

**NORME  
INTERNATIONALE  
INTERNATIONAL  
STANDARD**

**CEI  
IEC**

**60427**

Troisième édition  
Third edition  
2000-04

---

---

**Essais synthétiques des disjoncteurs  
à courant alternatif à haute tension**

**Synthetic testing of high-voltage alternating  
current circuit-breakers**



Numéro de référence  
Reference number  
CEI/IEC 60427:2000

## Numéros des publications

Depuis le 1er janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000.

## Publications consolidées

Les versions consolidées de certaines publications de la CEI incorporant les amendements sont disponibles. Par exemple, les numéros d'édition 1.0, 1.1 et 1.2 indiquent respectivement la publication de base, la publication de base incorporant l'amendement 1, et la publication de base incorporant les amendements 1 et 2.

## Validité de la présente publication

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

Des renseignements relatifs à la date de reconfirmation de la publication sont disponibles dans le Catalogue de la CEI.

Les renseignements relatifs à des questions à l'étude et des travaux en cours entrepris par le comité technique qui a établi cette publication, ainsi que la liste des publications établies, se trouvent dans les documents ci-dessous:

- «Site web» de la CEI\*
- **Catalogue des publications de la CEI**  
Publié annuellement et mis à jour régulièrement  
(Catalogue en ligne)\*
- **Bulletin de la CEI**  
Disponible à la fois au «site web» de la CEI\* et comme périodique imprimé

## Terminologie, symboles graphiques et littéraux

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la CEI 60050: *Vocabulaire Electrotechnique International* (VEI).

Pour les symboles graphiques, les symboles littéraux et les signes d'usage général approuvés par la CEI, le lecteur consultera la CEI 60027: *Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique*, la CEI 60417: *Symboles graphiques utilisables sur le matériel. Index, relevé et compilation des feuilles individuelles*, et la CEI 60617: *Symboles graphiques pour schémas*.

\* Voir adresse «site web» sur la page de titre.

## Numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series.

## Consolidated publications

Consolidated versions of some IEC publications including amendments are available. For example, edition numbers 1.0, 1.1 and 1.2 refer, respectively, to the base publication, the base publication incorporating amendment 1 and the base publication incorporating amendments 1 and 2.

## Validity 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 relating to the date of the reconfirmation of the publication is available in the IEC catalogue.

Information on the subjects under consideration and work in progress undertaken by the technical committee which has prepared this publication, as well as the list of publications issued, is to be found at the following IEC sources:

- **IEC web site\***
- **Catalogue of IEC publications**  
Published yearly with regular updates  
(On-line catalogue)\*
- **IEC Bulletin**  
Available both at the IEC web site\* and as a printed periodical

## Terminology, graphical and letter symbols

For general terminology, readers are referred to IEC 60050: *International Electrotechnical Vocabulary* (IEV).

For graphical symbols, and letter symbols and signs approved by the IEC for general use, readers are referred to publications IEC 60027: *Letter symbols to be used in electrical technology*, IEC 60417: *Graphical symbols for use on equipment. Index, survey and compilation of the single sheets* and IEC 60617: *Graphical symbols for diagrams*.

\* See web site address on title page.

**NORME  
INTERNATIONALE  
INTERNATIONAL  
STANDARD**

**CEI  
IEC**

**60427**

Troisième édition  
Third edition  
2000-04

---

---

**Essais synthétiques des disjoncteurs  
à courant alternatif à haute tension**

**Synthetic testing of high-voltage alternating  
current circuit-breakers**

© IEC 2000 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.

International Electrotechnical Commission  
Telefax: +41 22 919 0300

3, rue de Varembé Geneva, Switzerland  
e-mail: [inmail@iec.ch](mailto:inmail@iec.ch) IEC web site <http://www.iec.ch>



Commission Electrotechnique Internationale  
International Electrotechnical Commission  
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX  
PRICE CODE **XB**

