/dt .

En première approximation, on peut envisager deux caractéristiques différentes de tension d'arc:

- 1) Une tension d'arc constante $u_a = U_a$
- 2) Une tension d'arc croissant linéairement $u_a = S \cdot t$

où $U_a = S \cdot \frac{1}{4} T$

avec $T = \frac{1}{f}$ et $f = \frac{\omega}{2\pi}$ = fréquence industrielle (voir figure 5, page 68).

Puisque le courant à travers le condensateur C (voir figures 3, page 66, et 4, page 67) est petit pendant cette période d'arc, on peut utiliser le schéma simplifié de la figure 6, page 68. On peut en tirer les formules suivantes utilisables avec les deux tensions d'arc ci-dessus et relatives à un courant symétrique n'ayant pas de composante apériodique:

Ces formules sont valables pour une seule alternance d'arc:

$\hat{U} = L \cdot \omega \cdot \hat{I}$ = valeur de crête de la tension du circuit de courant à fréquence industrielle

$\hat{I}$ = valeur de crête du courant présumé

i = valeur instantanée du courant présumé (réduit par la tension d'arc)

$\hat{I}_m$ = valeur de crête du courant d'arc (réduit par la tension d'arc)

t_m = instant correspondant à la valeur de crête $\hat{I}_m$

a) Rapport entre les amplitudes de courant:

— pour une tension d'arc constante:

$$\frac{\hat{I}_m}{\hat{I}} = \sin \omega t_m - \frac{U_a}{\hat{U}} \cdot \omega t_m$$

— pour une tension d'arc croissant linéairement:

$$\frac{\hat{I}_m}{\hat{I}} = \sin \omega t_m - \frac{S \omega}{2 \hat{U}} t_m^2$$

b) Instant t_m du maximum de courant:

— pour une tension d'arc constante:

$$\cos \omega t_m = \frac{U_a}{\hat{U}}$$

— pour une tension d'arc croissant linéairement:

$$\cos \omega t_m = \frac{S t_m}{\hat{U}}$$

c) Instant t_1 de l'interruption de courant (en négligeant i_c ; voir figure 4e, page 67):

— pour une tension d'arc constante:

$$\sin \omega t_1 = \frac{U_a \omega}{\hat{U}} t_1$$

— pour une tension d'arc croissant linéairement:

$$\sin \omega t_1 = \frac{S \omega}{2 \hat{U}} t_1^2$$

4.3 The influence of the distortion current during the period of arcing

During this period, the distortion current i_a , being a function of the characteristics of the arc-gap and the parameters of the network, will influence the reduction to zero of the prospective current i_p .

By comparison with the prospective current, the resulting arc-current exhibits distortion in four physical aspects: current amplitude, loop duration, arc-energy and di/dt .

As a first approximation, two different arc-voltage characteristics can be considered, namely:

- 1) A constant arc-voltage, $u_a = U_a$
- 2) A linearly rising arc-voltage, $u_a = S \cdot t$

where $U_a = S \cdot \frac{1}{4} T$

with $T = \frac{1}{f}$ and $f = \frac{\omega}{2\pi}$ = power-frequency (see Figure 5, page 69).

Since the current through the capacitor C (see Figures 3, page 66, and 4, page 67), will be small during this period of arcing, the simplified circuit diagram of Figure 6, page 69, may be used. For the above two arc-voltages, the following formulae can be derived, related to a symmetrical current having no d.c. component:

These formulae are valid for a single loop of arcing:

$\hat{U} = L \cdot \omega \cdot \hat{I}$ = peak value of driving voltage of power-frequency current circuit

$\hat{I}$ = peak value of prospective current

i = instantaneous value of arc-current (reduced by arc-voltage)

$\hat{i}_m$ = peak value of arc-current (reduced by arc-voltage)

t_m = instant of peak value of $\hat{i}_m$

a) Ratio of current amplitudes:

— for constant arc-voltage:

$$\frac{\hat{i}_m}{\hat{I}} = \sin \omega t_m - \frac{U_a}{\hat{U}} \cdot \omega t_m$$

— for linearly rising arc-voltage:

$$\frac{\hat{i}_m}{\hat{I}} = \sin \omega t_m - \frac{S \omega}{2 \hat{U}} t_m^2$$

b) Instant t_m of maximum current:

— for constant arc-voltage:

$$\cos \omega t_m = \frac{U_a}{\hat{U}}$$

— for linearly rising arc-voltage:

$$\cos \omega t_m = \frac{S t_m}{\hat{U}}$$

c) Instant t_1 of current interruption (neglecting i_c ; see Figure 4e, page 67)

— for constant arc-voltage:

$$\sin \omega t_1 = \frac{U_a \omega}{\hat{U}} t_1$$

— for linearly rising arc-voltage:

$$\sin \omega t_1 = \frac{S \omega}{2 \hat{U}} t_1^2$$

d) Pente du courant i à l'instant t_1 (en négligeant i_c ; voir figure 4e, page 67):

— pour une tension d'arc constante:

$$\left(\frac{di}{dt}\right) = -\omega \hat{I} \left(\sqrt{1 - \left(\frac{U_a}{\hat{U}} \omega t_1\right)^2} + \frac{U_a}{\hat{U}} \right)$$

— pour une tension d'arc croissant linéairement:

$$\left(\frac{di}{dt}\right) = -\omega \hat{I} \left(\sqrt{1 - \left(\frac{S}{2\hat{U}} \omega t_1^2\right)^2} + \frac{S t_1}{\hat{U}} \right)$$

e) Réduction de l'énergie d'arc:

L'énergie d'arc W_{arc} dégagée pendant une alternance d'arc dépend de la tension d'arc et du courant:

$$W_{\text{arc}} = \int_0^{t_1} u_a i dt$$

— pour une tension d'arc constante:

$$W_{\text{arc}} = \frac{U_a \hat{I}}{\omega} \left[2 - \frac{1}{2} \omega^2 t_1^2 \frac{U_a}{\hat{U}} \left(1 + \frac{U_a}{\hat{U}} \right) \right]$$

— pour une tension d'arc croissant linéairement:

$$W_{\text{arc}} = \frac{S \hat{I}}{\omega^2} \left[\sin \omega t_1 - \omega t_1 \cos \omega t_1 - \frac{S}{8 \hat{U} \omega} (\omega t_1)^4 \right]$$

Les solutions de certaines de ces équations sont données graphiquement sur les figures 7a et 7b, page 68. qui fournissent la réduction relative de l'amplitude $\frac{\Delta I}{\hat{I}}$ et la réduction relative d'une alternance $\frac{\Delta t}{\frac{1}{2}T}$ en fonction des rapports $\frac{U_a}{\hat{U}}$ et $\frac{S \cdot \frac{1}{4}T}{\hat{U}}$ relatifs aux deux caractéristiques d'arc. De plus:

$$\Delta I = \hat{I} - I_m \quad \text{et} \quad \Delta t = \frac{1}{2}T - t_1$$

Voir aussi l'article 1 de l'annexe A.

4.4 L'influence du courant déformant pendant la période du changement significatif de la tension d'arc

Cet intervalle de temps débute quand la tension d'arc commence son changement significatif lorsque le courant approche de zéro. La variation de la tension d'arc pendant ce temps influence la forme et la pente du courant immédiatement avant le zéro de courant.

Cette déviation de la courbe du courant présumé est causée par le courant déformant qui circule en grande partie dans les impédances à faible constante de temps, compte tenu de tous les paramètres du circuit réel.

La façon particulière dont le courant tend vers le zéro est la cause des conditions qui règnent dans l'espace entre les contacts d'arc d'un disjoncteur au zéro du courant, particulièrement en ce qui concerne les conditions qui existent dans le milieu séparant les contacts d'arc.

L'interaction majeure entre le circuit et le disjoncteur est causée par la tension d'arc, qui charge et décharge les condensateurs et influence le di/dt juste avant le zéro.

5. Bref examen des circuits d'essais synthétiques utilisant des méthodes d'injection

Le texte qui suit est un bref examen et une explication des principes fondamentaux régissant les circuits d'essais synthétiques par injection de courant ou par injection de tension.

La figure 3, page 66, montre un schéma simplifié d'un court-circuit dans un réseau ou d'un circuit d'essai direct.

d) Rate-of-change of current i at instant t_1 (neglecting i_c ; see Figure 4e, page 67):

— for constant arc-voltage:

$$\left(\frac{di}{dt}\right) = -\omega \hat{I} \left(\sqrt{1 - \left(\frac{U_a}{\hat{U}} \omega t_1\right)^2} + \frac{U_a}{\hat{U}} \right)$$

— for linearly rising arc-voltage:

$$\left(\frac{di}{dt}\right) = -\omega \hat{I} \left(\sqrt{1 - \left(\frac{S \omega}{2 \hat{U}} t_1^2\right)^2} + \frac{S t_1}{\hat{U}} \right)$$

e) Reduction in arc-energy:

The arc-energy W_{arc} released during one arcing loop is dependent upon arc-voltage and current so that:

$$W_{\text{arc}} = \int_0^{t_1} u_a i dt$$

— for constant arc-voltage:

$$W_{\text{arc}} = \frac{U_a \hat{I}}{\omega} \left[2 - \frac{1}{2} \omega^2 t_1^2 \frac{U_a}{\hat{U}} \left(1 + \frac{U_a}{\hat{U}} \right) \right]$$

— for linearly rising arc-voltage:

$$W_{\text{arc}} = \frac{S \hat{I}}{\omega^2} \left[\sin \omega t_1 - \omega t_1 \cos \omega t_1 - \frac{S}{8 \hat{U} \omega} (\omega t_1)^4 \right]$$

The solutions of some of these equations are given graphically in Figures 7a and 7b, page 69, showing the relative reduction of amplitude $\frac{\Delta I}{\hat{I}}$, and the relative reduction in loop duration $\frac{\Delta t}{\frac{1}{2} T}$ for both arc-voltage characteristics as a function of the ratio $\frac{U_a}{\hat{U}}$ and $\frac{S \cdot \frac{1}{4} T}{\hat{U}}$ respectively, where:

$$\Delta I = \hat{I} - I_m \quad \text{and} \quad \Delta t = \frac{1}{2} T - t_1$$

See also Clause 1 of Appendix A.

4.4 The influence of the distortion current during the period of significant change of arc-voltage

This interval begins when the arc-voltage starts to change significantly as the current approaches zero. The change of the arc-voltage during this time influences the shape and the rate-of-change of the current immediately before current-zero.

This deviation from the prospective current curve will be caused by the distortion current, which mainly flows in the low time constant impedances, taking into account all parameters of the actual circuit.

The particular way in which the current approaches zero is responsible for the conditions prevailing between the arcing-contacts of a circuit-breaker at current-zero; particularly for the conditions which exist in the medium between the arcing-contacts.

The major interaction between circuit and circuit-breaker is caused by the arc-voltage charging and discharging capacitances and influencing di/dt just before zero.

5. Brief review of synthetic test circuits using injection methods

The following is a brief review and explanation of the basic principles of synthetic test circuits, using either current injection or voltage injection methods.

Figure 3, page 66, shows a simplified diagram of a short-circuit in a network, or of a direct test circuit.

La différence entre les conditions en réseau et un circuit d'essai direct réside dans la structure des impédances: dans un réseau, les impédances sont plus réparties alors qu'en essai direct les impédances sont plus localisées.

Le circuit d'essai direct capable d'appliquer des contraintes spécifiques sur un disjoncteur peut être remplacé par des schémas d'essais synthétiques composés de différents circuits; par exemple, le circuit de courant à fréquence industrielle fournissant au moins la majeure partie de la contrainte de courant, et le circuit de tension fournissant au moins la majeure partie de la contrainte de tension.

Habituellement, le courant est obtenu à partir d'alternateurs d'essai ou du réseau, et la tension à partir d'un condensateur chargé. Si les conditions spécifiées sont conservées, d'autres sources sont également utilisables, tels un circuit oscillant en tant que source de courant et un générateur haute tension comme source de tension.

Dans le circuit de courant à fréquence industrielle, un disjoncteur auxiliaire est monté en série avec le disjoncteur en essai. La superposition des courants ou des tensions est obtenue par la connexion du circuit de tension avant ou après le zéro de courant par l'intermédiaire d'un circuit de commande convenable. L'instant particulier choisi pour la connexion du circuit de tension dépend de l'utilisation du principe d'injection de courant ou d'injection de tension.

5.1 *Injection de courant*

Dans un schéma d'essai synthétique par injection de courant, la superposition des courants a lieu un peu avant le zéro du courant de court-circuit à fréquence industrielle. Un courant d'amplitude plus faible mais de fréquence plus élevée, provenant du circuit de tension, est superposé dans le disjoncteur en essai ou dans le disjoncteur auxiliaire. L'instant d'établissement de ce courant injecté est choisi par l'intermédiaire d'un circuit de commande asservi au courant. Il est recommandé que cet instant soit tel que la forme caractéristique de l'onde du courant résultant dans le disjoncteur en essai corresponde exactement à la forme du courant dans un circuit d'essai direct équivalent avant le zéro du courant pendant la période du changement significatif de la tension d'arc.

De cette façon, le disjoncteur en essai est connecté automatiquement sur le circuit de tension après l'interruption du courant dans le disjoncteur auxiliaire. Il n'existe donc pas de délai entre la contrainte de courant et l'application de la contrainte de tension.

1) *Schéma d'injection de courant comportant un circuit de tension monté en parallèle sur le disjoncteur en essai (circuits connectés en parallèle)*

La figure 8, page 70, montre le schéma simplifié d'un circuit d'injection de courant comportant un circuit de tension connecté en parallèle sur le disjoncteur en essai.

Après la connexion du circuit de tension, peu de temps avant le zéro du courant de court-circuit à fréquence industrielle, le courant oscillant à haute fréquence i_h est superposé au courant de court-circuit à fréquence industrielle i avec la même polarité, de manière à fournir le courant résultant d'essai dans le disjoncteur en essai. Après que le courant dans le disjoncteur auxiliaire a cessé de circuler, le disjoncteur en essai est connecté sur la seule source de tension qui fournit également la tension transitoire de rétablissement aux bornes du disjoncteur en essai après l'interruption du courant.

La figure 9, page 72, montre les différentes formes d'onde du courant apparaissant dans le disjoncteur en essai lorsqu'on fait varier l'instant de l'injection de courant. Deux points de rebroussement typiques existent sur la trace du courant d'essai résultant. Ces points de rebroussement indiquent respectivement le début de l'injection de courant dans le disjoncteur en essai et l'interruption du courant de court-circuit à fréquence industrielle dans le disjoncteur auxiliaire. La forme d'onde de la tension transitoire de rétablissement peut être réglée en faisant varier C_h en même temps que des composants additionnels non représentés sur la figure 8 en vue de satisfaire aux prescriptions de la Publication 56 de la CEI (troisième édition).

The difference between network conditions and a direct test circuit lies in the structure of the impedances: in a network, the impedances are more distributed than in a direct test circuit where more lumped impedances are found.

A direct test circuit capable of applying the specified stresses to a circuit-breaker can be replaced by synthetic test schemas employing compound circuits, e.g. the power-frequency current circuit supplying at least the major portion of the current stress, and the voltage circuit supplying at least the major portion of the voltage stress.

Usually the current is obtained from test-alternators or from a supply system, and the voltage from a charged capacitor. Provided that the specified conditions are maintained, other sources can be used, such as an oscillating circuit to supply the current, or a high-voltage generator to supply the voltage.

In the power-frequency current circuit, an auxiliary circuit-breaker is connected in series with the test circuit-breaker. The superposition of the currents or the voltages is obtained by switching in the voltage circuit either before or after current-zero by means of a suitable control circuit. The particular instant selected for the switching in of the voltage circuit depends on whether the current or the voltage injection principle is to be employed.

5.1 *Current injection*

In a synthetic test schema using current injection, the superposition of the currents takes place shortly before the zero of the power-frequency short-circuit current. A current of smaller amplitude but higher frequency, derived from the voltage circuit, is superimposed either in the test circuit-breaker or in the auxiliary circuit-breaker. The instant of switching in this injected current is selected by means of a current-dependent control circuit. This instant should be such that the character of the resulting current wave in the test circuit-breaker corresponds closely to that of the current in an equivalent direct circuit prior to the current-zero during the period of significant change of arc-voltage.

In this way, the circuit-breaker under test is automatically connected into the voltage circuit after the interruption of the current in the auxiliary circuit-breaker, so there will be no delay between the current stress and the application of the voltage stress.

1) *Current injection schema with the voltage circuit in parallel with the test circuit-breaker (parallel connected circuits)*

Figure 8, page 71, shows the simplified circuit diagram of a current injection schema with the voltage circuit connected in parallel with the test circuit-breaker.

After switching in the voltage circuit, shortly before the zero of the power-frequency short-circuit current, the high-frequency oscillatory current i_h is superimposed on the power-frequency short-circuit current i , with the same polarity to give a resultant test current in the test circuit-breaker. After the current in the auxiliary circuit-breaker has ceased to flow, the test circuit-breaker is connected only to the voltage circuit, which circuit also provides the transient recovery-voltage across the test circuit-breaker after the interruption of the current.

Figure 9, page 73, shows the different current wave-forms occurring in the test circuit-breaker when the timing of the current injection is varied. Typical in the trace of the resulting test current are the two points of inflection which respectively indicate the start of the current injection in the test circuit-breaker and the interruption of the power-frequency short-circuit current in the auxiliary circuit-breaker. The wave-shape of the transient recovery-voltage can be adjusted by varying C_h in conjunction with additional components — not shown in Figure 8, to obtain compliance with the requirements of IEC Publication 56 (third edition).

2) *Schéma d'injection de courant comportant un circuit de tension en parallèle sur le disjoncteur auxiliaire (circuits connectés en série)*

La figure 10, page 74, montre le schéma simplifié d'un circuit d'injection de courant comportant un circuit de tension connecté en parallèle sur le disjoncteur auxiliaire.

Après la connexion du circuit de tension, peu de temps avant le zéro du courant de court-circuit à fréquence industrielle, le courant oscillant à haute fréquence i_h est superposé au courant de court-circuit à fréquence industrielle i avec une polarité opposée dans le disjoncteur auxiliaire.

Après que le courant résultant dans le disjoncteur auxiliaire a cessé de circuler, le courant oscillant est commuté vers le disjoncteur en essai et vers le circuit de courant à fréquence industrielle. Le disjoncteur en essai fait maintenant partie d'un circuit composé du circuit de courant à fréquence industrielle et du circuit de tension, tous deux connectés en série. Après l'extinction du courant résultant dans le disjoncteur en essai, la tension transitoire de rétablissement est fournie à la fois par le circuit de tension et par le circuit de courant à fréquence industrielle.

La figure 11, page 76, montre le courant dans le disjoncteur en essai et dans le disjoncteur auxiliaire pour différents moments d'injection. Un seul point de rebroussement typique existe sur la forme du courant d'essai résultant, ce qui correspond à la coupure du disjoncteur auxiliaire.

Les tensions des deux sources sont superposées pour produire la tension transitoire de rétablissement dont la forme d'onde peut être ajustée en faisant varier C_h et C_l en même temps que des composants non représentés sur la figure 10, en vue de satisfaire aux prescriptions de la Publication 56 de la CEI.

5.2 *Injection de tension*

Dans un schéma d'essai synthétique par injection de tension, le circuit de courant à fréquence industrielle fournit la totalité du courant de court-circuit pour le disjoncteur en essai et, après le zéro de courant, il fournit aussi la première partie de la tension transitoire de rétablissement. Par des choix convenables de sa tension et de sa fréquence propre, le circuit de courant à fréquence industrielle peut être réglé de telle sorte que la forme caractéristique du courant dans le disjoncteur en essai, aux abords du zéro de courant, corresponde exactement au courant dans un circuit d'essai direct équivalent. De plus, on fera correspondre exactement la première partie de la tension transitoire de rétablissement aux valeurs spécifiées. Aux abords de la première crête de la tension transitoire de rétablissement du circuit de courant à fréquence industrielle, le circuit de tension est connecté à l'aide d'un circuit de commande asservi à la tension de telle sorte que la tension transitoire de rétablissement spécifiée continue à s'exercer et de telle façon qu'il n'existe pas de délai entre la contrainte de courant et la contrainte de tension.

1) *Schéma d'injection de tension comportant un circuit de tension en parallèle sur le disjoncteur en essai (circuits connectés en parallèle)*

La figure 12, page 78, montre le schéma simplifié d'un circuit d'injection de tension comportant un circuit de tension connecté en parallèle sur le disjoncteur en essai. Le circuit de courant à fréquence industrielle fournit en totalité la contrainte du courant de court-circuit. Des condensateurs de valeur convenable sont connectés en parallèle avec le disjoncteur auxiliaire et avec le disjoncteur en essai.

Après le zéro du courant de court-circuit à fréquence industrielle, ces condensateurs transmettent la tension transitoire de rétablissement du circuit de courant à fréquence industrielle jusqu'au disjoncteur en essai et transmettent également l'énergie nécessaire pour le courant post-arc. Les condensateurs parallèles peuvent être répartis entre le disjoncteur auxiliaire et le disjoncteur en essai de telle sorte qu'une importante partie de la tension apparaisse aux bornes du disjoncteur en essai. Après le temps correspondant à la première crête de cette tension transitoire, le circuit de tension est enclenché; la contrainte de tension continue ainsi à s'exercer sur le disjoncteur en essai.

2) *Current injection schema with the voltage circuit in parallel with the auxiliary circuit-breaker (series connected circuits)*

Figure 10, page 75, shows the simplified circuit diagram of a current injection schema with the voltage circuit connected in parallel with the auxiliary circuit-breaker.

After switching in the voltage circuit, shortly before the zero of the power-frequency short-circuit current, the high-frequency oscillatory current i_h is superimposed, with opposing polarity, on the power-frequency short-circuit current i , in the auxiliary circuit-breaker.

After the resulting current in the auxiliary circuit-breaker has ceased to flow, the oscillatory current commutates into the test circuit-breaker and the power-frequency current circuit. The test circuit-breaker is now part of a circuit which comprises the series-connected power-frequency current circuit and the voltage circuit. After the extinction of the resulting current in the test circuit-breaker, the transient recovery-voltage is supplied both by the voltage circuit and the power-frequency current circuit.

