

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 décrétement. 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.