Pour prix, voir catalogue en vigueur  
For price, see current catalogue

## SOMMAIRE

|                                                                                                                                                                      | Pages |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| AVANT-PROPOS .....                                                                                                                                                   | 6     |
| INTRODUCTION .....                                                                                                                                                   | 10    |
| Articles                                                                                                                                                             |       |
| 1 Domaine d'application .....                                                                                                                                        | 12    |
| 2 Références normatives .....                                                                                                                                        | 12    |
| 3 Définitions.....                                                                                                                                                   | 12    |
| 4 Techniques et méthodes d'essais synthétiques – Essais de coupure de courant de court-circuit.....                                                                  | 16    |
| 4.1 Principes fondamentaux et exigences générales pour les méthodes d'essais synthétiques de coupure .....                                                           | 16    |
| 4.2 Exigences spécifiques de chaque circuit d'essais synthétiques pour les essais de coupure .....                                                                   | 22    |
| 5 Essais d'établissement en court-circuit.....                                                                                                                       | 26    |
| 5.1 Principes fondamentaux et exigences générales pour les essais synthétiques d'établissement en court-circuit.....                                                 | 26    |
| 5.2 Circuit d'essais synthétiques pour essais de fermeture et exigences spécifiques s'y rapportant.....                                                              | 28    |
| 6 Exigences particulières pour les essais synthétiques d'établissement et de coupure relatives aux prescriptions des paragraphes 6.102 à 6.111 de la CEI 60056 ..... | 30    |
| Annexe AA (informative) Déformation du courant .....                                                                                                                 | 60    |
| Annexe BB (informative) Méthodes d'injection de courant .....                                                                                                        | 90    |
| Annexe CC (informative) Méthodes d'injection de tension .....                                                                                                        | 100   |
| Annexe DD (informative) Circuit de Skeats (ou par transformateur).....                                                                                               | 106   |
| Annexe EE (normative) Indications à donner et résultats à enregistrer lors d'essais synthétiques.....                                                                | 112   |
| Annexe FF (informative) Procédures d'essais particulières pour les disjoncteurs équipés de résistances de coupure parallèles .....                                   | 114   |
| Annexe GG (normative) Méthodes synthétiques pour l'établissement et la coupure de courant capacitif .....                                                            | 120   |
| Annexe HH (informative) Méthodes de réallumage pour la prolongation de l'arc .....                                                                                   | 138   |
| Figure 1 – Processus d'interruption; périodes principales .....                                                                                                      | 48    |
| Figure 2 – Exemple de tension de rétablissement.....                                                                                                                 | 50    |
| Figure 3 – Impédance d'onde équivalente dans le circuit de tension du schéma à injection de courant.....                                                             | 52    |
| Figure 4 – Processus de fermeture; périodes principales.....                                                                                                         | 54    |
| Figure 5 – Durée maximale permise de pré-arc pour qu'un essai de fermeture à tension réduite soit valide .....                                                       | 56    |
| Figure 6 – Circuit synthétique de fermeture et formes d'ondes .....                                                                                                  | 58    |
| Figure AA.1a – Circuit direct, schéma simplifié.....                                                                                                                 | 74    |
| Figure AA.1b – Courant de court-circuit présumé .....                                                                                                                | 74    |
| Figure AA.1c – Courant déformant .....                                                                                                                               | 74    |

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                       | Page |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| FOREWORD .....                                                                                                                                                        | 7    |
| INTRODUCTION .....                                                                                                                                                    | 11   |
| Clause                                                                                                                                                                |      |
| 1 Scope .....                                                                                                                                                         | 13   |
| 2 Normative references .....                                                                                                                                          | 13   |
| 3 Definitions .....                                                                                                                                                   | 13   |
| 4 Synthetic testing techniques and methods – Short-circuit breaking tests .....                                                                                       | 17   |
| 4.1 Basic principles and general requirements for synthetic breaking test methods .....                                                                               | 17   |
| 4.2 Synthetic test circuits and related specific requirements for breaking tests .....                                                                                | 23   |
| 5 Short-circuit making tests .....                                                                                                                                    | 27   |
| 5.1 Basic principles and general requirements for synthetic making test methods .....                                                                                 | 27   |
| 5.2 Synthetic test circuit and related specific requirements for making tests .....                                                                                   | 29   |
| 6 Specific requirements for synthetic tests for making and breaking performance related to the requirements of subclauses 6.102 to 6.111 inclusive of IEC 60056 ..... | 31   |
| Annex AA (informative) Current distortion .....                                                                                                                       | 61   |
| Annex BB (informative) Current injection methods .....                                                                                                                | 91   |
| Annex CC (informative) Voltage injection methods .....                                                                                                                | 101  |
| Annex DD (informative) Duplicate circuit (transformer or Skeats circuit) .....                                                                                        | 107  |
| Annex EE (normative) Information to be given and results to be recorded for synthetic tests .....                                                                     | 113  |
| Annex FF (informative) Special procedures for testing circuit-breakers having parallel breaking resistors .....                                                       | 115  |
| Annex GG (normative) Synthetic methods for capacitive-current switching .....                                                                                         | 121  |
| Annex HH (informative) Reignition methods to prolong arcing .....                                                                                                     | 139  |
| Figure 1 – Interrupting process; basic time intervals .....                                                                                                           | 49   |
| Figure 2 – Example of recovery voltage .....                                                                                                                          | 51   |
| Figure 3 – Equivalent surge impedance within the voltage circuit of current injection scheme .....                                                                    | 53   |
| Figure 4 – Making process; basic time intervals .....                                                                                                                 | 55   |
| Figure 5 – Maximum allowable pre-arcing time for valid making test at reduced voltage .....                                                                           | 57   |
| Figure 6 – Synthetic make circuit and waveforms .....                                                                                                                 | 59   |
| Figure AA.1a – Direct circuit, simplified diagram .....                                                                                                               | 75   |
| Figure AA.1b – Prospective short-circuit current .....                                                                                                                | 75   |
| Figure AA.1c – Distortion current .....                                                                                                                               | 75   |