Figure 11, page 77, shows the current in the test circuit-breaker and the auxiliary circuit-breaker with various timings of the current injection. Typical in the trace of the resulting test current is the single point of inflection, which corresponds with the interruption in the auxiliary circuit-breaker.

The voltages from both sources are superimposed to produce the transient recovery-voltage, the wave-shape of which can be adjusted by varying C_h and C_1 in conjunction with additional components, not shown in Figure 10, to obtain compliance with the requirements of IEC Publication 56.

5.2

Voltage injection

In a synthetic test schema using voltage injection, the power-frequency current circuit provides the entire short-circuit current for the test circuit-breaker and also, after current-zero the first part of the transient recovery-voltage. By suitable choices of its voltage and natural frequency, the power-frequency current circuit can be adjusted in such a way that the character of the current in the test circuit-breaker around current zero will correspond closely to the current in an equivalent direct test circuit. Furthermore, the first part of the transient recovery-voltage will be made to correspond closely to the specified values. About the time of the first peak of the transient recovery-voltage of the power-frequency current circuit, the voltage circuit is switched in by means of a voltage dependent control circuit in such a way that the specified transient recovery-voltage is continued and so that there will be no delay between the current stress and the voltage stress.

1) *Voltage injection schema with the voltage circuit in parallel with the test circuit-breaker (parallel connected circuits)*

Figure 12, page 79, shows the simplified circuit diagram of a voltage injection schema with the voltage circuit connected in parallel with the test circuit-breaker. The power-frequency current circuit supplies the entire short-circuit current stress. Capacitors of appropriate value are connected in parallel with the auxiliary circuit-breaker and the test circuit-breaker.

After the current-zero of the power-frequency short-circuit current, these capacitors transmit the transient recovery-voltage of the power-frequency current circuit to the test circuit-breaker and pass the necessary energy for the post-arc-current. The parallel capacitances can be so divided between the auxiliary circuit-breaker and the test circuit-breaker that a large portion of the voltage appears at the terminals of the test circuit-breaker. About the time of the first peak of this transient voltage, the voltage circuit will be switched in, thus continuing the voltage stressing of the test circuit-breaker.

La figure 13a, page 80, montre le courant dans le disjoncteur en essai et les formes caractéristiques des tensions appliquées au disjoncteur auxiliaire et au disjoncteur en essai. La tension appliquée au disjoncteur auxiliaire change de polarité, puisque la différence entre la tension du circuit de courant à fréquence industrielle et la tension aux bornes du disjoncteur en essai apparaît à ses bornes.

Les tensions des deux sources sont superposées pour produire la tension transitoire de rétablissement appliquée au disjoncteur. La forme d'onde de cette tension peut être ajustée en faisant varier C_h , C_a et C_1 en même temps que des composants additionnels, non représentés sur la figure 12, page 78, en vue de satisfaire aux prescriptions de la Publication 56 de la CEI.

2) *Schéma d'injection de tension comportant un circuit de tension en parallèle sur le disjoncteur auxiliaire (circuits connectés en série)*

La figure 14, page 82, montre le schéma simplifié d'un circuit d'injection de tension comportant un circuit de tension connecté en parallèle sur le disjoncteur auxiliaire. Le circuit de courant à fréquence industrielle fournit la totalité de la contrainte du courant de court-circuit. Un condensateur de valeur convenable est connecté en parallèle sur le disjoncteur auxiliaire. Après le zéro du courant de court-circuit à fréquence industrielle, ce condensateur transmet la totalité de la tension transitoire de rétablissement du circuit de courant à fréquence industrielle jusqu'au disjoncteur en essai et transmet aussi l'énergie nécessaire pour le courant post-arc.

Au moment de la première crête de cette tension transitoire, le circuit de tension sera connecté. A partir de cet instant, les tensions transitoires de rétablissement des deux circuits s'additionneront pour donner la tension transitoire de rétablissement appliquée au disjoncteur en essai.

La figure 13b, page 80, montre le courant dans le disjoncteur en essai et la forme caractéristique des tensions appliquées au disjoncteur auxiliaire et au disjoncteur en essai. Le disjoncteur auxiliaire est contraint uniquement par la tension du circuit de tension. Les tensions des deux sources sont superposées pour produire la tension transitoire de rétablissement appliquée au disjoncteur en essai. La forme d'onde de cette tension peut être réglée en faisant varier C_h et C_1 en même temps que des composants additionnels, non représentés sur la figure 14, en vue de satisfaire aux prescriptions de la Publication 56 de la CEI.

6. **Equivalence entre les circuits d'essais synthétiques et les circuits d'essais directs**

6.1 *Principes*

Quand on examine si une procédure d'essai synthétique proposée est une variante satisfaisante d'un essai direct équivalent, il faut contrôler soigneusement différents détails.

1) Pour obtenir l'essai correct d'un disjoncteur, soit par des essais directs soit par des essais synthétiques, il est nécessaire d'obtenir d'une façon aussi étroite que possible la même valeur instantanée du courant d'arc que celle obtenue en service.

a) En essai synthétique, l'énergie d'arc devrait être la même qu'en essai direct.

L'énergie d'arc dégagée pendant le temps d'arc dépend de la tension d'arc et du courant. Le courant devra donc avoir une forme correcte définie par l'amplitude et la durée d'une alternance.

Pendant le déroulement d'un essai synthétique, il est nécessaire de vérifier que la combinaison des tensions d'arc des disjoncteurs en essai et auxiliaire ne réduise pas l'amplitude et la durée de la dernière alternance d'arc d'une quantité supérieure à celle spécifiée dans le paragraphe 8.2.

Figure 13a, page 81, shows the current in the test circuit-breaker and the character of the voltages across the auxiliary circuit-breaker and test circuit-breaker. The voltage across the auxiliary circuit-breaker changes polarity, since the difference between the voltage of the power-frequency current circuit and the voltage across the test circuit-breaker appears at its terminals.

The voltages from both sources are superimposed to produce the transient recovery-voltage applied to the circuit-breaker. The wave-shape of this voltage can be adjusted by varying C_h , C_a and C_1 in conjunction with additional components — not shown in Figure 12, page 79, to obtain compliance with the requirements of IEC Publication 56.

2) *Voltage injection schema with the voltage circuit in parallel with the auxiliary circuit-breaker (series connected circuits)*

Figure 14, page 83, shows the simplified circuit diagram of a voltage injection schema with the voltage circuit connected in parallel with the auxiliary circuit-breaker. The power-frequency current circuit supplies the entire short-circuit current stress. A capacitor of suitable value is connected in parallel with the auxiliary circuit-breaker. After the current-zero of the power-frequency short-circuit current, this capacitor transmits the entire transient recovery-voltage of the power-frequency current circuit to the test circuit-breaker, passing the necessary energy for the post-arc current.

About the time of the first peak of this transient voltage, the voltage circuit will be switched in and from this moment onwards the transient recovery-voltages of both circuits are added together to form the transient recovery-voltage across the test circuit-breaker.

Figure 13b, page 81, shows the current in the test circuit-breaker and the character of the voltages across the auxiliary circuit-breaker and the test circuit-breaker. The auxiliary circuit-breaker is stressed only by the voltage of the voltage circuit. Both components of the voltages across the test circuit-breaker are superimposed to produce the transient recovery-voltage, the wave-shape of which can be adjusted by varying C_h and C_1 in conjunction with additional components — not shown in Figure 14 — to obtain compliance with the requirements of IEC Publication 56.

6. Equivalence of synthetic test circuits and direct test circuits

6.1 Principles

When considering whether a proposed synthetic test procedure is a satisfactory alternative to an equivalent direct test, there are several aspects which require to be checked carefully.

- 1) To test a circuit-breaker correctly, either by direct or by synthetic means, it is necessary to obtain as closely as possible the same instantaneous value of arc-current as in service.

- a) For the synthetic test, the arc-energy should be the same as for a direct test.

The arc-energy released during the arcing time is dependent upon arc-voltage and current. The current, therefore, shall have the correct shape defined by its amplitude and loop duration.

During synthetic testing, it is necessary to check that the combined arc-voltages of the test and auxiliary circuit-breakers do not reduce the amplitude and duration of the last loop of arcing by more than that indicated in Sub-clause 8.2.

L'écart entre l'énergie d'arc en essai synthétique et l'énergie d'arc en essai direct équivalent devra être pris aussi faible que possible, par exemple en utilisant des méthodes convenables comme indiqué dans le paragraphe 8.2.5.

- b) Pendant un essai direct, la tension d'arc change de façon significative pendant que le courant tend vers zéro. Cette croissance de la tension entraîne une déformation de l'onde de courant par rapport à sa caractéristique présumée. Cette déformation se manifeste par une variation du di/dt du courant.

En principe, cette même variation du di/dt doit être obtenue dans le circuit d'essai synthétique.

Cette condition ne serait pas à démontrer si, dans le circuit d'essai synthétique, pendant la période du zéro de courant, la configuration du circuit, les paramètres et la tension étaient identiques à ceux existant dans l'essai direct.

Toutefois, cette concordance rigoureuse n'est pas en général possible, et il faut donc choisir la configuration, les paramètres et la tension des circuits d'essais synthétiques par injection de courant ou de tension de telle sorte que l'interaction entre l'arc et le circuit soit suffisamment proche de celle qui existe dans l'essai direct.

Comme il n'est pas possible de démontrer la condition ci-dessus, par exemple, en mesurant la variation du di/dt sans disposer d'une plateforme d'essai direct, capable de fournir une puissance suffisante pour effectuer au moins un essai par élément séparé, il est nécessaire de montrer cette concordance rigoureuse en se référant à l'interaction du disjoncteur avec les paramètres du circuit synthétique.

- 2) Pour simuler les caractéristiques d'un essai direct, il est nécessaire que la tension transitoire de rétablissement et la tension de rétablissement à fréquence industrielle du circuit synthétique soient équivalentes.
- 3) Les résultats d'une série d'essais de comparaison effectués avec succès sur un certain type de disjoncteur constituent une variante à l'étude de l'interaction entre le disjoncteur et le circuit d'essai synthétique. De tels essais, qui comparent le comportement du disjoncteur lors d'essais sur des circuits synthétiques et directs, doivent tenir compte des lois du comportement statistique et démontrer que les contraintes de courant et de tension, appliquées respectivement par les deux circuits et dans le cadre des tolérances admises, ont les mêmes effets. On doit faire particulièrement attention à l'extrapolation quand on utilise le schéma synthétique en dehors du domaine des essais de comparaison.

Note. — Pour l'instant, aucune limite précise n'a pu être définie pour le domaine de validité prouvé de chaque schéma, par exemple pour les valeurs minimales et maximales des fréquences des TTR. Toutefois, la conformité avec les conditions exprimées à l'article 6 sera telle que les circuits d'essais mentionnés à l'article 5 fourniront un moyen satisfaisant pour essayer des disjoncteurs dans un vaste domaine d'applicabilité.

6.2 Schéma d'injection de courant

Pour les circuits d'essai synthétique utilisant l'injection de courant, l'équivalence peut être démontrée à partir des paramètres du circuit d'essai comme suit:

- 6.2.1 La valeur choisie pour la fréquence f_h du courant injecté i_h doit être comprise entre certaines limites dépendant aussi des caractéristiques de l'arc du disjoncteur. Il est nécessaire que la transition entre le courant à fréquence industrielle et le courant injecté soit terminée avant le début de la période du changement significatif de la tension d'arc. Une transition satisfaisante sera obtenue si l'instant d'injection du courant repéré par rapport au zéro du courant à fréquence industrielle est tel que le disjoncteur auxiliaire ait interrompu avant qu'un changement significatif de la tension d'arc du disjoncteur en essai ne se soit produit.

In a synthetic test, the deviation of the arc-energy from that of an equivalent direct test should be kept as small as possible, e.g. by suitable methods of compensation as outlined in Sub-clause 8.2.5.

- b) During direct testing, the arc-voltage changes significantly as the current approaches zero and causes distortion of the current wave-form from its prospective characteristic. This distortion manifests itself by a change in the di/dt of the current.

In principle, this same change in the di/dt shall be obtained in the synthetic test circuit.

It would not be necessary to demonstrate this if, in the synthetic test circuit, for the current-zero period, the circuit configuration, parameters and voltage were identical to those of the direct test.

However, such detailed agreement is not possible in general and therefore the configuration, parameters and voltage of synthetic test circuits using current or voltage injection must be chosen in such a way that the interaction between arc and circuit is sufficiently close to that of the direct test.

As it is not possible to demonstrate this, e.g. by measuring the change in di/dt , without a direct test plant capable of giving sufficient power for at least a unit test, it is necessary to show this strict conformity by reference to the interaction of the circuit-breaker with the synthetic circuit parameters.

- 2) To simulate the direct-test characteristics, it is necessary for the transient recovery-voltage and the power-frequency recovery-voltage of the synthetic circuit to be equivalent.
- 3) The results of a successful series of comparison tests, performed on a particular type of circuit-breaker, are an alternative to studying the interaction between the circuit-breaker and the synthetic testing circuit. Such tests, comparing the behaviour of the circuit-breaker when tested in synthetic and direct test circuits, must take the laws of statistical behaviour into account and demonstrate that the current and voltage stresses applied respectively by the two circuits, within accepted tolerances, have similar effects. When using the synthetic schema beyond the range of the comparison tests, particular attention must be paid to the effects of extrapolation.

Note. — For the time being, no accurate limits can be defined for the field of proved validity of different schemas, e.g. for the minimum or maximum frequency of the TRV. However, compliance with the conditions stated in Clause 6 will make the test circuits mentioned in Clause 5 a satisfactory means of circuit-breaker testing in a wide range of applicability.

6.2 *Current injection schema*

For synthetic test circuits using current injection, their equivalence can be demonstrated from the test circuit parameters as follows:

- 6.2.1 The value chosen for the frequency f_h of the injected current i_h must be within certain limits depending also upon the characteristics of the circuit-breaker arc. It is necessary that the transition from the power-frequency current to the injected current is completed before the start of the period of significant change of arc-voltage. A satisfactory transition is achieved if the timing of the current injection, relative to the power-frequency current-zero, is such that the auxiliary circuit-breaker has cleared before there is a significant change of test circuit-breaker arc-voltage.

Ainsi, quand le courant dans le disjoncteur en essai arrivera à la période du zéro de courant, l'arc dans le disjoncteur auxiliaire aura été interrompu. De cette façon, l'arc dans le disjoncteur en essai sera alimenté uniquement par la source de tension ou encore par la source de tension en série avec la source à fréquence industrielle et ceci à la fois en courant et en tension.

- 6.2.2 Il est aussi nécessaire que la pente du courant injecté présumé i_h , aux abords de son zéro de courant soit la même que celle du courant de court-circuit présumé i_p pour un essai direct équivalent. On aura :

$$\frac{di_h}{dt} = \frac{di_p}{dt} \text{ dans le cas où } i \rightarrow 0$$

La pente du courant dépend aussi de l'asymétrie de l'onde de courant pendant l'arc. La pente maximale est donnée par un courant symétrique sans décrement. Elle varie peu à l'intérieur de la tolérance 0% - 20% de la composante apériodique. Quand le pourcentage de composante apériodique augmente, la pente du courant au zéro de courant décroît. Pour corriger cet effet lors des essais asymétriques, la pente du courant injecté présumé au zéro de courant peut être réduite à une valeur qui ne sera pas inférieure à celle correspondante au courant présumé lors de l'essai direct équivalent.

- 6.2.3 Il est recommandé que les caractéristiques des éléments du circuit déterminant la TTR du circuit d'injection soient semblables à celles des éléments du circuit correspondants dans un circuit d'essai direct équivalent. C'est-à-dire qu'il est recommandé que le condensateur C_h ait, dans le schéma simplifié du circuit de la figure 8, page 70, la même valeur que le condensateur C de la figure 3, page 66.

Toutefois, il est permis d'ajuster, dans une certaine mesure, les valeurs de l'inductance du circuit de tension L_h et de la tension du circuit d'injection U_h (voir paragraphe 11.2).

- 6.2.4 Les conditions ci-dessus étant remplies, le fonctionnement du disjoncteur pendant la période du zéro de courant sera, en principe, le même en essai synthétique et en essai direct.

- 6.2.5 Pourvu qu'on puisse démontrer (après considération des caractéristiques du disjoncteur à essayer) que le schéma répond aux prescriptions précédentes, on peut juger le fonctionnement du disjoncteur en essai d'après les oscillogrammes de la tension transitoire de rétablissement à ses bornes et du courant qui le traverse.

La dernière partie de l'onde de la tension transitoire de rétablissement est le prolongement automatique de la tension pendant la période du zéro de courant. Il est donc seulement nécessaire de vérifier sur l'oscillogramme de la tension transitoire de rétablissement qu'aucun réallumage ne s'est produit. Un réallumage peut également être contrôlé par la mesure du courant à travers le disjoncteur essayé, puisque tout réallumage entraînera une nouvelle injection de courant provenant de la source de tension. Bien que ce courant puisse être interrompu au zéro suivant, la présence de l'alternance supplémentaire du courant injecté doit être classée comme un défaut dans l'interruption de l'arc lors de ce zéro de courant à fréquence industrielle.

6.3 Schéma d'injection de tension

Pour les schémas d'essais synthétiques utilisant l'injection de tension, l'équivalence peut être démontrée à partir des paramètres du circuit d'essai comme suit :

- 6.3.1 Avec ce schéma, le disjoncteur en essai, pendant la période du zéro de courant, fait partie du circuit de courant à fréquence industrielle dont la tension et la réactance ont des valeurs plus faibles que les valeurs correspondantes en essai direct.

Thus, when the current through the test circuit-breaker arrives at the current-zero period, the arc in the auxiliary circuit-breaker will already have been interrupted so that the arc in the test circuit-breaker is supplied, in respect of both its current and voltage, only from the voltage source, or from the voltage source in series with the power-frequency current source.

- 6.2.2 It is also necessary for the rate-of-change of the prospective injected current i_h at the time of its approach to current-zero to be the same as that of the prospective short-circuit current i_p for an equivalent direct test, thus:

$$\frac{di_h}{dt} = \frac{di_p}{dt} \text{ for the case where } i \rightarrow 0$$

The rate-of-change of current will also depend upon the asymmetry of the current wave during arcing. The maximum rate-of-change is given by a symmetrical current without a decrement, there being only a small change over the allowable range of 0% - 20% d.c. component. As the percentage d.c. component increases, the rate-of-change of current at current-zero decreases. To correct this during asymmetrical tests, the rate-of-change of the prospective injected current at current-zero may be reduced to a value not less than that corresponding to the prospective current for the equivalent direct test.

- 6.2.3 The value of the circuit elements for controlling the TRV of the injection circuit should be similar to the corresponding circuit elements in an equivalent direct test circuit. That is, the capacitor C_h , in the simplified circuit diagram of Figure 8, page 71, should have the same value as capacitor C in Figure 3, page 66.

However, some adjustments to the values of the voltage circuit inductance L_h , and of the voltage of the injection circuit U_h , are permissible (see Sub-clause 11.2).

- 6.2.4 Given the above conditions, the performance of the circuit-breaker in the current-zero period will, in principle, be the same in the synthetic test circuit as in a direct test.
- 6.2.5 Provided that it can be demonstrated that (having regard to the characteristics of the circuit-breaker to be tested) the above requirements have been met satisfactorily by the schema, then the performance of the circuit-breaker can be judged by the oscillograms of the transient recovery-voltage across and the current through the test circuit-breaker.

The latter part of the transient recovery-voltage wave is an automatic extension of that during the current-zero period so that it is only necessary to check from the transient recovery-voltage oscillogram that no breakdown occurs. This can also be checked by measuring the current through the test circuit-breaker, as any breakdown will produce a further current injection from the voltage source. Although this current may be cleared at its next zero, the presence of the extra loop of injected current shall be classed as a failure to interrupt the arc at this particular power-frequency current-zero.

6.3 *Voltage injection schema*

For synthetic test circuits using voltage injection, equivalence can be demonstrated from the test circuit parameters as follows:

- 6.3.1 With this schema, the test circuit-breaker, during the current-zero period, is part of the power-frequency current circuit, the voltage and reactance of which are less than the equivalent values in a direct test circuit.

6.3.2 Les éléments du circuit contrôlant la TTR du circuit de courant à fréquence industrielle, par exemple C_1 dans le diagramme simplifié de la figure 14, page 82, devront être choisis pour remplir les conditions suivantes:

- 1) La tension transitoire de rétablissement présumée du disjoncteur en essai satisfait aux exigences de la TTR pendant la période du courant post-arc;
- 2) Le courant déformant dû à l'ensemble des tensions d'arc du disjoncteur en essai et du disjoncteur auxiliaire est suffisamment proche du courant déformant existant pendant l'essai direct équivalent, et ceci pendant la période du changement significatif de la tension d'arc;
- 3) Tout courant post-arc requis peut circuler dans le disjoncteur en essai.

De plus amples renseignements sur la façon de réaliser ces objectifs sont donnés dans le paragraphe 11.3. Les conditions ci-dessus étant remplies, le fonctionnement du disjoncteur pendant la période du zéro de courant sera en principe le même dans les circuits d'essai synthétique et d'essai direct.

6.3.3 Avec ce schéma, la dernière partie de la tension transitoire de rétablissement est obtenue à partir du circuit de tension, en superposant cette tension sur la tension transitoire de rétablissement du circuit de courant à fréquence industrielle. Cette superposition doit être réglée avec précision dans le temps pour obtenir une transition sans heurt qui s'inscrive à l'intérieur des tolérances de la tension transitoire de rétablissement spécifiée et présumée.

6.3.4 Pourvu que les conditions ci-dessus aient été démontrées d'une façon satisfaisante pour le schéma en relation avec les caractéristiques du disjoncteur essayé, le fonctionnement du disjoncteur est jugé d'après l'oscillogramme de la tension de rétablissement aux bornes du disjoncteur en essai. Pour une coupure satisfaisante, cette tension ne devra pas présenter de signe de réduction appréciable et doit se maintenir sans rallumage.

SECTION DEUX — PRESCRIPTIONS SPÉCIFIQUES ET PROCÉDURE D'ESSAI

7. Conformité avec la Publication 56 de la CEI

Les essais synthétiques doivent être exécutés dans la mesure du possible sur la même base que les essais directs, comme il est spécifié dans la section cinq de la Publication 56 de la CEI.

7.1 La disposition du disjoncteur pour les essais, les conditions à remplir pour exécuter les essais sur élément, le comportement du disjoncteur pendant les essais et l'état du disjoncteur après les essais doivent se conformer aux prescriptions correspondantes des essais directs décrites dans les paragraphes 5.1, 5.3, 5.7 et 5.8 de la Publication 56-4 de la CEI.

7.2 Les prescriptions concernant le facteur de puissance et la fréquence indiquées dans les paragraphes 6.1 et 6.2 de la Publication 56-4 de la CEI doivent correspondre, lorsqu'elles sont applicables, au facteur de puissance et à la fréquence du circuit de courant à fréquence industrielle du circuit d'essais synthétiques.

7.3 On suppose que les essais synthétiques seront effectués en utilisant un circuit d'essais monophasé et que la mise à la terre du circuit d'essais satisfera d'une façon aussi proche que possible aux prescriptions des paragraphes 6.3c), d) et e) de la Publication 56-4 de la CEI. Les connexions utilisées doivent être indiquées dans le rapport d'essais.

7.4 Les courants coupés doivent, en principe, satisfaire aux prescriptions du paragraphe 7.3 de la Publication 56-4 de la CEI, les composantes apériodiques étant en accord avec le paragraphe 7.4 et l'article 9 de la Publication 56-4 de la CEI. Les tolérances et détails additionnels à adopter pour les essais synthétiques sont indiqués dans le paragraphe 8.2 et dans l'annexe A de ce rapport.

6.3.2 The circuit elements for the control of the TRV of the power-frequency current circuit, i.e. C_1 in the simplified diagram of Figure 14, page 83, should be chosen in such a way that:

- 1) The prospective transient recovery-voltage of the test circuit-breaker satisfies the specified TRV requirements during the period of post-arc current;
- 2) The distortion current due to the combined arc-voltages of the test circuit-breaker and the auxiliary circuit-breaker is sufficiently close to that of the equivalent direct test during the period of significant change of arc-voltage; and
- 3) Any required post-arc current can pass to the test circuit-breaker.

Further information on how these objectives can be achieved is outlined in Sub-clause 11.3. Given the above conditions, the performance of the circuit-breaker in the current-zero period will, in principle, be the same in the synthetic test circuit as in a direct test.

6.3.3 With this schema, the later portion of the transient recovery-voltage is obtained from the voltage circuit by superimposing it upon the transient recovery-voltage of the power-frequency current circuit. The superposition must be accurately timed to produce a smooth transition within the tolerances of the specified prospective transient recovery-voltage.

6.3.4 Provided that the above requirements have been satisfactorily demonstrated for the schema, taking into consideration the characteristics of the circuit-breaker being tested, the performance of the circuit-breaker is judged by the oscillogram of the transient recovery-voltage across the test circuit-breaker. For a satisfactory interruption, this voltage should show no signs of appreciable reduction and shall be withstood without breakdown.

SECTION TWO — SPECIFIC REQUIREMENTS AND TEST PROCEDURE

7. Compliance with IEC Publication 56

Synthetic testing should be conducted as far as possible on the same basis as direct testing, as specified in Section Five of IEC Publication 56.

7.1 The arrangement of the circuit-breaker for tests; the conditions to be fulfilled for carrying out unit tests; the behaviour of the circuit-breaker during tests; and the condition of the circuit-breaker after tests, shall comply with the corresponding requirements for direct testing given in the relevant Sub-clauses 5.1, 5.3, 5.7 and 5.8 of IEC Publication 56-4.

7.2 The power-factor and frequency requirements given in Sub-clauses 6.1 and 6.2 of IEC Publication 56-4 shall correspond, where applicable, to the power-factor and frequency of the power-frequency current circuit of the synthetic test circuit.

7.3 It is expected that synthetic tests will be made using a single-phase testing circuit, and the earthing of the test circuit shall comply as closely as possible with the requirements of Sub-clauses 6.3c), d) and e) of IEC Publication 56-4. The connections used shall be indicated in the test report.

7.4 The breaking currents shall, in principle, comply with the requirements of Sub-clause 7.3 of IEC Publication 56-4, the d.c. components being in accordance with Sub-clause 7.4 and Clause 9 of IEC Publication 56-4. Additional details and tolerances to be adopted for synthetic testing are given in Sub-clause 8.2 and Appendix A of this report.

- 7.5 Pour les essais directs, le paragraphe 5.9 de la Publication 56-4 de la CEI précise, pour les essais de coupure monophasés, l'instant de séparation des contacts par rapport au zéro de courant des disjoncteurs comportant de courtes durées d'arc. Des prescriptions similaires sont spécifiées pour les essais synthétiques, les détails de la procédure sont indiqués à l'article 10 et à l'annexe B de ce rapport.
- 7.6 Le début des manœuvres de coupure et de fermeture doit se conformer respectivement aux prescriptions des paragraphes 8.2 et 8.3 de la Publication 56-4 de la CEI.
- 7.7 La tension transitoire de rétablissement présumée du circuit d'essai synthétique doit satisfaire aux prescriptions du paragraphe 7.5 de la Publication 56-4 de la CEI pour les conditions du défaut aux bornes ou du paragraphe 12.4 pour les conditions du défaut en ligne.
- 7.8 La tension de rétablissement à fréquence industrielle doit, en principe, satisfaire aux prescriptions du paragraphe 7.7 de la Publication 56-4 de la CEI. En ce qui concerne le circuit d'essai synthétique, les détails additionnels et les tolérances sont indiqués dans le paragraphe 8.3 de ce rapport.
- 7.9 Les cycles d'essais à adopter pour les essais synthétiques, comme le signale le paragraphe 8.1 de ce rapport, sont basés, dans la mesure du possible, sur ceux indiqués dans la Publication 56-4 de la CEI, mais leur application dépend du type de disjoncteur et des moyens d'essais disponibles.
- Les courts intervalles de temps spécifiés entre les manœuvres (c'est-à-dire 0,3 s et 15 s), des séquences de manœuvres nominales suivant l'article 11 de la Publication 56-2 de la CEI: Disjoncteurs à courant alternatif à haute tension, Deuxième partie: Caractéristiques nominales (troisième édition), ne peuvent pas être couramment adoptés pendant les essais synthétiques. Des circuits convenables permettant d'effectuer des essais synthétiques de fermeture en accord avec les paragraphes 7.1 et 7.2 de la Publication 56-4 de la CEI, ou des essais de fermeture-ouverture, sont encore à l'étude. A l'heure actuelle, il n'est, par conséquent, pas encore possible de réaliser, de façon synthétique, les cycles d'essais spécifiés dans la Publication 56-4 de la CEI. Les cycles d'essais à adopter pour les essais synthétiques sont indiqués dans le paragraphe 8.1 de ce rapport.

8. Prescriptions générales pour la procédure d'essai

8.1 Cycles d'essais pour les essais synthétiques

8.1.1 Cycles d'essais Nos 1, 2, 3 et 5

Pour les cycles d'essais Nos 1, 2, 3 et 5, seuls les essais de coupure sont spécifiés dans l'article 9 de la Publication 56-4 de la CEI. Par conséquent, en fonction des séquences de manœuvres nominales adoptées à l'article 11 de la Publication 56-2 de la CEI, deux ou trois essais de coupure doivent être effectués durant un essai synthétique pour chacun des cycles d'essais No 1, 2, 3 et 5. Toutefois, étant donné les caractéristiques des circuits d'essai synthétique, des intervalles de temps de 0,3 s ou 15 s ne peuvent pas habituellement être obtenus.

Par conséquent, pour chacun des cycles d'essais Nos 1, 2, 3 et 5, le cycle suivant d'essais synthétiques doit être effectué:

- i) Pour la séquence de manœuvres nominale suivant l'article 11a) de la Publication 56-2 de la CEI:

O — t' — O — t' — O . . . t' = 3 min

pour tous les disjoncteurs, qu'ils soient ou non prévus pour la refermeture automatique.

- 7.5 For direct testing, IEC Publication 56-4, Sub-clause 5.9, specifies for single-phase breaking tests the timing of the contact separation control relative to the current zero for circuit-breakers having short arcing times. Similar requirements are specified for synthetic tests; details of the procedure are given in Clause 10 and Appendix B of this report.
- 7.6 The initiation of the breaking and making operations shall comply with the requirements of Sub-clauses 8.2 and 8.3 respectively of IEC Publication 56-4.
- 7.7 The prospective transient recovery-voltage of the synthetic test circuit shall comply with the requirements of Sub-clause 7.5 of IEC Publication 56-4 for terminal fault conditions or of Sub-clause 12.4 for short-line fault conditions.
- 7.8 The power-frequency recovery-voltage shall in principle comply with the requirements of Sub-clause 7.7 of IEC Publication 56-4. For the synthetic test circuits, additional details and tolerances are given in Sub-clause 8.3 of this report.
- 7.9 The test-duties to be adopted for synthetic testing as outlined in Sub-clause 8.1 of this report are based as closely as possible on those given in IEC Publication 56-4, but their applicability will depend on the type of circuit-breaker and the testing facilities available.

The short specified time intervals between operations (i.e. 0.3 s and 15 s) of the rated operating sequences according to Clause 11 of IEC Publication 56-2, High-voltage Alternating-current Circuit-breakers, Part 2: Rating (third edition), cannot usually be adopted during synthetic testing. Suitable circuits for performing synthetic making tests in compliance with Sub-clauses 7.1 and 7.2 of IEC Publication 56-4, or make-break tests, are under consideration. For the time being, it is therefore not possible to perform synthetically the test-duties specified in IEC Publication 56. The test-duties to be adopted for synthetic testing are outlined in Sub-clause 8.1 of this report.

8. General requirements for test procedure

8.1 Test-duties for synthetic testing

8.1.1 Test-duties Nos. 1, 2, 3 and 5

For Test-duties Nos. 1, 2, 3 and 5, breaking tests only are specified in Clause 9 of IEC Publication 56-4. Therefore, dependent on the adopted rated operating sequence according to Clause 11 of IEC Publication 56-2, during synthetic testing two or three breaking tests must be made for each of the Test-duties Nos. 1, 2, 3 and 5. However, due to the characteristics of synthetic test circuits, time intervals of 0.3 s or 15 s cannot usually be achieved.

Therefore for each of the Test-duties Nos. 1, 2, 3 and 5 the following synthetic test-duty shall be made:

- i) For the rated operating sequence according to Clause 11a) of IEC Publication 56-2:

$$O - t' - O - t' - O \quad t' = 3 \text{ min}$$

for all circuit-breaker, whether or not intended for auto-reclosing.

ii) Pour la séquence de manœuvres nominale suivant l'article 11b) de la Publication 56-2 de la CEI:

$$O - t' - O \quad t' = 3 \text{ min}$$

pour les disjoncteurs non prévus pour la refermeture automatique rapide.

8.1.2 Cycle d'essais N° 4

Dans le paragraphe 9.4 de la Publication 56-4 de la CEI, la séquence de manœuvres nominale suivant l'article 11 de la Publication 56-2 de la CEI est spécifiée pour le cycle d'essais N° 4. Pour l'essai monophasé, les essais de fermeture et de coupure peuvent être effectués séparément comme les cycles d'essais N°s 4a et 4b, où soit le cycle d'essais N° 4a, soit le cycle N° 4b doit être une séquence de manœuvres nominale complète. Toutefois, comme il a été déjà établi, les intervalles de temps de 0,3 s et de 15 s, spécifiés dans la Publication 56 de la CEI pour les essais directs, ne peuvent pas habituellement être adoptés pendant un essai synthétique. En outre, les procédures pour effectuer des essais synthétiques de fermeture ou des essais de fermeture-ouverture à la pleine tension appliquée, conformément aux paragraphes 7.1 et 7.2 de la Publication 56-4 de la CEI, sont encore à l'étude. Toutefois, on suppose que, à l'heure actuelle, la séquence d'essais N° 4b sera la seule utilisée en essai synthétique; elle doit être une séquence de manœuvres nominale complète avec un courant d'établissement et de coupure, une tension transitoire de rétablissement et une tension de rétablissement à fréquence industrielle spécifiées, mais la tension appliquée sera plus faible que celle spécifiée pour le cycle d'essais N° 4, car elle sera égale à la tension du circuit de courant à fréquence industrielle.

Ce cycle d'essais synthétiques N° 4b ne démontre pas complètement la réussite du disjoncteur en essai pendant les manœuvres de fermeture-ouverture ou de refermeture automatique rapide.

Toutefois, l'importance de la pleine tension appliquée utilisée pour les essais de fermeture-coupure ou de refermeture automatique dépend énormément des caractéristiques du disjoncteur.

Donc, un cycle d'essais préliminaire N° 4a avec application de la pleine tension et le courant maximal disponible doit être effectué. Ce cycle d'essais a pour but de montrer si le temps de préarc du disjoncteur en essai à la pleine tension appliquée ne s'écarte pas d'une façon appréciable du temps obtenu pendant le cycle d'essais N° 4b à une tension appliquée réduite (voir iii) ci-dessous).

A condition qu'il n'y ait pas de déviation significative, les cycles d'essais suivants doivent être effectués:

i) Pour la séquence de manœuvres nominale suivant l'article 11a) de la Publication 56-2 de la CEI:

$$a) \quad O - t' - C_c O - t' - C_c O \\ C - t' - C$$

(4b) plus

$$(4a) \quad t' = 3 \text{ min}$$

pour les disjoncteurs non prévus pour la refermeture automatique rapide ou

$$b) \quad O_c - t - C_c O - t' - C_c O - t' - O \\ C - t' - C$$

(4b) plus

$$(4a) \quad t = 0,3 \text{ s (temps mort)} \\ t' = 3 \text{ min}$$

pour les disjoncteurs prévus pour la refermeture automatique rapide,

où:

O = coupure dans un circuit synthétique, c'est-à-dire avec le plein courant coupé spécifié, la pleine tension transitoire de rétablissement et la pleine tension de rétablissement à fréquence industrielle spécifiées,

ii) For the rated operating sequence according to Clause 11b) of IEC Publication 56-2:

$$O - t' - O \quad t' = 3 \text{ min}$$

for circuit-breakers not intended for rapid auto-reclosing.

8.1.2 Test-duty No. 4

In Sub-clause 9.4 of IEC Publication 56-4, the rated operating sequence according to Clause 11 of IEC Publication 56-2 is specified for Test-duty No. 4. For single-phase testing, the making and breaking tests may be made separately as Test-duties Nos. 4a and 4b, where either Test-duty No. 4a or Test-duty No. 4b shall be a complete rated operating sequence. However, as already stated, the time intervals of 0.3 s and 15 s specified for direct tests cannot usually be achieved during synthetic testing. Furthermore, procedures for carrying out synthetic making tests, or make-break tests at full applied voltage in accordance with Sub-clauses 7.1 and 7.2 of IEC Publication 56-4 are under consideration. It is therefore expected, that for the time being, Test-duty No. 4b only will be used in synthetic testing. This Test-duty No. 4b shall be a full rated operating sequence with making and breaking current, transient and power-frequency recovery-voltages as specified, but the applied voltage will be lower than that specified for Test-duty No. 4 since this will be the driving voltage of the power-frequency current circuit.

This synthetic Test-duty No. 4b does not completely demonstrate the performance of the test circuit-breaker during make-break or rapid auto-reclosing operations.

However, the importance of the full applied voltage being used for make-break or rapid auto-reclosing tests depends very much upon the characteristics of the circuit-breaker.

Therefore, a preliminary Test-duty No. 4a with full applied voltage and maximum available current shall be made. This test-duty is intended to show whether or not the pre-arcing time of the test circuit-breaker at full applied voltage deviates appreciably from that measured during Test-duty No. 4b with reduced applied voltage (see *iii*) below).

Provided that there is no significant deviation, the following test-duties may be made.

i) For the rated operating sequence according to Clause 11a) of IEC Publication 56-2:

$$\begin{aligned} a) \quad O - t' - C_e O - t' - C_e O & \quad (4b) \text{ plus} \\ C - t' - C & \quad (4a) \quad t' = 3 \text{ min} \end{aligned}$$

for circuit-breakers not intended for rapid auto-reclosing, or

$$\begin{aligned} b) \quad O_e - t - C_e O - t' - C_e O - t' - O & \quad (4b) \text{ plus} \\ C - t' - C & \quad (4a) \quad t = 0.3 \text{ s (dead time)} \\ & \quad t' = 3 \text{ min} \end{aligned}$$

for circuit-breakers intended for rapid auto-reclosing,

where:

O = breaking in a synthetic circuit, i.e. with full specified breaking current, transient and power-frequency recovery-voltages,

O_c = coupure avec le plein courant coupé spécifié et avec la tension transitoire de rétablissement et la tension de rétablissement à fréquence industrielle réduites du circuit de courant à fréquence industrielle,

C = fermeture avec la pleine tension de rétablissement appliquée (voir *iii*) ci-dessous),

C_c = fermeture avec la tension appliquée réduite du circuit de courant à fréquence industrielle et avec le plein courant de fermeture comme spécifié dans le paragraphe 7.2 de la Publication 56-4 de la CEI.

Notes 1. — En remplacement de *b*), les cycles suivants peuvent être effectués sur des disjoncteurs prévus pour la refermeture automatique rapide:

$$\begin{array}{ll} O_c - t - C_c O - t' - C_c O & (4b-1) \text{ plus} \\ O - t' - C_c O - t' - C_c O & (4b-2) \text{ plus} \\ C - t' - C & (4a) \end{array}$$

2. — Il est permis de remettre en état le disjoncteur entre les cycles d'essais N°s 4b et 4a ou 4b-1, 4b-2 et 4a respectivement, conformément au paragraphe 5.8.5 de la Publication 56-4 de la CEI.

ii) Pour la séquence de manœuvres nominale suivant l'article 11b) de la Publication 56-2 de la CEI:

$$\begin{array}{ll} C_c O_c - t'' - C_c O - t' - C_c O & (4b) \text{ plus} \\ C - t'' - C & (4a) \quad t'' = 15 \text{ s} \\ & t' = 3 \text{ min} \end{array}$$

pour les disjoncteurs non prévus pour la refermeture automatique rapide. (Pour la définition des symboles, voir *i*) ci-dessus.)

Notes 1. — En remplacement, les cycles d'essais suivants peuvent être effectués:

$$\begin{array}{ll} C_c O_c - t'' - C_c O & (4b-1) \text{ plus} \\ C_c O - t' - C_c O & (4b-2) \text{ plus} \\ C - t'' - C & (4a) \end{array}$$

2. — Il est permis de remettre en état le disjoncteur entre les cycles d'essais N°s 4b et 4a ou 4b-1, 4b-2 et 4a respectivement, conformément au paragraphe 5.8.5 de la Publication 56-4 de la CEI.

iii) Le cycle d'essais N° 4a exigé dans *i*) et *ii*) ci-dessus doit montrer la conformité avec les conditions établies dans le paragraphe 8.1.2 et doit être effectué de préférence avec la pleine tension appliquée et avec le plein pouvoir de fermeture en court-circuit présumé, comme spécifié dans les paragraphes 7.1 et 7.2 de la Publication 56-4 de la CEI.

Toutefois, dans le cas où ceci n'est pas possible, même lors de l'essai d'un élément, à cause de la puissance d'essai limitée de la station d'essais, le cycle d'essais N° 4a peut être effectué avec une pleine tension appliquée spécifiée et avec le maximum de courant de fermeture disponible.

D'autres méthodes de réalisation du cycle d'essais N° 4a peuvent être appliquées, soumises à un accord entre le constructeur, la station d'essais et l'utilisateur.

iv) Dans le cas où le temps de préamorçage du disjoncteur en essai soumis à la tension réduite du circuit de courant à fréquence industrielle s'écarte de façon appréciable de celui obtenu à la pleine tension appliquée spécifiée, le cycle d'essais N° 4, réalisé conformément aux alinéas *i*) à *iii*) ci-dessus, n'est pas concluant.

Dans ce cas, la preuve de la réussite du disjoncteur en essai au cours des manœuvres de fermeture-coupure ou de refermeture automatique rapide est soumise à un accord entre le constructeur, la station d'essais et l'utilisateur, en prenant en considération les caractéristiques du disjoncteur en essai.

O_c = breaking with the full specified breaking current and with the reduced transient and power-frequency recovery-voltages of the power-frequency current circuit,

C = making with the full specified applied voltage (see *iii*) below),

C_c = making with the reduced applied voltage of the power-frequency current circuit and with full making current as specified in Sub-clause 7.2 of IEC Publication 56-4.

Notes 1. — As an alternative to *b*), the following test-duties may be made for circuit-breakers intended for rapid auto-reclosing:

$$\begin{array}{ll} O_c - t - C_c O - t' - C_c O & (4b-1) \text{ plus} \\ O - t' - C_c O - t' - C_c O & (4b-2) \text{ plus} \\ C - t' - C & (4a) \end{array}$$

2. — It is permissible to recondition the circuit-breaker in accordance with Sub-clause 5.8.5 of IEC Publication 56-4 between Test-duties Nos. 4*b* and 4*a* or 4*b*-1, 4*b*-2 and 4*a* respectively.

ii) For the rated operating sequence according to Clause 11*b*) of IEC Publication 56-2:

$$\begin{array}{ll} C_c O_c - t'' - C_c O - t' - C_c O & (4b) \text{ plus} \\ C - t'' - C & (4a) \end{array}$$

$t'' = 15 \text{ s}$
 $t' = 3 \text{ min}$

for circuit-breakers not intended for rapid auto-reclosing. (For the definition of the symbols see *i*) above.)

Notes 1. — As an alternative, the following test-duties may be made:

$$\begin{array}{ll} C_c O_c - t'' - C_c O & (4b-1) \text{ plus} \\ C_c O - t' - C_c O & (4b-2) \text{ plus} \\ C - t'' - C & (4a) \end{array}$$

2. — It is permissible to recondition the circuit-breaker in accordance with Sub-clause 5.8.5 of IEC Publication 56-4 between Test-duties Nos. 4*b* and 4*a* or 4*b*-1, 4*b*-2 and 4*a* respectively.

iii) Test-duty No. 4*a* required in *i*) and *ii*) above shall demonstrate compliance with the conditions stated in Sub-clause 8.1.2 and should therefore preferably be carried out with full applied voltage and with full prospective short-circuit making current as specified in Sub-clauses 7.1 and 7.2 of IEC Publication 56-4.