|                                                                                                                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figure AA.1d – Courant déformant .....                                                                                                                                    | 76  |
| Figure AA.2a – Schéma de circuit simplifié.....                                                                                                                           | 76  |
| Figure AA.2b – Caractéristiques du courant et de la tension d'arc pour courant symétrique..                                                                               | 78  |
| Figure AA.2c – Caractéristiques de courant et de tension d'arc pour courant asymétrique....                                                                               | 80  |
| Figures AA.3a à AA.3d – Réduction de l'amplitude et de la durée de la dernière alternance.                                                                                | 80  |
| Figure BB.1 – Circuit type à injection de courant où le circuit de tension est en parallèle avec le disjoncteur en essai .....                                            | 94  |
| Figure BB.2 – Séquence de l'injection du courant dans le circuit de la figure BB.1 .....                                                                                  | 94  |
| Figure BB.3 – Circuit type à injection de courant où le circuit de tension est en parallèle avec le disjoncteur auxiliaire .....                                          | 96  |
| Figure BB.4 – Séquence de l'injection dans le circuit de la figure BB.3.....                                                                                              | 96  |
| Figure BB.5 – Exemples de détermination de la période de changement significatif de la tension d'arc à partir d'oscillogrammes .....                                      | 98  |
| Figure CC.1 – Schéma caractéristique de l'injection de tension avec le circuit de tension en parallèle avec le disjoncteur auxiliaire (schéma simplifié).....             | 102 |
| Figure CC.2 – Formes d'onde (TTR) obtenues dans un circuit d'injection de tension avec la source de tension en parallèle avec le disjoncteur auxiliaire.....              | 104 |
| Figure DD.1 – Circuit de Skeats ou par transformateur.....                                                                                                                | 110 |
| Figure DD.2 – Circuit de Skeats ou par transformateur avec déclenchement.....                                                                                             | 110 |
| Figure GG.1 – Schéma d'essais synthétiques (dit parallèle) .....                                                                                                          | 126 |
| Figure GG.2 – Schéma d'essais synthétiques avec circuit de courant inductif et la possibilité de régler le saut de tension .....                                          | 128 |
| Figure GG.3 – Circuit synthétique d'injection de tension simulant le saut de tension .....                                                                                | 130 |
| Figure GG.4 – Circuit synthétique à injection de courant .....                                                                                                            | 132 |
| Figure GG.5 – Circuit d'essai synthétique (dit série) pour appliquer aux deux bornes du disjoncteur en essai les composantes réelles de la tension de rétablissement..... | 134 |
| Figure GG.6 – Schéma d'essais synthétique pour la fermeture .....                                                                                                         | 136 |
| Figure HH.1 – Schéma type du circuit de réallumage servant à prolonger la durée d'arc ....                                                                                | 142 |
| Figure HH.2 – Circuits combinés d'injection de courant et de Skeats.....                                                                                                  | 142 |
| Figure HH.3 – Formes d'ondes typiques obtenues sur un essai asymétrique en utilisant le circuit de la figure HH.2 .....                                                   | 144 |