However, in cases where this is not possible, even as a unit test, due to the limited direct test power available, Test-duty No. 4*a* may be performed with full specified applied voltage and with the maximum making current available.

Other methods of performing Test-duty No. 4*a* may be adopted, subject to agreement between manufacturer, testing station and user.

iv) In the case where the pre-arcing time of the test circuit-breaker, at the reduced applied voltage of the power-frequency current circuit, deviates appreciably from that at full specified applied voltage, then Test-duty No. 4, performed according to paragraphs *i*) to *iii*) above, is not conclusive.

In these cases, the demonstration of the performance of the test circuit-breaker during make-break or rapid auto-reclosing operation is subject to agreement between manufacturer, testing station and user, giving due consideration to the characteristics of the circuit-breaker in question.

8.1.3 *Cycles d'essais pour les essais de défaut en ligne*

Les cycles d'essais à adopter pour les essais synthétiques dans les conditions de défaut en ligne doivent être les mêmes que ceux exprimés dans le paragraphe 8.1.1. De plus, on devra prendre en considération les conditions spécifiées dans le paragraphe 12.5 de la Publication 56-4 de la CEI.

8.1.4 *Instant de séparation des contacts*

Pour toutes les opérations de coupure, la commande de l'instant de séparation des contacts doit, dans toute la mesure du possible, être la même que celle exigée dans l'article 10 de ce rapport.

8.1.5 *Intervalle de temps entre les essais*

A cause du processus plus compliqué des essais synthétiques, il peut être nécessaire de dépasser les intervalles de temps de $t' = 3$ min pour la séquence de manœuvres nominale spécifiée dans les paragraphes 8.1.1 à 8.1.3 de ce rapport. L'intervalle de temps réel entre les opérations doit être indiqué dans le rapport d'essai.

8.1.6 *Répétition des essais*

Les essais synthétiques impliquent le contrôle précis du temps en de nombreux instants, aussi bien dans le circuit principal que pour des raisons d'instrumentation. De plus, la variation de tolérances admissibles peut invalider le résultat de l'essai. Il est donc permis de répéter les essais qui n'auront pas été correctement effectués. Lorsque les essais sont répétés, la remise en état du disjoncteur n'est pas permise.

8.2 *Courant coupé*

Comme il est établi dans le paragraphe 7.4, le courant coupé doit, en principe, satisfaire aux prescriptions du paragraphe 7.3 de la Publication 56-4 de la CEI. Toutefois, pour les essais synthétiques, un processus légèrement modifié de détermination du courant coupé correct s'applique, le principe général étant que lors d'un essai synthétique l'énergie d'arc doit être la même que lors d'un essai direct équivalent.

L'énergie d'arc produite pendant le temps d'arc dépend de la tension d'arc et du courant. Quand un courant est interrompu par un disjoncteur, il y a toujours une certaine distorsion du courant, c'est-à-dire une réduction de l'amplitude et de la durée de l'alternance comme il a été indiqué pour une alternance d'arc dans le paragraphe 4.3 de ce rapport. Cette distorsion dépend du rapport de la tension d'arc à la tension du circuit d'alimentation.

Dans les essais directs, on ne tient pas compte de l'influence de la tension d'arc du disjoncteur sur la réduction de l'amplitude et de la durée de l'alternance du courant (par rapport au courant présumé). Ceci est dû au fait que cette influence est propre au disjoncteur.

En essai synthétique, il y aura une distorsion plus accentuée du courant, car le rapport de la tension d'arc à la force électromotrice à fréquence industrielle est augmenté à cause de la tension réduite du circuit de courant à fréquence industrielle. De plus, les tensions d'arc des disjoncteurs auxiliaire et en essai s'additionnent.

Pour éviter une réduction inacceptable des contraintes dans l'essai synthétique, on a établi une valeur maximale admissible de l'influence en fixant des tolérances sur les deux paramètres caractéristiques de la forme du courant coupé, c'est-à-dire l'amplitude et la durée de l'alternance.

Les tolérances sur l'amplitude et la fréquence industrielle du courant présumé coupé pendant un essai synthétique, comme indiqué dans les paragraphes 7.3 et 6.2 de la Publication 56-4 de la CEI, ne doivent pas être dépassées par le courant réel à travers l'arc durant un essai synthétique. Toutefois, les conditions suivantes doivent être respectées:

8.1.3 *Test-duties for short-line fault tests*

The test-duties to be adopted for synthetic testing under short-line fault conditions shall be the same as those outlined in Sub-clause 8.1.1. In addition, the conditions specified in Sub-clause 12.5 of IEC Publication 56-4 are applicable.

8.1.4 *Timing of contact separation*

For all breaking operations, the timing of the contact separation control should be as nearly as practicable in accordance with Clause 10 of this report.

8.1.5 *Time interval between tests*

Due to the more complicated procedure of synthetic testing, it may be necessary to exceed the time intervals of $t' = 3$ min for the rated operating sequence specified in Sub-clauses 8.1.1 to 8.1.3 of this report. The actual time interval between operations shall be indicated in the test report.

8.1.6 *Invalid tests*

As synthetic testing involves accurate timing control at a number of instants, both in the main circuit and for instrumentation purposes, and variation of these outside the allowable tolerances may invalidate the test result, it is permissible to repeat tests which are not correctly made. When tests are repeated, reconditioning of the circuit-breaker is not permitted.

8.2 *Breaking-current*

As stated in Sub-clause 7.4, the breaking-current shall, in principle, comply with the requirements of Sub-clause 7.3 of IEC Publication 56-4. However, for synthetic testing, a slightly modified procedure for determining the correct breaking-current applies, the leading principle being that for the synthetic test the arc-energy should be the same as for an equivalent direct test.

The arc-energy released during the arcing time is dependent upon the arc-voltage and the current. When a current is interrupted by a circuit-breaker, there will, depending upon the ratio of the arc-voltage to the circuit voltage, always be some distortion of the current, i.e. a reduction of the amplitude and the loop duration. This distortion is outlined, for one loop of arcing, in Sub-clause 4.3 of this report.

During direct testing, the effects of the arc-voltage of the circuit-breaker in reducing the amplitude and loop duration of the current (in relation to the prospective current) are not taken into account. This is because this influence is a property of the circuit-breaker.

However, since in synthetic testing the ratio of arc-voltage to the power-frequency e.m.f. is increased, owing to the reduced voltage of the power-frequency current circuit, and to the summation of the arc-voltages of the auxiliary and test circuit-breakers, there will be a more pronounced influence on the current.

To avoid an unacceptable reduction of stresses in synthetic testing, therefore, a maximum admissible influence is stated in terms of tolerance on two characteristic values of the shape of the breaking current, i.e. amplitude and loop duration.

The tolerance on the amplitude and the power-frequency of the prospective breaking-current during direct testing, as given in Sub-clauses 7.3 and 6.2 of IEC Publication 56-4, must not be exceeded by the actual current through the arc during synthetic testing. Therefore, the following conditions shall be met:

- 8.2.1 A l'instant de la séparation des contacts, en principe, la composante périodique et la composante apériodique du courant coupé doivent être celles spécifiées pour le cycle d'essais correspondant aux articles 9 et 12 de la Publication 56-4 de la CEI.
- 8.2.2 L'amplitude de la dernière alternance du courant réel d'essai ne doit pas être moindre que la valeur déduite de la composante périodique spécifiée et, de plus, pour l'essai N° 5, moindre que la composante apériodique spécifiée du courant coupé, en admettant un décrément de 90% pour la composante périodique et, pour la composante apériodique, le décrément correspondant à celui qu'on obtiendrait dans un circuit comportant un facteur de puissance de 0,15 en retard.
- 8.2.3 La durée de l'alternance finale du courant réel d'essai ne doit pas s'écarter dans toute direction de plus de 10% de la durée de l'alternance donnée par la fréquence nominale, en prenant en compte, quand c'est justifié, l'effet de la composante apériodique avec un décrément correspondant à celui qu'on obtiendrait dans un circuit comportant un facteur de puissance de 0,15 en retard.
- 8.2.4 Quand un essai synthétique est effectué sur des disjoncteurs ayant des caractéristiques de tensions d'arc qui modifient le courant en service ou en essai direct de façon significative, l'influence de la tension d'arc sur l'amplitude du courant et la durée de la demi-onde peut être permise quand on prend en considération les tolérances indiquées dans les paragraphes 8.2.2 et 8.2.3. La procédure détaillée pour estimer ces corrections est indiquée d'une façon plus complète dans le paragraphe 11.1 et dans l'annexe A de ce rapport. Elle y est illustrée d'exemples pour calculer les tolérances.
- 8.2.5 Pour rester à l'intérieur des tolérances, on peut accepter d'augmenter le courant, soit en augmentant la tension, soit en réduisant la réactance du circuit courant à fréquence industrielle, ou en appliquant un courant comportant une composante apériodique plus forte, ou encore en utilisant une fréquence industrielle plus faible, mais les tolérances spécifiées pour la composante apériodique et la fréquence industrielle ne doivent pas être dépassées.
- 8.2.6 Si l'influence de la tension d'arc se manifeste, avant tout changement significatif de cette dernière, d'une façon prononcée sur le di/dt du courant traversant le disjoncteur en essai, il faudra alors porter toute son attention sur ce di/dt de manière que cette grandeur ne soit pas modifiée d'une façon indue comparativement à la valeur qui devrait être en conformité avec l'essai direct équivalent.
- 8.3 *Tension de rétablissement pour les défauts aux bornes*
Alors qu'en essai direct la tension transitoire de rétablissement se raccorde d'une façon continue avec la tension de rétablissement à fréquence industrielle, en essai synthétique, la tension de rétablissement est fournie par le circuit tension, soit directement, soit en série, avec le circuit de courant à fréquence industrielle. Ceci donne soit une tension continue, soit une tension mixte continue et alternative, ou une tension alternative qui, dans la plupart des cas, décroît à cause de l'énergie limitée de la source de tension. Il se peut ainsi qu'il ne soit pas possible de maintenir la tension de rétablissement pendant au moins 0,1 s comme le spécifie le paragraphe 7.7 de la Publication 56-4 de la CEI.

Donc, pendant un essai synthétique, la valeur instantanée de la tension de rétablissement, pendant une période égale au $1/8$ de période de la fréquence nominale du disjoncteur, ne doit pas être inférieure à la valeur instantanée équivalente de la tension de rétablissement à fréquence industrielle spécifiée dans le paragraphe 7.7b) de la Publication 56-4 de la CEI et qui démarre avec une valeur de crête minimale de:

$$0,95 k \frac{\sqrt{2} U}{\sqrt{3}}$$

- 8.2.1 The breaking current at the instant of contact separation shall have, in principle, an a.c. component and a d.c. component as specified for the relevant test-duty in Clauses 9 and 12 of IEC Publication 56-4.
- 8.2.2 The amplitude of the final loop of the actual test current shall not be less than the value derived from the specified a.c. component, and in addition for Test-duty No. 5 not less than the specified d.c., component of the breaking-current after allowing for decrement of the a.c. component to 90% and for decrement of the d.c. component corresponding to that which would obtain in a circuit with a power factor of 0.15 lagging.
- 8.2.3 The duration of the final loop of the actual test current shall not depart in either direction by more than 10% from the loop duration given by the rated frequency after taking into account, where this is appropriate, the effect of the specified d.c. component with a decrement corresponding to that which would obtain in a circuit with a power factor of 0.15 lagging.
- 8.2.4 When performing synthetic tests on circuit-breakers possessing arc-voltage characteristics which would significantly modify the current in service or in a direct test, the influence of the arc-voltage on the current amplitude and loop duration may be allowed for when considering the tolerances given in Sub-clauses 8.2.2 and 8.2.3.
The detailed procedure for estimating these corrections with examples for establishing the tolerances together with further information are given in Sub-clause 11.1 and Appendix A of this report.
- 8.2.5 To keep within the tolerances for the test current, it is acceptable to increase the current by increasing the voltage or reducing the reactance of the power-frequency current circuit, or to apply a current with an increased d.c. component or a reduced power-frequency. However, the specified tolerances for d.c. component and power-frequency shall not be exceeded.
- 8.2.6 If the arc-voltage, before it starts to change significantly, exerts a pronounced influence upon the di/dt of the test current, then care should be taken to ensure that such a change of di/dt is comparable with that which would occur in an equivalent direct test.
- 8.3 *Recovery-voltage for terminal faults*

Whereas in direct testing the transient recovery-voltage is continuous with the power-frequency recovery-voltage, in synthetic testing the recovery-voltage is supplied from the voltage circuit, either directly or in series with the power-frequency current circuit. This gives a d.c. voltage, or a combined a.c. and d.c. voltage, or an a.c. voltage, which in most cases decays due to the limited energy of the voltage source. It may thus not be possible to maintain the recovery-voltage for at least 0.1 s specified in Sub-clause 7.7 of IEC Publication 56-4.

Therefore, for synthetic testing the instantaneous value of the recovery-voltage during a period equal to $\frac{1}{8}$ of a cycle of the rated frequency of the circuit-breaker shall not be less than the equivalent instantaneous value of the power-frequency recovery voltage specified in Sub-clause 7.7b) of IEC Publication 56-4 which starts with a minimum peak value of:

$$0.95 k \frac{\sqrt{2} U}{\sqrt{3}}$$

où:

k = facteur de premier pôle (1,3 ou 1,5)

U = tension nominale de disjoncteur

Voir la figure 15, page 84.

Si on utilise une tension de rétablissement, continue, alternative ou alternative et continue combinée, décroissant exponentiellement, il est recommandé, en principe, de rester aussi proche que possible de $\frac{\sqrt{2} U}{\sqrt{3}}$ et de ne descendre en aucun cas en dessous de:

$$0,5 \frac{\sqrt{2} U}{\sqrt{3}} \text{ en moins de } 0,1 \text{ s.}$$

Voir la figure 15.

Si une tension continue décroissante ou une tension mixte alternative et continue impose une contrainte trop grande sur le disjoncteur, comparativement à celle due à la tension de rétablissement alternative dans le circuit direct équivalent, un circuit plus approprié peut alors être utilisé compte tenu du paragraphe 7.7b) de la Publication 56-4 de la CEI ainsi que des limites fixées ci-dessus.

8.4 Disjoncteurs équipés d'impédances en parallèle sur l'arc

Quand on applique des méthodes d'essais synthétiques sur des disjoncteurs équipés d'impédances en parallèle sur l'arc, chaque arrangement doit être considéré selon ses propres qualités; le principe à suivre est que le circuit d'essai synthétique doit avoir la tension de rétablissement transitoire présumée spécifiée dans les paragraphes 7.2 de la Publication 56-2 de la CEI et 7.5 de la Publication 56-4 de la CEI et appliquer au disjoncteur la tension de rétablissement spécifiée dans le paragraphe 8.3 de ce rapport.

Les impédances peuvent être des condensateurs et/ou des résistances combinées de différentes façons.

Pour les disjoncteurs dans lesquels une impédance en parallèle, habituellement une résistance, est utilisée pour modifier la forme de la tension transitoire de rétablissement, le circuit d'essai devra être tel que la modification de la forme de la tension transitoire de rétablissement présumée, due à l'impédance shunt, soit la même que dans l'essai direct, autant que faire se peut. Si la valeur ohmique de la résistance shunt est très faible, il peut arriver que la crête de la TTR en essai synthétique ne puisse pas atteindre la valeur qu'elle eût atteint au cours d'un essai direct par suite de l'énergie limitée disponible de la source de tension. Dans ce cas, une méthode d'essai sera choisie dans laquelle cette réduction relative de la TTR est réduite à un minimum négligeable (tolérance -5%). Toutefois, il peut ne pas être possible de remplir les exigences de la tension à fréquence industrielle du paragraphe 8.3.

Dans certains cas, des essais valables peuvent être effectués en observant certaines précautions, par exemple au moyen de l'une des méthodes suivantes:

- avec un ajustement des paramètres de la source de tension de façon qu'elle fournisse l'énergie additionnelle absorbée par la résistance;
- en enclenchant une source alternative additionnelle capable de maintenir la tension sur la résistance;
- en déconnectant la résistance en parallèle du disjoncteur en essai et en connectant une résistance en d'autres endroits appropriés du circuit d'essai (par exemple aux bornes de l'inductance du circuit de tension) afin d'obtenir une forme d'onde équivalente de la tension transitoire de rétablissement aux bornes du disjoncteur en essai; quand on emploie cette méthode,

where:

k = first pole-to-clear factor (1.3 or 1.5)

U = rated voltage of the circuit-breaker

See Figure 15, page 85.

Whether an exponentially decaying, d.c., an a.c. or a combined a.c. and d.c. recovery-voltage is used, it should, in principle, be kept as close as possible to $\frac{\sqrt{2} U}{\sqrt{3}}$ and in any case must not fall below:

$$0.5 \frac{\sqrt{2} U}{\sqrt{3}} \text{ in less than } 0.1 \text{ s.}$$

See Figure 15.

If an exponentially decaying d.c. or a combined a.c. and d.c. recovery-voltage imposes too great a stress on the circuit-breaker compared to that due to an a.c. recovery-voltage in an equivalent direct test, then a more appropriate circuit may be used taking into account Sub-clause 7.7b) of IEC Publication 56-4 and also the limits stated above.

8.4 *Circuit-breakers with impedance in parallel with the arc*

When using synthetic test methods on circuit-breakers fitted with impedances in parallel with the arc, each arrangement should be considered on its merits, the guiding principle being that the synthetic test circuit should have a prospective transient recovery-voltage as specified in Sub-clauses 7.2 of IEC Publication 56-2 and 7.5 of IEC Publication 56-4 and apply to the circuit-breaker a recovery-voltage as specified in Sub-clause 8.3 of this report.

The parallel impedances may take the form of capacitors and/or resistors in various combinations.

For those circuit-breakers where a shunt impedance, usually a resistor, is employed to modify the shape of the transient recovery-voltage, the synthetic test circuit should be such that the modified shape of the specified prospective transient recovery-voltage will be, as far as possible, the same as in an equivalent direct test. If the ohmic value of the shunt resistor is very low, it may not be possible for the actual peak TRV in a synthetic test to attain the value which it would attain in a direct test due to the limited energy available from the voltage source. In this case, a modified test method should be chosen where this relative reduction of the actual peak TRV is kept to a negligible minimum (tolerance —5%). However, it may then still not be possible to meet the recovery-voltage requirements of Sub-clause 8.3.

In some cases, valid tests may be made after observing certain precautions, e.g. by one of the following methods:

- by an adjustment of the parameters of the voltage source to provide the necessary additional energy absorbed by the resistor;
- by switching over to an additional a.c. voltage source capable of maintaining the voltage across the resistor;
- by disconnecting the test circuit-breaker shunt resistor, and connecting a resistor at other appropriate places in the test circuit (e.g. across the voltage circuit inductance) to give an equivalent transient recovery-voltage wave-form across the terminals of the test circuit-breaker; when using this method, care must be taken to ensure that the influence of the resistor

on prendra soin de s'assurer que l'influence de la résistance pendant la période du zéro de courant est suffisamment proche de celle qui existerait dans un essai où la résistance est connectée aux bornes du disjoncteur.

Le choix et l'acceptation de telles méthodes exigent une étude très soignée et doivent être soumis à l'accord entre la station d'essai, le constructeur et l'utilisateur.

Note. — Si la méthode d'essai appliquée ne soumet pas la résistance à la pleine contrainte thermique, ou l'interrupteur du courant de la résistance à la pleine contrainte de coupure, des essais additionnels doivent alors être effectués :

- pour vérifier la capacité d'absorption par les résistances en parallèle de la pleine énergie qu'elles supporteraient en service;
- pour vérifier le pouvoir de coupure de l'interrupteur du courant de la résistance.

La méthode pour effectuer de tels essais doit être soumise à l'accord entre la station d'essai, le constructeur et l'utilisateur.

9. Défauts en ligne

Il est recommandé que les essais synthétiques répondant aux conditions du défaut en ligne suivent les prescriptions des articles 8 de la Publication 56-2 de la CEI et 12 de la Publication 56-4 de la CEI, notamment en ce qui concerne le courant d'essai, la tension de rétablissement et la tension transitoire de rétablissement côté ligne et côté source. De plus, on devra tenir compte des conditions établies dans les articles 7 à 11 de ce rapport, dans la mesure où elles sont applicables. Les cycles d'essais à effectuer pour les essais de défaut en ligne sont décrits dans le paragraphe 8.1.3.

Pour obtenir le fort taux d'accroissement initial de la tension transitoire de rétablissement spécifié pour les essais de défaut en ligne, il est nécessaire d'utiliser un circuit additionnel donnant une forme d'onde en dent de scie ayant les caractéristiques tension/temps correctes.

Dans les circuits à injection de courant, le circuit de défaut en ligne additionnel peut être connecté en série avec le circuit de tension, de telle façon que son inductance constitue une partie de l'inductance totale L_n comme indiqué dans les figures 8, page 70, et 10, page 74.

La présence du circuit de défaut en ligne dans le circuit tension peut être la cause d'oscillations superposées à l'onde de courant injecté. Ces oscillations devront être amorties de telle sorte qu'elles n'affectent pas le courant pendant la période de changement significatif de la tension d'arc.

Dans les circuits à injection de tension, le circuit de défaut en ligne peut être connecté en série avec le circuit courant à fréquence industrielle, son inductance constituant une partie de l'inductance totale L_1 comme indiqué dans les figures 12, page 78, et 14, page 82.

10. Méthodes de prolongation de la durée de l'arc

Pour les essais directs sur des disjoncteurs comportant de courtes durées d'arc, le paragraphe 5.9 de la Publication 56-4 de la CEI spécifie des instants de séparation des contacts par rapport au zéro de courant et peut ainsi prescrire un temps d'arc supérieur à une alternance de courant. Les essais synthétiques devront être accomplis sur les mêmes bases, c'est-à-dire avec une commande similaire de l'instant de la séparation des contacts par rapport à l'onde de courant (voir paragraphe 7.5).

Pour tous les disjoncteurs, il est donc essentiel d'être à même de prolonger l'arc du disjoncteur en essai pendant le nombre nécessaire de zéros du courant à fréquence industrielle. La méthode de réallumage utilisée dépend beaucoup des caractéristiques du disjoncteur et des installations de la station d'essais. Les méthodes suivantes sont des exemples :

during the current-zero period is sufficiently close to that which would occur in a test with the resistor connected to the circuit-breaker terminals.

The choice and acceptance of such methods require very careful consideration and shall be subject to agreement between testing station, manufacturer and user.

Note. — If the applied test method does not subject the resistor to the full thermal stress, or the interrupter of the resistor current to its full breaking stress, then additional tests shall be made:

- to check the capability of the shunt resistors to absorb the full scale energy which they would receive in service;
- to check the breaking performance of the interrupter of the resistor current.

The method of making such tests shall be subject to agreement between testing station, manufacturer and user.

9. Short-line faults

Synthetic testing under short-line fault conditions should follow Clauses 8 of IEC Publication 56-2 and 12 of IEC Publication 56-4, especially in respect of test current, recovery-voltage and transient recovery-voltage of the line side and the source side. Additionally, the conditions stated in Clauses 7 to 11 of this report should be taken into account, where applicable. The test-duties to be made for the short-line fault tests are outlined in Sub-clause 8.1.3.

To obtain the steep initial rate-of-rise of transient recovery-voltage specified for the short-line fault tests, it is necessary to use an additional circuit giving a saw-tooth wave-form with the correct voltage/time characteristics.

With current injection circuits, the additional short-line fault circuit may be connected in series with the voltage circuit, so that its inductance forms a part of the total inductance L_h as shown in Figures 8, page 71, and 10, page 75.

The presence of this short-line fault circuit in the voltage circuit may cause oscillations to be superimposed on the injected current wave. These oscillations should be eliminated so that the current during the period of significant change of arc voltage is not influenced.

With voltage injection circuits, the short-line fault circuit may be connected in series with the power-frequency current circuit, its inductance then forming part of the total inductance L_1 as shown in Figures 12, page 79, and 14, page 83.

10. Methods of prolonging the arc-duration

For direct tests on circuit-breakers with short arcing-times, Sub-clause 5.9 of IEC Publication 56-4 specifies times of contact separation relative to the current-zero and thus may require arcing in more than one loop of current. Synthetic tests should be performed on the same basis, i.e. similar point-on-current-wave control of contact separation (see Sub-clause 7.5).

For all circuit-breakers it is therefore essential to be able to prolong the arcing of the test circuit-breaker through the necessary number of zeros of power-frequency current. The reignition method used is very dependent on the characteristics of the circuit-breaker and the installations in the test station. The following methods are examples:

10.1 *Méthode avec application multiple de la source de tension*

Avec cette méthode, la source de tension est connectée au disjoncteur en essai à chaque zéro de courant. Si le disjoncteur en essai interrompt à un zéro, la procédure est arrêtée. Si le disjoncteur en essai réallume, alors la source de courant est reconnectée au moyen du réallumage du disjoncteur auxiliaire. En même temps, la source de tension sera déconnectée et reconnectée au zéro de courant suivant en inversant la polarité de façon convenable.

Si la source de tension unique ne dispose pas d'une énergie suffisante pour être appliquée successivement à plusieurs zéros de courant, il est nécessaire de disposer de plusieurs sources de tension: une pour chaque réallumage plus une pour l'application de la TTR au passage à zéro final du courant.

Cette méthode impose pratiquement le même processus que celui rencontré en essai direct, et tient compte de la relation qui existe entre la coupure au premier zéro et la coupure à un zéro suivant.

10.2 *Méthode « pas à pas »*

Avec cette méthode, une seule source de tension est utilisée. Le disjoncteur en essai est soumis à un réallumage à l'aide d'un circuit de réallumage spécial ou de tout autre moyen en vue de prolonger l'arc jusqu'au zéro de courant auquel la source de tension est appliquée.

Dans certains cas, le prolongement de l'arc peut être obtenu en retardant l'ouverture du disjoncteur auxiliaire ou en augmentant la pente de la tension transitoire de rétablissement du circuit à fréquence industrielle. Les caractéristiques du circuit de courant à fréquence industrielle et celles du disjoncteur en essai rendront ou non cette méthode efficace.

Lorsque les méthodes précédentes sont inefficaces, on peut utiliser un circuit séparé de réallumage. Par exemple, ce circuit produit environ 10 μ s avant le zéro de courant, une impulsion de courant rapidement croissante et de polarité opposée à celle du courant à fréquence industrielle. Le courant parcourant le disjoncteur est alors rapidement inversé et la conduction dans les espaces intercontacts est maintenue pendant une alternance supplémentaire du courant à fréquence industrielle. Un tel circuit à réallumage pour plusieurs alternances est donné comme exemple dans les figures 8, page 70, 10, page 74, 12, page 78, 14, page 82. Plusieurs circuits de cette sorte peuvent être utilisés pour prolonger l'arc pendant plusieurs alternances de courant.

Le circuit de réallumage peut être utilisé pour provoquer le réallumage à la fois du disjoncteur en essai et du disjoncteur auxiliaire. Toutefois, la nécessité de provoquer le réallumage des deux disjoncteurs peut quelquefois être évitée en retardant de façon appropriée la séparation des contacts du disjoncteur auxiliaire.

Cette méthode « pas à pas » nécessite moins d'installations supplémentaires en comparaison de celle décrite dans le paragraphe 10.1. Toutefois, un plus grand nombre d'essais peut être nécessaire pour satisfaire les temps d'arc spécifiés. La méthode est considérée comme une approximation suffisamment proche de la procédure d'essais directs.

Un exemple de cette procédure est donné dans l'annexe B de ce rapport.

11. **Procédure pour régler et ajuster les circuits d'essais**

11.1 *Circuit de courant à fréquence industrielle*

- 11.1.1 Etablir le circuit à fréquence industrielle pour obtenir le courant de court-circuit présumé applicable au cycle d'essais correspondant comme spécifié dans le paragraphe 8.2.2.

10.1 *Method with multiple application of the voltage source*

With this method, the voltage source is connected to the test circuit-breaker at each current-zero. If the test circuit-breaker clears at a zero, the procedure is stopped. If the test circuit-breaker reignites, then the current source is reconnected by reigniting the auxiliary-breaker. At the same time, the voltage source will be disconnected and then reconnected at the next current-zero, with its polarity reversed appropriately.

If the single voltage source has insufficient energy for successive application at several current-zeros, it will be necessary to have several voltage sources: one for each reignition plus one to apply the TRV at the final current-zero.

This method involves practically the same procedure as for direct testing, taking into account the relationship between breaking at the first zero and breaking at a following zero.

10.2 *“Step-by-step” method*

With this method, only one voltage source is used. The test circuit-breaker is reignited by a special reignition circuit, or other means, in order to prolong arcing up to the current-zero at which the voltage source is to be applied.

In some cases, the arcing of the test circuit-breaker may be prolonged by delaying the opening of the auxiliary circuit-breaker or by increasing the rate-of-rise of the transient recovery-voltage in the power-frequency current circuit. Whether this is effective or not depends upon the characteristics of the power-frequency current circuit and of the circuit-breaker under test.

Where the above methods are ineffective, a separate reignition-circuit can be used. This, typically, provides a rapidly rising pulse of current of opposite polarity to that of the power-frequency current, approximately 10 μ s before current-zero. The current through the circuit-breaker is thus rapidly reversed and conduction in the arc gap is maintained for a further loop of power-frequency current. As an example, a multi-loop reignition circuit is indicated in Figures 8, page 71, 10, page 75, 12, page 79, 14, page 83. Several such circuits may be used for prolonging the arcing through several loops of current.

The reignition-circuit can be applied to reignite both test and auxiliary circuit-breakers. However, the need to reignite both circuit-breakers can sometimes be avoided by suitably delaying the separation of the auxiliary circuit-breaker contacts.

This “step-by-step” method needs less additional installations compared to the method described in Sub-clause 10.1. However, more tests may be necessary to comply with the specified arcing times. The method is considered to be a sufficiently close approximation of the direct testing procedure.

An example of this procedure is given in Appendix B of this report.

11. **Procedure for setting and adjusting the test circuits**

11.1 *Power-frequency current circuit*

- 11.1.1 Set up the power-frequency current circuit to give the prospective short-circuit current applicable to the relevant test-duty as specified in Sub-clause 8.2.2.

- 11.1.2 Il peut être possible de prévoir la durée réelle des temps d'arc si des résultats d'essais antérieurs du disjoncteur considéré sont disponibles. Si de tels résultats d'essais ne sont pas disponibles, il est alors seulement possible d'évaluer le temps d'arc maximum escompté en fonction du principe du disjoncteur.

Il est recommandé de déterminer le circuit de courant à fréquence industrielle de façon à obtenir le courant coupé adapté au cycle d'essais à l'instant correspondant à la séparation des contacts. Il est recommandé que le décrétement de la composante périodique du courant de court-circuit soit tel qu'à l'instant correspondant à la crête de la dernière alternance de courant (celle-ci étant rapportée au temps d'arc maximal escompté), la composante périodique du courant présumé ne soit pas inférieure à 90% de la valeur appropriée pour le cycle d'essais. Voir le paragraphe 7.3 de la Publication 56-4 de la CEI.

En cas de doute, il peut être conseillé d'effectuer un essai de courant présumé avant les essais du disjoncteur. Il est toutefois souhaitable de ne pas employer la tolérance complète de -10% permise pour l'amplitude de la dernière alternance de courant seulement pour le décrétement de la composante périodique du courant d'essai présumé. Ceci a pour but de conserver une certaine réserve sur la tolérance négative pour tenir compte de l'influence plus prononcée de la tension sur la déformation du courant d'essai dans un essai synthétique.

Si, toutefois, le décrétement est trop grand pour permettre de satisfaire à la tolérance ci-dessus, il est permis de compenser cet état en augmentant le courant comme indiqué dans le paragraphe 8.2.5.

- 11.1.3 Vérifier que le circuit de courant à fréquence industrielle donne une amplitude de courant et une durée d'alternance pour la dernière alternance du courant réel, situées à l'intérieur des tolérances fixées dans les paragraphes 8.2.2, 8.2.3 et 8.2.4.

Ceci peut être obtenu en ouvrant les disjoncteurs en essai et auxiliaire et en prolongeant le temps d'arc-jusqu'à la limite maximale prévue.

Si une information sur les tensions d'arc des disjoncteurs en essai et auxiliaire est disponible avant de commencer les essais, leurs effets combinés sur l'amplitude et la durée de la dernière alternance de courant réel peuvent être estimés comme indiqué dans l'annexe A. De même, on peut estimer une déformation significative de courant quelconque qui surviendrait dans un circuit d'essai direct équivalent. On peut tenir compte d'une telle déformation en considérant le degré de déformation acceptable dans le circuit synthétique. Les méthodes de compensation (si nécessaires) sont indiquées dans le paragraphe 8.2.5.

11.2 *Injection de courant*

- 11.2.1 Etablir le circuit de courant à fréquence industrielle comme l'indique le paragraphe précédent 11.1.

- 11.2.2 Etablir l'inductance du circuit d'injection (L_h pour un circuit suivant la figure 8, page 70, ou $[L_h + L_i]$ pour un circuit suivant la figure 10, page 74), de manière à donner, avec la tension du circuit d'injection, un di/dt du courant d'injection présumé égal au di/dt du courant de court-circuit présumé spécifié. La tolérance du di/dt du courant présumé doit être de -0% à $+10\%$.

A l'heure actuelle, aucune tolérance n'est indiquée pour les inductances L_h ou $(L_h + L_i)$ respectivement et une variation par rapport à l'inductance du circuit d'essai direct équivalent est admise en vue de faciliter la compensation des pertes de charge et d'injection. Le facteur de puissance à fréquence industrielle de l'inductance du circuit d'injection sera de 0,15 ou moins.

- 11.2.3 D'après des enregistrements convenables de la tension d'arc (voir annexe C, paragraphe 2.4), déterminer la période du changement significatif de la tension d'arc (voir figure 2, page 65) comme indiqué dans le paragraphe 11.4.

- 11.1.2 It may be possible to predict the actual range of arcing-times if previous test results of the circuit-breaker in question are available. If such test results are not available, it is then only possible to assess the maximum expected arcing-time, this depending upon the design of the circuit-breaker.

The power-frequency current circuit should be set to give the breaking-current appropriate to the test-duty at the instant corresponding to contact separation. The decrement of the a.c. component of the short-circuit current should be such that at a time corresponding to the peak of the last loop of current (this latter being related to the maximum expected arcing-time), the a.c. component of the prospective current is not less than 90% of the appropriate value for the test-duty. See Sub-clause 7.3 of IEC Publication 56-4.

In case of doubt it will be advisable to perform a prospective current test before the circuit-breaker tests. It is desirable, however, not to employ the whole of the — 10% tolerance, allowed for the amplitude of the last loop of current, solely by the decrement of the a.c. component of the prospective test current. This is in order to maintain some reserve of the negative tolerance in view of the more pronounced influence of the arc-voltage in distorting the test current in a synthetic circuit.

If, however, the decrement is too great to enable the above tolerance to be complied with, it is acceptable to compensate for this by increasing the current as outlined in Sub-clause 8.2.5.

- 11.1.3 Check that the power-frequency current circuit gives a current amplitude and a loop duration for the last loop of actual current within the tolerances stated in Sub-clauses 8.2.2, 8.2.3 and 8.2.4.

This may be done by opening the test and auxiliary circuit-breakers, prolonging the arcing-time to the expected maximum limit.

If information on the arc-voltages of the test and auxiliary circuit-breakers is available before commencing the tests, their combined effect upon the amplitude and the duration of the last loop of actual current may be estimated as indicated in Appendix A. In a similar manner, any significant current distortion, which would have occurred in an equivalent direct test circuit, may be estimated. Such distortion may be taken into account in considering the permissible degree of distortion in the synthetic circuit. Methods of compensation (if required) are outlined in Sub-clause 8.2.5.

11.2 *Current injection*

- 11.2.1 Set up the power-frequency current circuit as indicated in Sub-clause 11.1 above.

- 11.2.2 Set up the injection circuit inductance (L_h for a circuit according to Figure 8, page 71, or $[L_h + L_i]$ for a circuit according to Figure 10, page 75) to give, with the injection circuit voltage, a di/dt of the prospective injection current equal to the di/dt of the specified prospective short-circuit current. The tolerance on the di/dt of the prospective current shall be —0 % to + 10%.

For the time being, no tolerance is given for the inductance L_h or $(L_h + L_i)$ and a deviation from the inductance of the equivalent direct test circuit is permitted to facilitate compensation of injection and charging losses. The power-frequency power-factor of the injection circuit inductance should be 0.15 or less.

- 11.2.3 From suitable records of the test circuit-breaker arc-voltage (see Appendix C, Sub-clause 2.4), determine the period of significant change of arc-voltage (see Figure 2, page 65) as outlined in Sub-clause 11.4.

Cette période détermine la fréquence maximale $f_{h, \max}$ du courant injecté qui peut être utilisée pour l'essai. Ceci est dû au fait que la période du changement significatif de la tension d'arc doit être plus petite que le temps pendant lequel l'arc est alimenté par le seul courant injecté (voir paragraphes 6.2.1 et 11.2.8). Pour réaliser cette condition, il est recommandé que la période correspondant à $f_{h, \max}$ soit au moins égale à quatre fois la période du changement significatif de la tension d'arc.

- 11.2.4 Choisir la fréquence f_h du courant injecté. Il est recommandé que celle-ci ne soit pas supérieure à $f_{h, \max}$ (voir paragraphe 11.2.3) mais suffisamment élevée pour empêcher une distorsion induite du courant causée par la superposition du courant injecté et du courant à fréquence industrielle dans la période d'arc. Il est recommandé que la fréquence du courant injecté soit aussi suffisamment en dessous de la fréquence de base de la tension transitoire de rétablissement de façon à limiter les ajustements nécessaires mentionnés dans les paragraphes 11.2.2, 11.2.6 et 11.2.7. On utilise couramment des fréquences du courant injecté f_h comprises entre 250 Hz et 1 000 Hz.
- 11.2.5 D'après la fréquence f_h et l'inductance L_h , choisir la valeur de la capacité pour la source de tension U_h .
- 11.2.6 Choisir la valeur de C_h (figures 8, page 70, et 10, page 74). En principe, il est recommandé que cette valeur soit la même que celle utilisée pour le circuit d'essai direct équivalent. Pour obtenir la caractéristique de la tension transitoire de rétablissement présumée spécifiée indiquée dans les paragraphes 7.7 et l'article 9, compte tenu également du paragraphe 6.2.3, d'autres éléments peuvent être nécessaires, par exemple, résistances d'amortissement, circuits de défaut en ligne, etc.
- 11.2.7 Ajuster la tension de charge du condensateur de la source de tension U_h de façon à obtenir la valeur prescrite de la crête de la tension de rétablissement à fréquence industrielle spécifiée dans les paragraphes 7.8 et 8.3. On tiendra compte des pertes d'énergie, par exemple, dans l'arc et les composants du circuit de la tension transitoire de rétablissement.
- 11.2.8 Ajuster le moment d'injection du courant de telle sorte que le temps pendant lequel le disjoncteur en essai est alimenté par le courant injecté seul soit inférieur au $1/4$ d'une période correspondant à f_h (voir figures 9, page 72, et 11, page 76, cas *c*, *d* et *e* seulement). De plus, ce temps doit être plus long que la période du changement significatif de la tension d'arc.

11.3 *Injection de tension*

- 11.3.1 Etablir le circuit de courant à fréquence industrielle comme spécifié dans le paragraphe 11.1. Il est recommandé d'utiliser un disjoncteur auxiliaire présentant une caractéristique d'arc similaire à celle du disjoncteur en essai.
- 11.3.2 A partir de l'inductance L_1 et de la tension U_1 , choisir le condensateur C_1 du circuit de courant à fréquence industrielle (figures 12, page 78, et 14, page 82) et tout autre condensateur, résistance d'amortissement et, si nécessaire, composants de défaut en ligne, de façon à obtenir la partie initiale de la caractéristique de la tension transitoire présumée de rétablissement, indiquée dans le paragraphe 7.7 et dans l'article 9, en tenant compte aussi du paragraphe 6.3.2.

Il est recommandé de choisir la valeur de C_h dans un circuit représenté sur la figure 12, valeur égale à une fraction de C_a , de telle façon que la majeure partie de la tension du circuit de courant à fréquence industrielle apparaisse aux bornes du disjoncteur en essai.

Il est recommandé aussi de démontrer que l'objectif 2) du paragraphe 6.3.2 concernant la déformation du courant est atteint. Si nécessaire, il est recommandé d'ajuster les éléments du circuit de façon convenable.

This period determines the maximum frequency $f_{h, \max}$ of the injected current which may be utilized for the test. This is because the period of significant change of the arc-voltage must be smaller than the time for which the arc is fed by the injected current alone (see Sub-clauses 6.2.1 and 11.2.8). To achieve this, the period corresponding to $f_{h, \max}$ should be at least four times the period of significant change of arc-voltage.

- 11.2.4 Choose the frequency f_h of the injected current. This should not be greater than $f_{h, \max}$ (see Sub-clauses 11.2.3) but sufficiently high to prevent undue current distortion resulting from the superposition of the injected current and the power-frequency short-circuit current during the period of arcing. The frequency of the injected current should also be sufficiently below the basic frequency of the transient recovery-voltage so as to limit the necessary adjustments which are mentioned in Sub-clauses 11.2.2, 11.2.6 and 11.2.7.

Frequencies of the injected current f_h from 250 Hz to 1 000 Hz are currently in use.

- 11.2.5 From frequency f_h and inductance L_h , select the value of the capacitance required for the voltage source U_h .
- 11.2.6 Select the value of C_h (Figures 8, page 71, and 10, page 75). In principle, this value should be the same as that for the equivalent direct test circuit. To obtain the specified prospective transient recovery-voltage characteristic indicated in Sub-clauses 7.7 and Clause 9, taking account also of Sub-clause 6.2.3, other components may be required, e.g. damping resistors, short-line fault circuits, etc.
- 11.2.7 Set the voltage charge on the voltage source capacitor U_h so as to obtain the required peak value of power-frequency recovery-voltage specified in Sub-clauses 7.8 and 8.3, taking into account the energy losses, e.g. in the arc and the transient recovery voltage circuit components.
- 11.2.8 Adjust the timing of current injection so that the time for which the test circuit-breaker is fed by the injected current alone is less than $1/4$ of a period corresponding to f_h (see Figures 9, page 73, and 11, page 77, cases *c*, *d* and *e* only). Furthermore, this time must be of longer duration than the period of significant change of arc-voltage.

11.3 *Voltage injection*

- 11.3.1 Set up the power-frequency current circuit as indicated in Sub-clause 11.1.

An auxiliary circuit-breaker having a similar arc characteristic to that of the test circuit-breaker should be used.

- 11.3.2 From inductance L_1 and voltage U_1 select the capacitor C_1 of the power-frequency current circuit (Figures 12, page 79, and 14, page 83) and any other capacitor, damping resistor and, if used, short-line fault components to give the initial portion of the prospective transient recovery-voltage characteristic, indicated in Sub-clause 7.7 and Clause 9, taking account also of Sub-clause 6.3.2.

The value of C_h in a circuit according to Figure 12 should be chosen as a fraction of C_a so that the major portion of the voltage of the power-frequency current circuit appears at the terminals of the test circuit-breaker.

Furthermore, it should be demonstrated that objective 2) of Sub-clause 6.3.2 regarding current distortion is met. If found necessary, the circuit elements should be adjusted suitably.

- 11.3.3 Pour fournir au disjoncteur en essai la tension transitoire initiale de rétablissement et un éventuel courant post-arc, on choisira la valeur de C_a pour un circuit représenté sur la figure 12, ou C_h pour un circuit représenté sur la figure 14, de telle sorte que la valeur de ces capacités ne soit pas inférieure à :

$$C = \frac{25}{\Delta U} \int_0^{t_r} i_t dt$$

et ne soit pas supérieure à 10 fois cette valeur. ΔU est la valeur de la TTR aux bornes du disjoncteur en essai à la fin de la circulation du courant post-arc, t_r est le temps de passage du courant post-arc i_t à travers le disjoncteur en essai. Pour des raisons pratiques, la valeur de la capacité ne doit pas être inférieure à 50 nF.