|                                                                                                                                                           | Page |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Figure AA.1d – Distortion current .....                                                                                                                   | 77   |
| Figure AA.2a – Simplified circuit diagram .....                                                                                                           | 77   |
| Figure AA.2b – Current and arc-voltage characteristics for symmetrical current .....                                                                      | 79   |
| Figure AA.2c – Current and arc-voltage characteristics for asymmetrical current.....                                                                      | 81   |
| Figures AA.3a to AA.3d – Reduction of amplitude and duration of final current loop<br>of arcing .....                                                     | 83   |
| Figure BB.1 – Typical current injection circuit with voltage circuit in parallel with<br>the test circuit-breaker .....                                   | 95   |
| Figure BB.2 – Injection timing for current injection scheme with circuit BB.1.....                                                                        | 95   |
| Figure BB.3 – Typical current injection circuit with voltage circuit in parallel with<br>the auxiliary circuit-breaker .....                              | 97   |
| Figure BB.4 – Injection timing for current injection scheme with circuit BB.3.....                                                                        | 97   |
| Figure BB.5 – Examples of the determination of the interval of significant change<br>of arc-voltage from the oscillograms.....                            | 99   |
| Figure CC.1 – Typical voltage injection circuit diagram with voltage circuit in parallel<br>with the auxiliary circuit-breaker (simplified diagram) ..... | 103  |
| Figure CC.2 – TRV waveshapes in a voltage injection circuit with the voltage circuit<br>in parallel with the auxiliary circuit-breaker.....               | 105  |
| Figure DD.1 – Transformer or Skeats circuit.....                                                                                                          | 111  |
| Figure DD.2 – Triggered transformer or Skeats circuit.....                                                                                                | 111  |
| Figure GG.1 – Synthetic testing scheme (parallel mode) .....                                                                                              | 127  |
| Figure GG.2 – Synthetic testing scheme with an inductive current circuit and<br>with facility to adjust a voltage jump .....                              | 129  |
| Figure GG.3 – Synthetic voltage injection circuit providing a voltage jump.....                                                                           | 131  |
| Figure GG.4 – Synthetic current injection scheme .....                                                                                                    | 133  |
| Figure GG.5 – Synthetic test circuit (serial mode) to apply to both sides of the test breaker<br>the normal system recovery voltage .....                 | 135  |
| Figure GG.6 – Synthetic testing scheme for making .....                                                                                                   | 137  |
| Figure HH.1 – Typical reignition circuit diagram for prolonging arc-duration .....                                                                        | 143  |
| Figure HH.2 – Combined Skeats and current injection circuits.....                                                                                         | 143  |
| Figure HH.3 – Typical waveforms obtained on an asymmetrical test using<br>the circuit in figure HH.2.....                                                 | 145  |

# COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

## ESSAIS SYNTHÉTIQUES DES DISJONCTEURS À COURANT ALTERNATIF À HAUTE TENSION

### AVANT-PROPOS

- 1) La CEI (Commission Électrotechnique Internationale) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI, entre autres activités, publie des Normes internationales. Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les documents produits se présentent sous la forme de recommandations internationales. Ils sont publiés comme normes, spécifications techniques, rapports techniques ou guides et agréés comme tels par les Comités nationaux.
- 4) Dans le but d'encourager l'unification internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent à appliquer de façon transparente, dans toute la mesure possible, les Normes internationales de la CEI dans leurs normes nationales et régionales. Toute divergence entre la norme de la CEI et la norme nationale ou régionale correspondante doit être indiquée en termes clairs dans cette dernière.
- 5) La CEI n'a fixé aucune procédure concernant le marquage comme indication d'approbation et sa responsabilité n'est pas engagée quand un matériel est déclaré conforme à l'une de ses normes.
- 6) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Norme internationale peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 60427 a été établie par le sous-comité 17A: Appareillage à haute tension, du comité d'études 17 de la CEI: Appareillage.

Cette troisième édition annule et remplace la deuxième édition parue en 1989, l'amendement 1 (1992), l'amendement 2 (1995). Cette troisième édition constitue une révision technique.

Le texte de cette norme est issu de la deuxième édition, de l'amendement 1, de l'amendement 2 et des documents suivants:

| FDIS         | Rapport de vote |
|--------------|-----------------|
| 17A/559/FDIS | 17A/565/RVD     |

Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de cette norme.

Cette publication n'a pas été rédigée en parfaite conformité avec les Directives ISO/CEI, Partie 3.

Cette publication doit être lue conjointement avec la CEI 60056 (1987). La numérotation des paragraphes de l'article 6 reprend celle de la CEI 60056. Les annexes et leurs figures sont appelées AA, BB, etc.

Les annexes EE et GG font partie intégrante de cette norme.

## INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**SYNTHETIC TESTING OF HIGH-VOLTAGE ALTERNATING  
CURRENT CIRCUIT-BREAKERS****FOREWORD**

- 1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, the IEC publishes International Standards. Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. The IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested National Committees.
- 3) The documents produced have the form of recommendations for international use and are published in the form of standards, technical specifications, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.
- 5) The IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with one of its standards.
- 6) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this International Standard may be the subject of patent rights. The IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 60427 has been prepared by subcommittee 17A: High voltage switchgear and controlgear, of IEC technical committee 17: Switchgear and controlgear.

This third edition cancels and replaces the second edition published in 1989, amendment 1 (1992), amendment 2 (1995). This third edition constitutes a technical revision.

The text of this standard is based on the second edition, amendment 1, amendment 2 and the following documents:

| FDIS         | Report on voting |
|--------------|------------------|
| 17A/559/FDIS | 17A/565/RVD      |

Full information on the voting for the approval of this standard can be found in the report on voting indicated in the above table.

This publication has not been drafted in complete accordance with the ISO/IEC Directives, Part 3.

This publication shall be read in conjunction with IEC 60056 (1987). The numbering of the subclauses of clause 6 is the same as in IEC 60056. The annexes and their figures are named AA, BB, etc.

Annexes EE and GG form an integral part of this standard.

Les annexes AA, BB, CC, DD, FF et HH sont données uniquement à titre d'information.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant 2005-01-01. A cette date, la publication sera

- reconduite;
- supprimée;
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

Withdrawing  
IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60427:2000

Annexes AA, BB, CC, DD, FF and HH are for information only.

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until 2005-01-01. At this date, the publication will be

- reconfirmed;
- withdrawn;
- replaced by a revised edition, or
- amended.

Withdrawn  
IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60427:2000

## INTRODUCTION

Au cours des dernières décennies, les connaissances sur les techniques et les méthodes d'essais synthétiques ont progressé. Il a été démontré que l'essai synthétique était un moyen économique et techniquement valable pour essayer les disjoncteurs à courant alternatif à haute tension selon les spécifications de la CEI 60056.

C'est pourquoi il a été décidé de considérer les méthodes d'essais synthétiques, après une révision complète de la première édition de la CEI 60427, comme équivalentes aux méthodes d'essais directs.

Withdrawing  
IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60427:2000

## INTRODUCTION

During the past few decades experience has been gained with synthetic testing techniques and methods. It has been proven that synthetic testing is an economical and technically correct way to test high-voltage a.c. circuit-breakers according to the requirements of IEC 60056.

This is why it was decided to include synthetic testing methods, after a thorough revision of the first edition of IEC 60427, as equivalent to the direct test methods.

Withdrawing  
IECNORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60427:2000

# ESSAIS SYNTHÉTIQUES DES DISJONCTEURS À COURANT ALTERNATIF À HAUTE TENSION

## 1 Domaine d'application

La présente Norme internationale s'applique aux disjoncteurs à courant alternatif définis dans le domaine d'application de la CEI 60056. Elle donne les règles générales d'essais de ces disjoncteurs pour les essais d'établissement et de coupure décrits aux 6.102 à 6.111 de la CEI 60056, à l'aide de méthodes d'essais synthétiques.

NOTE Les circuits pour les séquences d'essais décrites au 6.111 ne sont pas encore normalisés. Néanmoins, les méthodes existantes sont indiquées à l'annexe GG.

Les méthodes et techniques décrites sont celles d'usage courant. Le but de cette norme est d'établir des critères pour les essais synthétiques et pour l'évaluation correcte des résultats. Ces critères établissent la validité de la méthode d'essai sans limiter l'invention de nouveaux circuits d'essais.

## 2 Références normatives

Les documents normatifs suivants contiennent des dispositions qui, par suite de la référence qui y est faite, constituent des dispositions valables pour la présente Norme internationale. Pour les références datées, les amendements ultérieurs ou les révisions de ces publications ne s'appliquent pas. Toutefois, les parties prenantes aux accords fondés sur la présente Norme internationale sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des documents normatifs indiqués ci-après. Pour les références non datées, la dernière édition du document normatif en référence s'applique. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des Normes internationales en vigueur.