- 11.3.4 Choisir l'inductance L_h d'après les condensateurs déterminés ci-dessus (C_h monté en parallèle avec C_a et C_1 montés en série dans le circuit représenté sur la figure 12, page 78, ou C_h dans un circuit représenté sur la figure 14, page 82) et d'après la tension transitoire de rétablissement présumée et spécifiée.
- 11.3.5 Ajuster l'instant d'enclenchement du circuit haute tension sur le disjoncteur en essai, de telle sorte qu'il soit connecté un peu avant la première crête de la tension transitoire de rétablissement du circuit de courant à fréquence industrielle, et qu'on obtienne la caractéristique de tension transitoire de rétablissement présumée spécifiée.
- 11.3.6 Ajuster la tension de charge du condensateur de la source de tension U_h pour donner la valeur de crête prescrite pour la tension de rétablissement à fréquence industrielle indiquée dans les paragraphes 7.8 et 8.3. On prendra en compte les pertes de charge dans les composants du circuit de la tension transitoire de rétablissement.

Note. — La capacité de la source de tension U_h peut être relativement faible, par exemple 0,5 μ F à 2 μ F.

11.4 Détermination de la période du changement significatif de la tension d'arc

Pour déterminer la période du changement significatif de la tension d'arc qui précède immédiatement le zéro de courant, la méthode suivante peut être appliquée, méthode dépendant des caractéristiques individuelles de la tension d'arc.

Les tensions d'arc de disjoncteurs varient considérablement dans leur forme générale. Dans de nombreux cas, la tension d'arc n'est pas stable mais oscille autour d'une valeur moyenne. Pour identifier un changement significatif, on obtient une valeur moyenne en traçant une courbe continue entre les valeurs instantanées des crêtes et des creux (figure 16, page 86). La forme de cette caractéristique de la valeur moyenne de la tension d'arc peut également varier beaucoup.

Quelques disjoncteurs présentent une tension presque constante ou de montée régulière pendant l'alternance de courant, avec un *accroissement* appréciable juste avant le zéro de courant (voir figure 16a, page 86). Dans d'autres cas, il y a un *fléchissement* appréciable juste avant le zéro de courant (voir figure 16b, page 86). Dans de tels cas, il n'est pas difficile de déterminer, à partir d'un oscillogramme, l'instant du début du changement significatif. Pour cela, il est préférable d'utiliser un oscillographe donnant une déviation relativement grande de la tension d'arc, et ayant une base de temps suffisamment rapide pour permettre une mesure soignée de la période du changement significatif de la tension d'arc.

Dans certains cas, il peut être difficile de déterminer la période du changement significatif de la tension d'arc parce que :

- 1) la tension d'arc reste presque constante ou présente une montée régulière pendant l'alternance de courant presque jusqu'à l'instant du zéro de courant ;
- 2) des changements dans la tension d'arc apparaissent bien avant le zéro de courant (par exemple figure 16c, page 86).

Dans ces cas, une fréquence du courant injecté aussi faible que possible et n'excédant pas 750 Hz doit être utilisée, compte tenu des prescriptions du paragraphe 11.2.4.

- 11.3.3 For supplying the initial transient recovery-voltage and the post arc-current, if any, to the test circuit-breaker, select the value of C_a for a circuit according to Figure 12, or C_h for a circuit according to Figure 14, to a value not less than:

$$C = \frac{25}{\Delta U} \int_0^{t_t} i_t dt$$

and not more than ten times this value, where ΔU is the value of the TRV across the test circuit-breaker at the end of the flow of post-arc current and t_t is the time of flow of the post-arc current i_t through the test circuit-breaker. For practical reasons, the value of the capacitance should not be less than 50 nF.

- 11.3.4 From the above determined capacitor (C_h in parallel to the series connection of C_a and C_1 in a circuit according to Figure 12, page 79, or C_h in a circuit according to Figure 14, page 83) and the specified prospective transient recovery-voltage select inductance L_h .
- 11.3.5 Adjust the timing of switching the voltage circuit to the test circuit-breaker so that it is connected shortly before the first peak of the transient recovery-voltage of the power-frequency current circuit to give the specified prospective transient recovery-voltage characteristic.
- 11.3.6 Adjust the voltage charge on the voltage source capacitor U_h to give the required peak value of power-frequency recovery-voltage indicated in Sub-clauses 7.8 and 8.3, taking into account charging losses in the transient recovery-voltage circuit components.

Note. — The capacitance of the source of voltage U_h can be relatively small, e.g. 0.5 μ F to 2 μ F.

11.4 *Determination of the period of significant change of the arc-voltage*

To determine the period of significant change of the arc-voltage which occurs immediately prior to current-zero, the following method may be applied, dependent on individual arc-voltage characteristics.

The arc-voltages of circuit-breakers vary considerably in general shape. In many cases, the arc-voltage is not steady but fluctuates about a mean value. For the purpose of identifying a significant change, a mean value is obtained by drawing a smooth curve between the instantaneous crests and troughs (Figure 16, page 86). The shape of mean arc-voltage characteristics may also vary widely.

Some circuit-breakers show a nearly constant or steadily rising arc-voltage during the current loop, with an appreciable *increase* just prior to current-zero (see Figure 16a, page 86). In other cases, there is an appreciable *decrease* just prior to current-zero (see Figure 16b, page 86). In such cases, it is not difficult to determine from the oscillogram the instant at which a significant change begins. For this purpose, it is preferable to use an oscillograph giving a relatively large deflection for the arc-voltage and having a time scale which is fast enough to enable the period of significant change of arc-voltage to be measured accurately.

In some cases, it may be difficult to determine the period of significant change of arc-voltage because:

- 1) the arc-voltage remains nearly constant or is steadily rising during the current loop almost to the instant of current-zero;
- 2) changes in the arc-voltage occur considerably before the current-zero (e.g. Figure 16c, page 86).

In these cases, an injection current frequency as low as possible and not exceeding 750 Hz shall be used, taking account also of the requirements in Sub-clause 11.2.4.

ANNEXE A

ESTIMATION DE L'INFLUENCE DE LA TENSION D'ARC SUR LA RÉDUCTION DE L'AMPLITUDE ET DE LA DURÉE DE L'ALTERNANCE DE COURANT À FRÉQUENCE INDUSTRIELLE

- A1. La figure 7, page 68, déduite des équations du paragraphe 4.3, peut être utilisée pour estimer la réduction de l'amplitude et de la durée de l'alternance du courant présumé sous l'influence de la tension d'arc, à la fois dans les circuits d'essais directs et d'essais synthétiques. Dans ce dernier cas, on tiendra compte des tensions d'arc des deux disjoncteurs, en essai et auxiliaire. Cette estimation est basée sur l'hypothèse qu'il n'y a une influence significative de la tension d'arc que pendant la dernière alternance du courant.

Note. — S'il existe une influence significative de la tension d'arc pendant plus d'une alternance du courant d'arc, on devra tenir compte que la réduction d'amplitude et de durée de la dernière alternance de courant à fréquence industrielle peut être inférieure à celle donnée dans les exemples suivants. Dans ce cas, une compensation moins importante peut être nécessaire.

Les exemples types sont:

A1.1 Tension d'arc constante relativement faible

A1.1.1 Essai direct

Tension nominale

$$U = 123 \text{ kV}$$

Tension d'essai monophasée

$$U_d = \frac{123 \times 1,3}{\sqrt{3}} = 92 \text{ kV}$$

Valeur moyenne de la tension d'arc constante (dernière alternance) $U_{ad} = 1 \text{ kV}$

D'où
$$\frac{U_{ad}}{U_d} = \frac{1}{92 \sqrt{2}} = 0,0077$$

D'après le calcul (voir paragraphe 4.3):

$$\frac{\Delta I_d}{I} = -1,2\% \quad \text{et} \quad \frac{\Delta t_d}{\frac{1}{2}T} = -0,7\%.$$

A1.1.2 Essai synthétique

Facteurs d'amplification

$$\alpha = 3$$

Tension du circuit de courant

$$U_s = \frac{U_d}{\alpha} = \frac{92}{3} = 31 \text{ kV}$$

Tension d'arc pendant un essai synthétique (dernière alternance) $U_{as} = 2 U_{ad} = 2 \text{ kV}$
(disjoncteurs en essai et auxiliaire)

D'où
$$\frac{U_{as}}{U_s} = \frac{2}{31 \sqrt{2}} = 0,046$$

D'après la figure 7a, page 68: $\frac{\Delta I_s}{I} = -7,0\%$ et $\frac{\Delta t_s}{\frac{1}{2}T} = -4,5\%$

A1.2 Tension d'arc relativement élevée croissant linéairement

A1.2.1 Essai direct

Tension nominale

$$U = 123 \text{ kV}$$

Tension d'essai monophasée

$$U_d = 92 \text{ kV comme ci-dessus}$$

Tension d'arc croissant linéairement (dernière alternance) $S \cdot \frac{1}{4}T = 3 \text{ kV}$

APPENDIX A

ESTIMATION OF THE INFLUENCE OF ARC-VOLTAGE IN REDUCING THE AMPLITUDE AND DURATION OF THE POWER-FREQUENCY CURRENT LOOP

- A1. Figure 7, page 69, derived from the equations in Sub-clause 4.3, may be used to estimate the reduction of the amplitude and the duration of the prospective current loop, due to the influence of arc-voltage, for both direct and synthetic test circuits. In the latter case, the arc-voltages of both the test and the auxiliary circuit-breakers are taken into account.

This estimation is based upon the assumption that there is only a significant influence of the arc-voltage during the last loop of current.

Note. — If there is a significant influence of the arc-voltage during more than one loop of arcing current, the reduction of the amplitude and the duration of the last power-frequency current loop may be less than those given by the following examples. In such cases, a smaller amount of compensation may be necessary.

Typical examples are:

A1.1 *Relatively low, constant arc-voltage*

A1.1.1 *Direct test*

Rated voltage

$$U = 123 \text{ kV}$$

Single pole test voltage

$$U_d = \frac{123 \times 1.3}{\sqrt{3}} = 92 \text{ kV}$$

Mean value of constant arc-voltage (last loop)

$$U_{ad} = 1 \text{ kV}$$

Therefore

$$\frac{U_{ad}}{U_d} = \frac{1}{92 \sqrt{2}} = 0.0077$$

By calculation (see Sub-clause 4.3):

$$\frac{\Delta I_d}{I} = -1.2\% \text{ and } \frac{\Delta t_d}{\frac{1}{2}T} = -0.7\%.$$

A1.1.2 *Synthetic test*

Amplification factor

$$\alpha = 3$$

Current circuit voltage

$$U_s = \frac{U_d}{\alpha} = \frac{92}{3} = 31 \text{ kV}$$

Arc-voltage during synthetic testing (last loop) $U_{as} = 2 U_{ad} = 2 \text{ kV}$ (test and auxiliary circuit-breaker)

Therefore

$$\frac{U_{as}}{U_s} = \frac{2}{31 \sqrt{2}} = 0.046$$

From Figure 7a, page 69: $\frac{\Delta I_s}{I} = -7.0\%$ and $\frac{\Delta t_s}{\frac{1}{2}T} = -4.5\%$

A1.2 *Relatively high, linearly rising arc-voltage*

A1.2.1 *Direct test*

Rated voltage

$$U = 123 \text{ kV}$$

Single pole test voltage

$$U_d = 92 \text{ kV as above}$$

Linearly rising arc-voltage (last loop)

$$S \cdot \frac{1}{4}T = 3 \text{ kV}$$

D'où:
$$\frac{S \cdot \frac{1}{4} T}{\bar{U}_d} = \frac{3}{92 \sqrt{2}} = 0,023$$

D'après la figure 7b, page 68: $\frac{\Delta I_d}{I} = -1,7\%$ et $\frac{\Delta t_d}{\frac{1}{2} T} = -2,2\%$

A1.2.2 Essai synthétique

Facteur d'amplification

$$\alpha = 3$$

Tension du circuit de courant

$$U_s = 31 \text{ kV comme ci-dessus}$$

Tension d'arc durant l'essai synthétique (dernière alternance) $S \cdot \frac{1}{4} T = 2 \cdot 3 = 6 \text{ kV}$

D'où
$$\frac{S \cdot \frac{1}{4} T}{\bar{U}_s} = \frac{6}{31 \sqrt{2}} = 0,137$$

D'après la figure 7b:

$$\frac{\Delta I_s}{I} = -10\% \text{ et } \frac{\Delta t_s}{\frac{1}{2} T} = -11,2\%$$

Dans l'exemple A1.1, aucune compensation n'est nécessaire, car les tolérances sur l'amplitude et la durée de l'alternance de courant à fréquence industrielle suivant les paragraphes 8.2.2 et 8.2.3 ne devraient pas être dépassées pendant l'essai synthétique réel. Cela repose, toutefois, sur l'hypothèse que le décrement de la composante périodique du courant est négligeable.

Dans l'exemple A1.2, une compensation sera nécessaire, car la tolérance sur la durée de l'alternance est dépassée. Bien que la tolérance sur l'amplitude du courant ne soit pas apparemment dépassée, elle pourrait l'être en pratique si l'existence d'un certain décrement de la composante périodique du courant présumé est probable (voir aussi l'exemple A2.7).

En pratique, les tensions d'arc peuvent ne pas suivre exactement l'une ou l'autre des caractéristiques indiquées dans la figure 7 de telle sorte que les valeurs réelles de $\frac{\Delta I_s}{I}$ et $\frac{\Delta t_s}{\frac{1}{2} T}$ devront être mesurées d'après les oscillogrammes correspondants.

- A2. Quand on effectue des essais synthétiques sur des disjoncteurs possédant des caractéristiques de tension d'arc qui modifieraient, de façon significative, le courant dans un essai direct effectué avec les pleines valeurs, on peut alors, suivant le paragraphe 8.2.4, tenir compte de cette influence quand on considère les tolérances sur l'amplitude et la durée de l'alternance.

Dans de tels cas, on appliquera la procédure suivante:

- A2.1 Pendant la dernière alternance d'arc de l'essai effectué d'après le paragraphe 11.1.3, mesurer $\frac{\Delta I_s}{I}$ et $\frac{\Delta t_s}{\frac{1}{2} T}$. Si l'une de ces valeurs mesurées dépasse la tolérance permise de -10% , procéder comme suit.
- A2.2 D'après un enregistrement oscillographique de la tension d'arc (convenablement amplifiée), déterminer si la caractéristique de la tension d'arc est approximativement constante pendant la dernière alternance du courant ou si sa caractéristique est du type « croissant linéairement », c'est-à-dire si la figure 7a ou la figure 7b, page 68, est applicable.
- A2.3 D'après la figure convenable 7a ou 7b et $\frac{\Delta I_s}{I}$, trouver dans le circuit d'essai synthétique le rapport correspondant de la tension d'arc à la tension de crête du circuit de courant à fréquence industrielle. D'après cela, déterminer la valeur de la tension d'arc.
- A2.4 En prenant la partie de la tension d'arc qui est produite par le seul disjoncteur en essai et la valeur de crête de la tension de l'essai direct équivalent correspondant à la pleine tension, calculer le rapport pour l'essai direct.

Therefore

$$\frac{S \cdot \frac{1}{4} T}{\hat{U}_a} = \frac{3}{92 \sqrt{2}} = 0.023$$

From Figure 7b, page 69: $\frac{\Delta I_a}{\hat{I}} = -1.7\%$ and $\frac{\Delta t_a}{\frac{1}{2} T} = -2.2\%$

A1.2.2 Synthetic test

Amplitude factor

$$\alpha = 3$$

Current circuit/voltage

$$U_s = 31 \text{ kV as above}$$

Arc-voltage during synthetic testing (last loop)

$$S \cdot \frac{1}{4} T = 2 \cdot 3 = 6 \text{ kV}$$

Therefore

$$\frac{S \cdot \frac{1}{4} T}{\hat{U}_s} = \frac{6}{31 \sqrt{2}} = 0.137$$

From Figure 7b:

$$\frac{\Delta I_s}{\hat{I}} = -10\% \quad \text{and} \quad \frac{\Delta t_s}{\frac{1}{2} T} = -11.2\%$$

In example A1.1, no compensation is necessary because the tolerances on the amplitude and the duration of the power-frequency current loop, according to Sub-clauses 8.2.2 and 8.2.3, should not be exceeded during the actual synthetic test. This depends, however, on the decrement of the a.c. component of the current being negligible.

In example A1.2, compensation will be necessary because the tolerance on the loop duration is exceeded. Whilst tolerance on the current amplitude is apparently not exceeded, it might be exceeded in practice where there is likely to be some decrement of the a.c. component of the prospective current (see also example A2.7).

In practice, arc-voltages may not exactly follow either of the characteristics shown in Figure 7, therefore the actual values of $\frac{\Delta I_s}{\hat{I}}$ and $\frac{\Delta t_s}{\frac{1}{2} T}$ should be measured from suitable oscillograms.

- A2. When performing synthetic tests on circuit-breakers with arc-voltage characteristics which would significantly modify the current in a direct test with full parameters, then, according to Sub-clause 8.2.4, this influence may be taken into account when considering the tolerances on amplitude and loop duration.

For such cases, the following procedure is applicable:

- A2.1 During the last loop of arcing of the test to Sub-clause 11.1.3, measure $\frac{\Delta I_s}{\hat{I}}$ and $\frac{\Delta t_s}{\frac{1}{2} T}$. If one of the measured values exceeds the permissible tolerance of -10% , proceed as follows:
- A2.2 From an oscillogram record of the arc-voltage (suitably amplified), determine whether the arc-voltage characteristic is approximately constant during the final loop of current or whether its characteristic is of the linearly rising type, i.e. whether Figure 7a or 7b, page 69, is applicable.
- A2.3 From the appropriate Figure 7a or 7b and from $\frac{\Delta I_s}{\hat{I}}$, find the corresponding ratio of arc-voltage to peak voltage for the power-frequency current circuit. From this, determine the value of the arc-voltage.
- A2.4 Taking that portion of the arc-voltage generated by the test circuit-breaker only and the peak voltage of an equivalent full voltage direct test circuit, calculate the ratio for the direct test.

A2.5 D'après ce rapport et la figure convenable 7a ou 7b, page 68, estimer $\frac{\Delta I_d}{\bar{I}}$ et $\frac{\Delta t_d}{\frac{1}{2}T}$ pour l'essai direct.

$$\text{A2.6 Si } \frac{\Delta I}{\bar{I}} = 100 \left[\frac{\frac{\Delta I_s}{\bar{I}} - \frac{\Delta I_d}{\bar{I}}}{100 + \frac{\Delta I_d}{\bar{I}}} \right]$$

$$\text{ou } \frac{\Delta t}{\frac{1}{2}T} = 100 \left[\frac{\frac{\Delta t_s}{\frac{1}{2}T} - \frac{\Delta t_d}{\frac{1}{2}T}}{100 + \frac{\Delta t_d}{\frac{1}{2}T}} \right]$$

dépasse -10% , il est alors nécessaire d'effectuer une certaine compensation appropriée au circuit de courant.

A2.7 Exemple

En se servant de l'exemple A1.2 comme base, c'est-à-dire tension d'arc linéairement croissante et la figure 7b:

Tension nominale

$$U = 123 \text{ kV}$$

Tension d'essai direct monophasée

$$U_d = \frac{123 \times 1,3}{\sqrt{3}} = 92 \text{ kV}$$

Tension du circuit de courant de l'essai synthétique

$$U_s = \frac{U_d}{3} = \frac{92}{3} = 31 \text{ kV}$$

D'après l'enregistrement de l'essai synthétique

$$\frac{\Delta I_s}{\bar{I}} = -10\%$$

D'après la figure 7b, le rapport

$$\frac{S \cdot \frac{1}{4}T}{U_s} = 0,137$$

Tension d'arc totale $= 31 \times \sqrt{2} \times 0,137 = 6 \text{ kV}$

Si, pour cet exemple, on suppose que la tension d'arc est également partagée entre le disjoncteur auxiliaire et le disjoncteur en essai:

La tension d'arc pour le disjoncteur en essai est égale à

$$\frac{6}{2} = 3 \text{ kV}$$

Le rapport

$$\frac{S \cdot \frac{1}{4}T}{U_d} = \frac{3}{92 \sqrt{2}} = 0,023$$

D'après la figure 7b

$$\frac{\Delta I_d}{\bar{I}} = -1,7\%$$

La réduction du courant de crête en essai synthétique, comparativement à un essai direct, est égale à

$$\frac{\Delta I}{\bar{I}} = 100 \left[\frac{-10,0 + 1,7}{100 - 1,7} \right] = -8,4\%$$

La réduction correspondante de la longueur de l'alternance dans un essai synthétique comparé à l'essai direct serait:

$$\frac{\Delta t}{\frac{1}{2}T} = 100 \left[\frac{-11,2 + 2,2}{100 - 2,2} \right] = -9,2\%$$

qui est à l'intérieur de la limite permise de -10% , c'est-à-dire qu'aucune compensation complémentaire n'est nécessaire.

Notes 1. — On néglige la légère augmentation de la longueur de la dernière alternance due à une injection de courant quelconque.

2. — Si l'ouverture des contacts du disjoncteur auxiliaire est retardée par rapport à l'ouverture du disjoncteur en essai (voir paragraphe 10.2) ou si un disjoncteur auxiliaire possédant une tension d'arc plus faible est utilisé, son influence sur le courant coupé peut être alors plus faible que celle du disjoncteur en essai.

A2.5 From this ratio and the appropriate Figure 7a or 7b, page 69, estimate $\frac{\Delta I_d}{\bar{I}}$ and $\frac{\Delta t_d}{\frac{1}{2}T}$ for the direct test.

$$\text{A2.6 If } \frac{\Delta I}{\bar{I}} = 100 \left[\frac{\frac{\Delta I_s}{\bar{I}} - \frac{\Delta I_d}{\bar{I}}}{100 + \frac{\Delta I_d}{\bar{I}}} \right]$$

$$\text{or } \frac{\Delta t}{\frac{1}{2}T} = 100 \left[\frac{\frac{\Delta t_s}{\frac{1}{2}T} - \frac{\Delta t_d}{\frac{1}{2}T}}{100 + \frac{\Delta t_d}{\frac{1}{2}T}} \right]$$

exceeds -10% , then appropriate compensation to the current circuit is required.

A2.7 Example

Using the previous example A1.2 as the basis, i.e. linearly rising arc-voltage and Figure 7b:

Rated voltage

$$U = 123 \text{ kV}$$

Single pole direct test voltage

$$U_a = \frac{123 \times 1.3}{\sqrt{3}} = 92 \text{ kV}$$

Synthetic current circuit voltage

$$U_s = \frac{U_a}{3} = \frac{92}{3} = 31 \text{ kV}$$

From synthetic test record

$$\frac{\Delta I_s}{\bar{I}} = -10\%$$

From Figure 7b, ratio

$$\frac{S \cdot \frac{1}{4}T}{\bar{U}_s} = 0.137$$

Total arc-voltage = $31 \times \sqrt{2} \times 0.137 = 6 \text{ kV}$

If it is assumed for this example that the arc-voltage is equally divided between the test and the auxiliary circuit-breaker:

Arc-voltage for test circuit-breaker

$$\frac{6}{2} = 3 \text{ kV}$$

Ratio

$$\frac{S \cdot \frac{1}{4}T}{\bar{U}_a} = \frac{3}{92 \sqrt{2}} = 0.023$$

From Figure 7b

$$\frac{\Delta I_d}{\bar{I}} = -1.7\%$$

Reduction of peak current in synthetic test compared with corresponding direct test:

$$\frac{\Delta I}{\bar{I}} = 100 \left[\frac{-10.0 + 1.7}{100 - 1.7} \right] = -8.4\%$$

The corresponding reduction of the loop length in the synthetic test compared with the direct test would be:

$$\frac{\Delta t}{\frac{1}{2}T} = 100 \left[\frac{-11.2 + 2.2}{100 - 2.2} \right] = -9.2\%$$

Since both are within the allowable limit of -10% , no compensation is necessary.

Notes 1. — This neglects the slight increase in length of the last loop due to any current injection.

2. — If the opening of the auxiliary circuit-breaker is delayed in relation to the opening of the test circuit-breaker (see Sub-clause 10.2) or if an auxiliary circuit-breaker with a lower arc-voltage is used, then its influence on the breaking current will be smaller than that of the test circuit-breaker.

ANNEXE B

EXEMPLES DE PROCÉDURE D'ESSAI PAR LA MÉTHODE « PAS À PAS »

B1. Exemple d'une procédure d'essai par la méthode « pas à pas » en accord avec le paragraphe 10.2 pour les fréquences d'essais N^{os} 1, 2, 3, 4b

B1.1 Séparer les contacts du disjoncteur en essai 2 ± 1 ms avant le zéro de courant. A ce zéro de courant, appliquer (si nécessaire) l'impulsion de réallumage et enclencher le circuit de tension au zéro suivant.

Si aucun réallumage ne survient, cet essai est la *première* opération valide de coupure.

B1.2 Si un réallumage survient, répéter B1.1 avec une application supplémentaire de l'impulsion de réallumage en vue de prolonger le courant d'arc pendant une nouvelle alternance, enclencher la source de tension au zéro de courant qui suit.

S'il survient de nouveau un réallumage, on continue le processus consistant à ajouter une alternance additionnelle du courant d'arc jusqu'à ce que:

- ou le disjoncteur supporte la pleine tension transitoire de rétablissement,
- ou la durée d'arc maximale du disjoncteur est dépassée.

Note. — La durée d'arc maximale dépendra de la conception particulière du disjoncteur et, par exemple, pourra correspondre à l'arrêt de l'alimentation du fluide d'extinction de l'arc ou à la sortie des contacts mobiles du dispositif d'extinction de l'arc.

Si la pleine tension transitoire de rétablissement est tenue avant d'excéder le temps d'arc maximum, cet essai est la *première* opération valide de coupure. Si ce résultat n'a pu être obtenu, le disjoncteur a failli à l'essai.

B1.3 Pendant la seconde opération de coupure, l'instant imposé par l'appareil de commande pour la séparation des contacts doit être *avancé* de 60° par rapport à l'instant spécifié en B1.1. Au premier zéro de courant après la séparation des contacts, enclencher la source de tension.

B1.4 Si aucun réallumage ne survient, cet essai est la *seconde* opération valide de coupure.

Si un réallumage survient, répéter B1.3 en appliquant des impulsions de réallumage supplémentaires avant d'enclencher la source de tension aux passages successifs du courant par zéro.

Si la pleine tension transitoire de rétablissement est tenue avant d'excéder le temps d'arc maximum, cet essai est la *seconde* opération valide de coupure. Si ce résultat n'a pu être obtenu, le disjoncteur a failli à l'essai.

B1.5 Si pendant B1.3 aucun réallumage ne survient au premier zéro de courant après la séparation des contacts, on procédera à la troisième opération de coupure en séparant les contacts au même instant qu'en B1.1. Au premier zéro de courant appliquer (si nécessaire) l'impulsion de réallumage et au zéro de courant suivant enclencher le circuit de tension.

Si aucun réallumage ne survient, cet essai est la *troisième* opération valide de coupure.

B1.6 Si un réallumage survient, répéter B1.5 en appliquant plusieurs impulsions de réallumage avant d'enclencher la source de tension aux passages successifs du courant par zéro.

Si la pleine tension transitoire de rétablissement est tenue avant d'excéder le temps d'arc maximum, cet essai est la *troisième* opération valide de coupure. Si ce résultat n'a pu être obtenu, le disjoncteur a failli à l'essai.

APPENDIX B

EXAMPLES OF TESTING PROCEDURE WITH THE “STEP-BY-STEP” METHOD

B1. Example of a testing procedure with the “step-by-step” method according to Sub-clause 10.2 for Test-duties Nos. 1, 2, 3, 4b

B1.1 Time the contact separation of the test circuit-breaker to occur 2 ± 1 ms before a current-zero. At this current-zero, apply the reignition pulse (if necessary) and at the following current-zero switch in the voltage circuit.

If no reignition occurs, this is the *first* valid breaking operation.

B1.2 If reignition occurs, repeat B1.1 with an additional application of the reignition pulse, to prolong the arcing current for an extra loop, switching in the voltage circuit at the next current-zero.

If reignition occurs again, the procedure of adding a further loop of arcing current is continued until:

- either the full, transient recovery-voltage is withstood,
- or the maximum arcing-time of the test circuit-breaker is exceeded.

Note. — The maximum arcing-time will depend upon the particular design of the circuit-breaker and, for example, could be when the supply of arc extinguishing medium is shut off or when the moving contacts reach the end of the arc-control device.

If full transient recovery-voltage is sustained before the maximum arcing time is exceeded, this is the *first* valid breaking operation. If this cannot be achieved, the circuit-breaker has failed the test.

B1.3 During the second breaking operation, the timing of the contact separation control shall be *advanced* by 60° from that specified for B1.1. At the first current-zero following contact separation, switch in the voltage circuit.

B1.4 If no reignition occurs, this is the *second* valid breaking operation.

If reignition occurs, repeat B1.3 with additional reignition pulse applications followed by switching-in the voltage circuit at the succeeding current-zero.

If full transient recovery-voltage is sustained before the maximum arcing-time is exceeded, this is the *second* valid breaking operation. If this cannot be achieved, the circuit-breaker has failed the test.

B1.5 If during B1.3 no reignition occurs at the first current-zero following contact separation, then the third breaking operation shall be made with the same timing of contact separation as for B1.1. At the first current-zero apply the pulse (if necessary) and at the following current-zero switch in the voltage circuit.

If no reignition occurs, this is the *third* valid breaking operation.

B1.6 If reignition occurs, repeat B1.5 with multiple pulse applications followed by switching in the voltage circuit at the succeeding current-zero.

If full transient recovery-voltage is sustained before the maximum arcing-time is exceeded, this is the *third* valid breaking operation. If this cannot be achieved, the circuit-breaker has failed the test.

- B1.7 S'il est nécessaire d'effectuer B1.4, la troisième opération de coupure doit être réalisée *en avançant* l'instant imposé par l'appareil de commande pour la séparation des contacts de 60° par rapport au temps affiché pour B1.3. Au premier zéro de courant suivant la séparation des contacts, enclencher la source de tension.

Si aucun réallumage ne survient, cet essai est la *troisième* opération valide de coupure.

- B1.8 Si un réallumage survient, répéter B1.7 en appliquant des impulsions de réallumage supplémentaires avant d'enclencher la source de tension aux passages successifs du courant par zéro.

Si la pleine tension transitoire de rétablissement est tenue avant d'excéder le temps d'arc maximum, cet essai est la *troisième* opération valide de coupure. Si ce résultat n'a pu être obtenu, le disjoncteur a failli à l'essai.

B2. Exemple d'une procédure d'essai par la méthode « pas à pas » en accord avec le paragraphe 10.2 pour la séquence d'essais N° 5

- B2.1 Séparer les contacts pendant la plus petite alternance du courant 2 ± 1 ms avant le zéro de courant, en observant le pourcentage spécifié de composante apériodique à la séparation des contacts. A ce zéro de courant, appliquer (si nécessaire) l'impulsion de réallumage et enclencher le circuit de tension au zéro de courant qui suit.

Si aucun réallumage ne survient, cet essai est la *première* opération valide de coupure.

- B2.2 Si un réallumage survient, répéter B2.1 en appliquant des impulsions de réallumage supplémentaires avant d'enclencher la source de tension au zéro de courant qui suit.

Si la pleine tension transitoire de rétablissement est tenue avant d'excéder le temps d'arc maximum, cet essai est la *première* opération valide de coupure. Si ce résultat n'a pu être obtenu, le disjoncteur a failli à l'essai.

- B2.3 Pendant la seconde opération de coupure, l'instant imposé par l'appareil de commande pour la séparation des contacts doit être *retardé* de 60° par rapport à l'instant spécifié en B2.1. Au premier zéro de courant après la séparation des contacts, enclencher le circuit de tension.

Si aucun réallumage ne survient, cet essai est la *seconde* opération valide de coupure.

- B2.4 Si un réallumage intervient, répéter B2.3 en appliquant des impulsions de réallumage supplémentaires avant d'enclencher la source de tension aux passages successifs du courant par zéro. Si la pleine tension transitoire de rétablissement est tenue avant d'excéder le temps d'arc maximum, cet essai est la *seconde* opération valide de coupure. Si ce résultat n'a pu être obtenu, le disjoncteur a failli à l'essai.

- B2.5 Pendant la troisième opération de coupure, l'instant imposé par l'appareil de commande pour la séparation des contacts doit être *avancé* de 60° par rapport à l'instant spécifié en B2.1. On doit suivre la procédure B2.3 et, si nécessaire, B2.4, pour vérifier la *troisième* opération valide de coupure.

Pour toutes les opérations de coupure, la composante apériodique spécifiée doit être vérifiée par sa mesure à l'instant correspondant à la séparation des contacts pour B2.1.

- B1.7 If it is necessary to make B1.4, then the third breaking operation shall be made with the contact separation control *advanced* by 60° from that of B1.3. At the first current-zero following contact separation, switch in the voltage circuit.

If no reignition occurs, this is the *third* valid breaking operation.

- B1.8 If reignition occurs, repeat B1.7 with additional reignition pulse applications followed by switching in the voltage circuit at the succeeding current-zero.

If full transient recovery-voltage is sustained before the maximum arcing-time is exceeded, this is the *third* valid breaking operation. If this cannot be achieved the circuit-breaker has failed the test.

B2. Example of a testing procedure with the “step-by-step” method according to Sub-clause 10.2 for Test-duty No. 5

- B2.1 Time the contact separation to occur during a minor loop of current at 2 ± 1 ms before a current-zero, with the specified percentage d.c. component at contact separation. At this current-zero, apply the reignition pulse (if necessary) and at the following current-zero switch in the voltage circuit.

If no reignition occurs, this is the *first* valid breaking operation.

- B2.2 If reignition occurs, repeat B2.1 with additional reignition pulse applications followed by switching in the voltage circuit at the next current-zero.

If full transient recovery-voltage is sustained before the maximum arcing-time is exceeded, this is the *first* valid breaking operation. If this cannot be achieved, the circuit-breaker has failed the test.

- B2.3 During the second breaking operation, the timing of the contact separation control shall be *retarded* by 60° from that specified for B2.1. At the first current-zero following contact separation, switch in the voltage circuit.

If no reignition occurs, this is the *second* valid breaking operation.

- B2.4 If reignition occurs, repeat B2.3 with additional reignition pulse applications followed by switching in the voltage circuit at the succeeding current-zero.

If full transient recovery-voltage is sustained before the maximum arcing-time is exceeded, this is the *second* valid breaking operation. If this cannot be achieved, the circuit-breaker has failed the test.

- B2.5 During the third breaking operation, the timing of the contact separation control shall be *advanced* by 60° from that specified for B2.1 and the procedure for B2.3, and if necessary B2.4, carried out to check the *third* valid breaking operation.

For all the breaking operations, the specified d.c. component shall be verified by measurement at the instant corresponding to the contact separation for B2.1.

ANNEXE C

ENREGISTREMENTS SPÉCIFIQUES AUX ESSAIS SYNTHÉTIQUES

Il est recommandé d'effectuer les enregistrements oscillographiques ci-dessous en plus des autres enregistrements spécifiés dans la Publication 56-4 de la CEI, annexe A.

C1. Oscillographe basse fréquence

(Par exemple oscillographe électromagnétique, 6 ms/cm approximativement.)

C1.1 *Tension de la source de courant à fréquence industrielle*

Cet enregistrement permet de contrôler le rapport de la tension d'arc à la tension d'alimentation, et de contrôler que le disjoncteur auxiliaire a coupé.

C1.2 *Cas de l'injection de courant: courant de la source de tension circulant à travers le disjoncteur en essai*

Cet enregistrement permet de contrôler l'enclenchement de la source de tension et montre aussi l'apparition de tout réallumage.

C2. Oscillographe à vitesse moyenne

(Par exemple oscillographe cathodique à tambour tournant, 200 μ s/cm approximativement.)

C2.1 *Tension aux bornes du disjoncteur en essai*

Cet enregistrement permet de contrôler la tension transitoire de rétablissement et montre si le disjoncteur en essai réallume ou ne réallume pas.

C2.2 *Tension aux bornes du disjoncteur auxiliaire*

Cet enregistrement permet de contrôler que le disjoncteur auxiliaire a coupé. Il démontre, en liaison avec C2.1 dans le cas d'une injection de courant, que l'arc du disjoncteur auxiliaire est interrompu suffisamment tôt pour éviter toute interférence avec le disjoncteur en essai pendant la période de changement significatif de sa tension d'arc.

C2.3 *Tension d'arc amplifiée du disjoncteur en essai*

Cet enregistrement permet de déterminer la période du changement significatif de la tension d'arc (voir paragraphes 11.2.3 et 11.4) et la forme de la tension d'arc, c'est-à-dire constante ou linéaire (voir annexe A). Il permet de plus, dans le cas d'une injection de courant, de contrôler le déroulement dans le temps et la fréquence du courant injecté (voir C2.5) en relation avec la période du changement significatif de la tension d'arc.

C2.4 *Cas de l'injection de tension: tension de la source de courant à fréquence industrielle*

Cet enregistrement permet de contrôler l'enclenchement de la source de tension.

C2.5 *Cas de l'injection de courant: courant circulant à travers le disjoncteur en essai*

(Courant à fréquence industrielle et courant injecté.)

Cet enregistrement permet de contrôler que le déroulement dans le temps de l'injection de courant est correct.

APPENDIX C

DATA TO BE RECORDED FOR SYNTHETIC TESTS

It is recommended that the following oscillographic records should be taken in addition to other data to be recorded as specified in IEC Publication 56-4, Appendix A.

C1. Low frequency oscillograph

(e.g. electromagnetic oscillograph, 6 ms/cm approximatively.)

C1.1 *Voltage of the power-frequency current source*

This enables the ratio of the arc-voltage to the driving voltage to be checked, and also the clearance of the auxiliary circuit-breaker.

C1.2 *For current injection: current through the test circuit-breaker from the voltage source*

This enables the switching in of the voltage source to be checked and will also show whether any reignition occurs.

C2. Medium speed oscillograph

(e.g. rotating drum C.R.O., 200 μ s/cm approximatively.)

C2.1 *Voltage across the test circuit-breaker*

This enables the transient recovery-voltage to be checked and also shows whether the test circuit-breaker reignites or not.

C2.2 *Voltage across auxiliary circuit-breaker*

This enables the clearance of the auxiliary circuit-breaker to be checked and with C2.1 demonstrates, for current injection, that the auxiliary circuit-breaker arc is interrupted sufficiently early to prevent interference with the test circuit-breaker during the period of significant change of its arc-voltage.

C2.3 *Amplified arc-voltage of the test circuit-breaker*

This enables the period of significant change of arc-voltage to be determined (see Sub-clauses 11.2.3 and 11.4), and the form of the arc-voltage, i.e. constant or linear (see Appendix A). For current injection it also enables a check to be made of timing and the frequency of the current injection (see C2.5) relative to the period of significant change of arc-voltage.

C2.4 *For voltage injection: voltage of the power-frequency current source*

This enables the switching-in of the voltage source to be checked.

C2.5 *For current injection: current through the test circuit-breaker*

(Power-frequency and injection current.)

This enables a check to be made that the timing of the current injection is correct.

C2.6 Cas de l'injection de courant: courant injecté

Cet enregistrement permet de contrôler que le déroulement dans le temps de l'injection est correct, et montre aussi clairement si un réallumage survient.

C2.7 Courant de réallumage (s'il est utilisé pour prolonger la durée d'arc)

Cet enregistrement sert principalement à contrôler la synchronisation du circuit de réallumage lors d'un essai à plusieurs alternances.

C3. Oscillographe à grande vitesse

C3.1 Tension aux bornes du disjoncteur en essai

Cet enregistrement permet en général de contrôler, avec plus de précision qu'en C2.1, la forme de l'onde de la tension transitoire de rétablissement. Quand la pente initiale est importante, par exemple pour les essais de défaut en ligne, des vitesses de balayage de la base de temps encore plus rapides peuvent être nécessaires.

C3.2 Courant circulant à travers le disjoncteur en essai

(Courant à fréquence industrielle et courant injecté, le cas échéant.)

Cet enregistrement doit être effectué avec une déflexion raisonnable de manière à contrôler la descente du courant vers zéro. Il sert à donner l'assurance, en relation avec la tension transitoire de rétablissement enregistrée en C3.1, qu'un réallumage n'est pas survenu après le zéro de courant initial. Ces enregistrements peuvent également montrer un courant post-arc si ce dernier présente une intensité appréciable.

Note. — D'autres enregistrements peuvent être effectués en plus, pour obtenir des données expérimentales ou constructives, mais ils ne sont pas essentiels pour prouver les caractéristiques nominales et les performances.

C2.6 *For current injection: injection current*

This enables a further check to be made that the timing of the injection is correct and also shows clearly whether any reignitions occur.

C2.7 *Reignition current (if used for prolonging arc-duration)*

This is mainly of value in checking the synchronizing of the multi-loop reignition circuit.

C3. High speed oscillograph

C3.1 *Voltage across the test circuit-breaker*

This in general enables the transient recovery-voltage wave-form to be checked more accurately than in C2.1. When the initial rate-of-rise is important, e.g. for short-line fault tests, even faster swept time base speeds may be required.

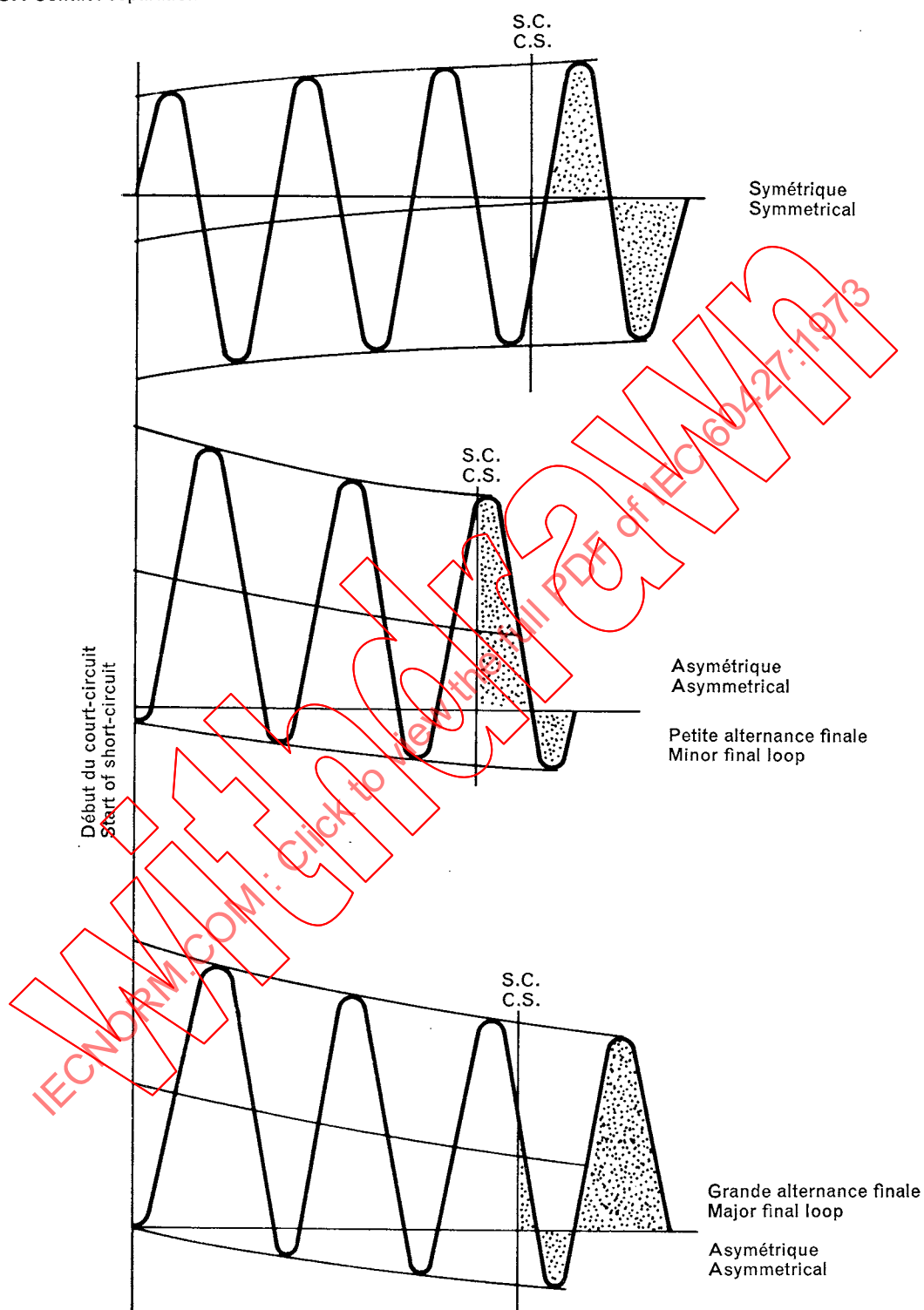
C3.2 *Current through the test circuit-breaker*

(Power-frequency current and injection current, if used.)

This should be arranged to record with a reasonable deflection so that the slope of the current towards zero can be checked, and serves, together with the transient recovery-voltage record of C3.1, to ensure that no reignition occurs following the initial current-zero. Such records may also show post-arc current if this is present in any significant degree.

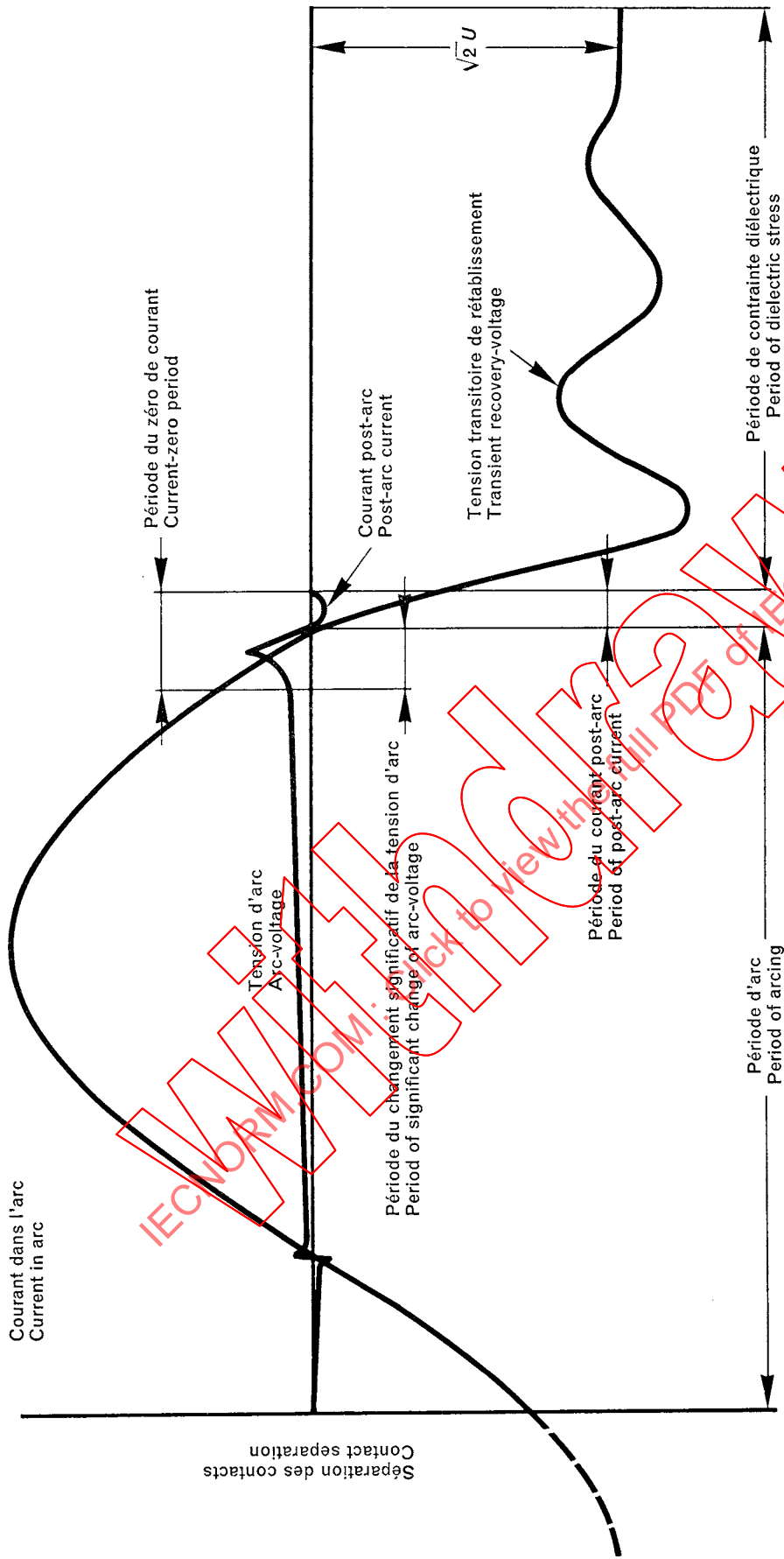
Note. — Other records may be added to obtain test or design data, but are not essential for proving the circuit-breaker rating and performance.

S.C. : Séparation des contacts
C.S. : Contact separation



0032/73

FIG. 1. — Exemples de formes d'onde du courant de court-circuit dans des circuits monophasés.
Typical wave-shapes of short-circuit current in single-phase circuits.

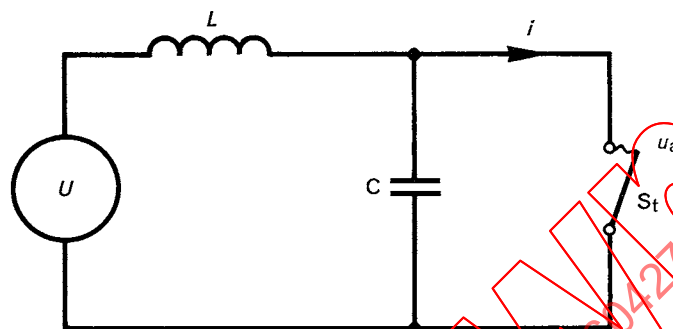


0033/73

Seulement schématique — Pas à l'échelle
Diagrammatic only — Not to scale

Fig. 2. — Périodes pendant le processus de la coupure du courant.

Periods of current-breaking process.



U = tension alimentant le circuit direct

L = inductance du circuit direct à pleine puissance, contrôlant avec U le courant de court-circuit

C = condensateur du circuit direct à pleine puissance, contrôlant avec L la tension transitoire de rétablissement du circuit

S_t = disjoncteur

i = courant d'arc

u_a = tension d'arc du disjoncteur

U = voltage supplying the direct circuit

L = inductance of the full power direct circuit, together with U controlling the short-circuit current

C = capacitor of the full power direct circuit, together with L controlling the transient recovery-voltage of the circuit

S_t = circuit-breaker

i = arc-current

u_a = arc-voltage of circuit-breaker

FIG. 3. — Circuit direct, schéma simplifié.

Direct circuit, simplified diagram.

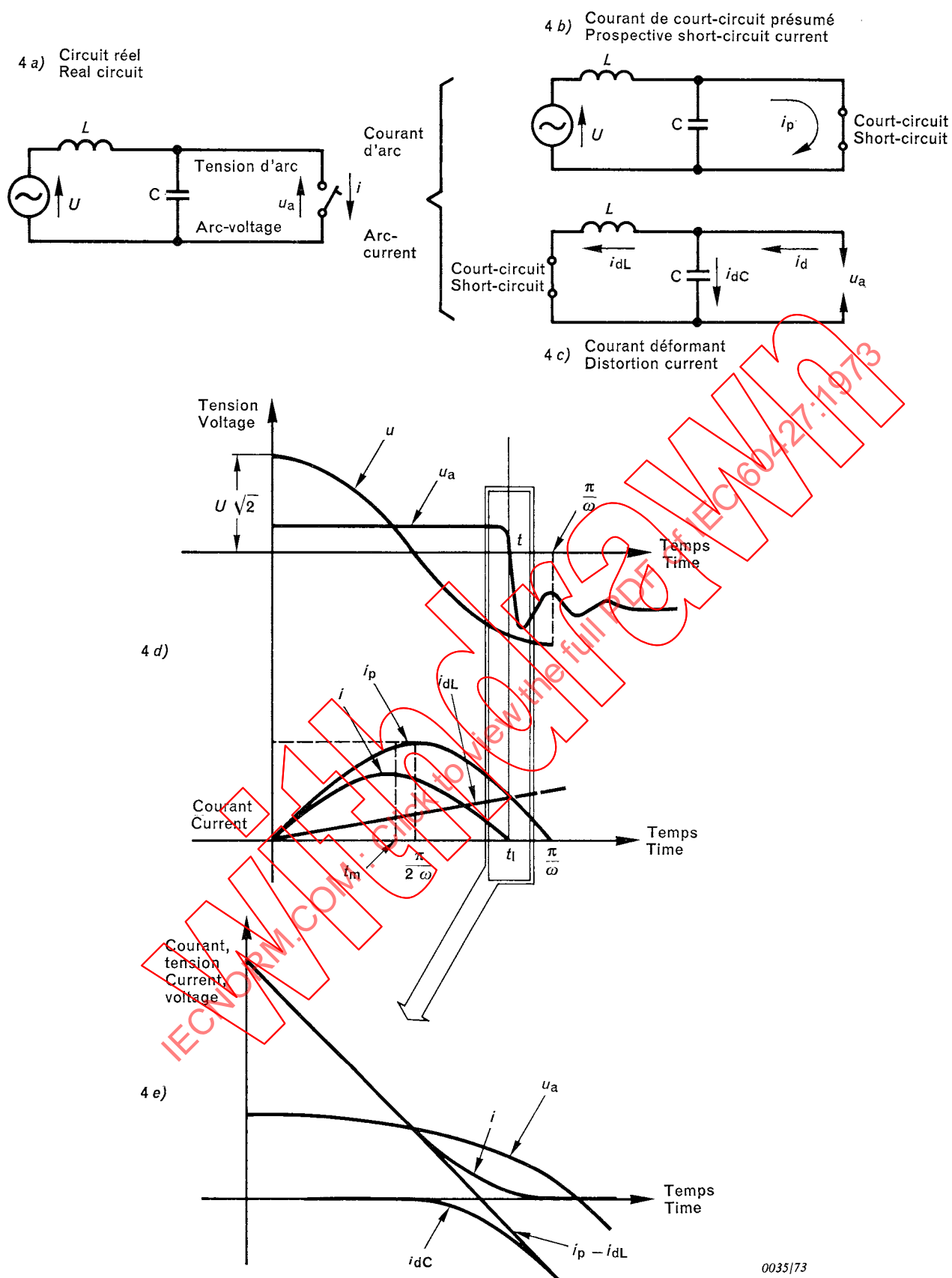
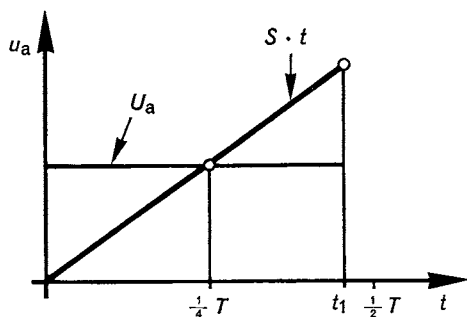
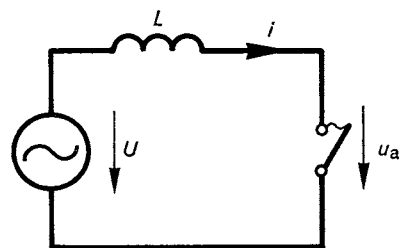


FIG. 4. — Courant déformant.
Distortion current.



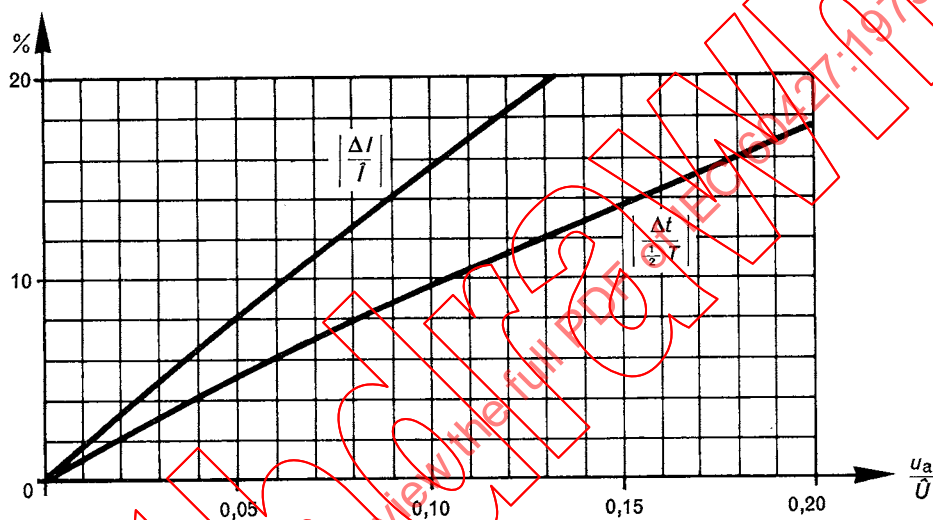
0036/73

FIG. 5. — Caractéristiques de la tension d'arc.

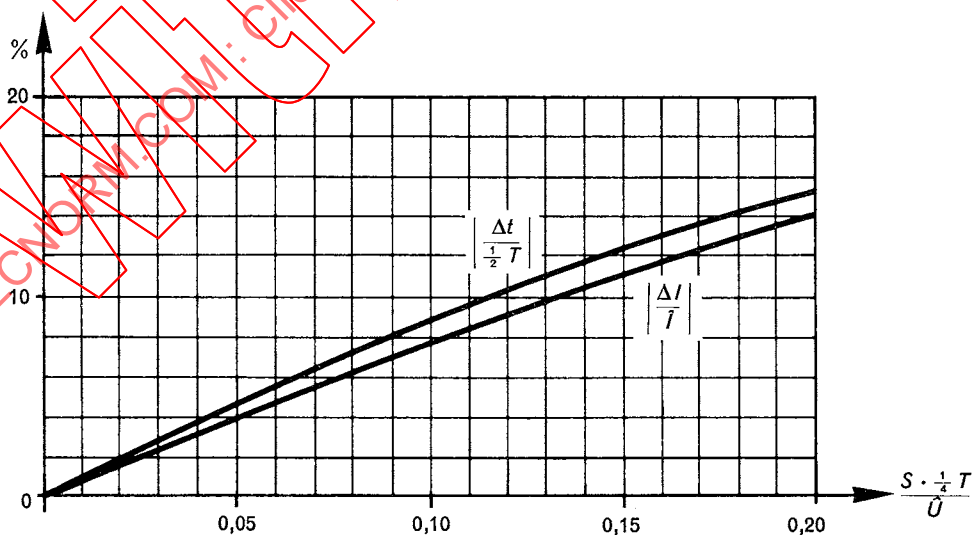


0037/73

FIG. 6. — Schéma de circuit simplifié.



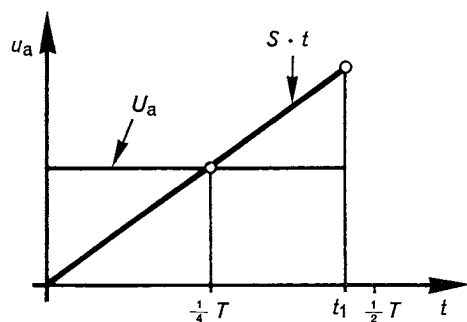
7 a) Pour une tension d'arc constante



7 b) Pour une tension d'arc croissant linéairement

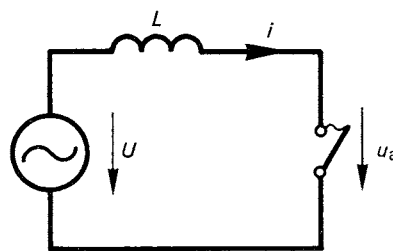
0038/73

FIG. 7. — Détermination de la réduction de l'amplitude et de la durée de l'alternance de courant en fonction du rapport de la tension d'arc à la tension du circuit de courant à fréquence industrielle.



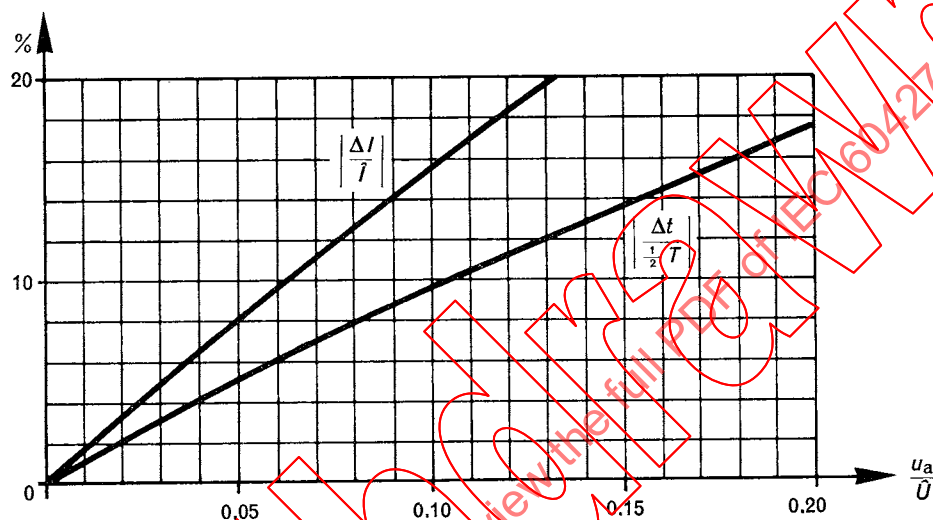
0036/73

FIG. 5. — Arc-voltage characteristics.

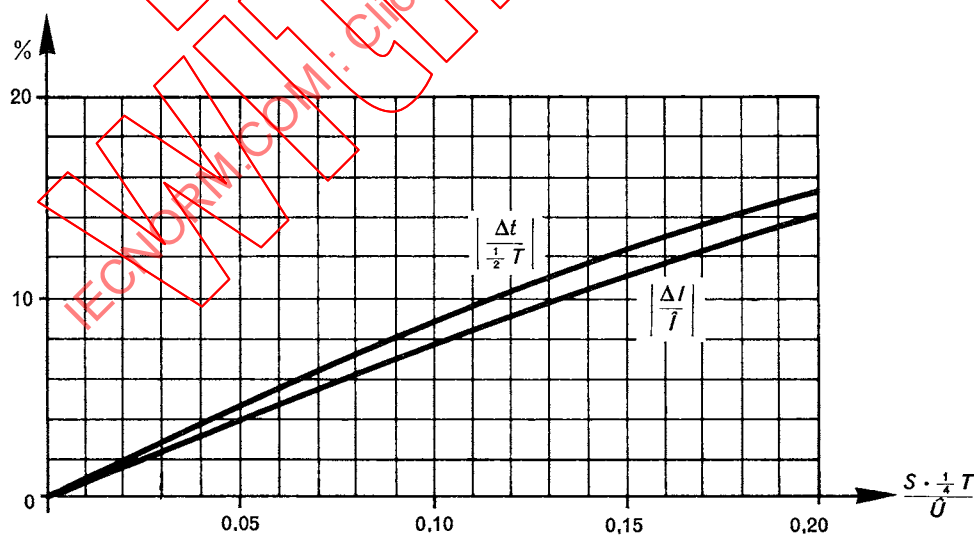


0037/73

FIG. 6. — Simplified circuit diagram.



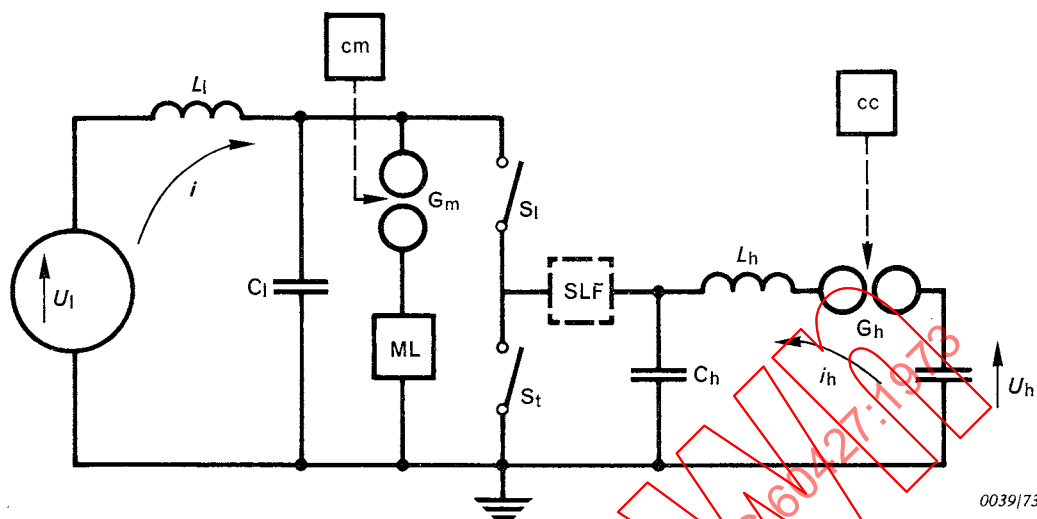
7 a) For constant arc-voltage



7 b) For linearly rising arc-voltage

0038/73

FIG. 7. — Determination of reduction of amplitude and duration of current loop from ratio of arc-voltage to voltage of power-frequency current circuit.



- U_1 = tension la plus basse alimentant le circuit de courant à fréquence industrielle
 L_1 = inductance permettant d'obtenir le courant de court-circuit i à partir de U_1
 C_1 = condensateur du circuit de courant à fréquence industrielle
 S_t = disjoncteur en essai
 S_1 = disjoncteur auxiliaire
 G_h = connecteur fermant le circuit de tension pour alimenter le disjoncteur en essai
 G_m = connecteur fermant le circuit de réallumage à plusieurs alternances
 cc = circuit de contrôle dépendant du courant et commandant la fermeture du connecteur G_h avant le zéro du courant
 cm = circuit de contrôle dépendant du courant et destiné à fermer le connecteur G_m
 U_h = tension la plus élevée alimentant le courant injecté i_h et la tension transitoire de rétablissement
 L_h = inductance du circuit de tension
 C_h = condensateur du circuit de tension qui contrôle, avec L_h , la caractéristique de la tension transitoire de rétablissement
 ML = circuit de réallumage à plusieurs alternances (méthode « pas à pas »)
 SLF = circuit de défaut en ligne, quand on effectue des essais de défaut en ligne

FIG. 8. — Exemple de schéma à injection de courant, le circuit de tension étant en parallèle sur le disjoncteur en essai; schéma simplifié.