CEI 60050(441):1984 *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) – Chapitre 441: Appareillage et fusibles*

CEI 60056:1987, *Disjoncteurs à courant alternatif à haute tension*

CEI 61633:1995, *Disjoncteurs à courant alternatif à haute tension – Guide pour la procédure d'essai d'établissement et de coupure de courants de court-circuit et de courants de charge pour les disjoncteurs sans enveloppe métallique et à cuve mise à la terre*

## 3 Définitions

Pour les besoins de la présente Norme internationale les définitions de la CEI 60056 et les définitions suivantes s'appliquent:

### 3.1

#### essai direct

essai 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 de puissance. Cette source peut être un réseau ou des alternateurs spéciaux comme ceux qui sont utilisés dans les stations d'essais de court-circuit ou une combinaison des deux

## SYNTHETIC TESTING OF HIGH-VOLTAGE ALTERNATING CURRENT CIRCUIT-BREAKERS

### 1 Scope

This International Standard applies to a.c. circuit-breakers within the scope of IEC 60056. It provides the general rules for testing a.c. circuit-breakers, for making and breaking capacities over the range of test-duties described in 6.102 to 6.111 of IEC 60056, by synthetic methods.

NOTE Circuits for the test duties described in 6.111 have not yet been standardized. However, present methods are given in annex GG.

The methods and techniques described are those in general use. The purpose of this standard is to establish criteria for synthetic testing and for the proper evaluation of results. Such criteria will establish the validity of the test method without imposing restraints on innovation of test circuitry.

### 2 Normative references

The following normative documents contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this International Standard. For dated references, subsequent amendments to, or revisions of, any of these publications do not apply. However, parties to agreements based on this International Standard are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent editions of the normative documents indicated below. For undated references, the latest edition of the normative document referred to applies. Members of IEC and ISO maintain registers of currently valid International Standards.

IEC 60050(441):1984, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 441: Switchgear, controlgear and fuses*

IEC 60056:1987, *High-voltage alternating current circuit-breakers*

IEC 61633:1995, *High-voltage alternating current circuit-breakers – Guide for short-circuit and switching test procedures for metal-enclosed and dead tank circuit-breakers*

### 3 Definitions

For the purposes of this International Standard the definitions of IEC 60056 and the following definitions apply:

#### 3.1

##### **direct test**

a test in which the applied voltage, the current and the transient and power-frequency recovery voltages are all obtained from a circuit having a single-power source, which may be a power system or special alternators as used in short-circuit testing stations or a combination of both

### 3.2

#### **essai synthétique**

essai dans lequel la totalité du courant ou la plus grande partie de celui-ci est obtenue à partir d'une source (circuit de courant) et dans lequel la tension appliquée et/ou les tensions de rétablissement (transitoire et à fréquence industrielle) sont obtenues en totalité ou en partie à partir d'une ou de plusieurs sources séparées (circuit de tension)

### 3.3

#### **disjoncteur en essai**

disjoncteur soumis aux essais (voir 6.102.2 de la CEI 60056)

### 3.4

#### **disjoncteur(s) auxiliaire(s)**

disjoncteur introduit dans le circuit d'essais synthétiques et utilisé pour séparer ou relier les différents circuits au disjoncteur en essai

### 3.5

#### **circuit de courant**

partie du circuit d'essais synthétiques fournissant la plus grande part du courant à fréquence industrielle ou sa totalité

### 3.6

#### **circuit de tension**

partie du circuit d'essais synthétiques fournissant la plus grande part de la tension d'essai ou sa totalité

### 3.7

#### **courant présumé (d'un circuit pour un disjoncteur donné)**

courant qui circulerait dans le circuit si chaque pôle du disjoncteur en essai et du disjoncteur auxiliaire était remplacé par un conducteur d'impédance négligeable [VEI 441-17-01, modifiée]

### 3.8

#### **courant réel**

courant circulant dans le disjoncteur en essai (courant présumé modifié par les tensions d'arc des disjoncteurs en essai et auxiliaire)

### 3.9

#### **courant déformant**

courant calculé égal à la différence entre le courant présumé et le courant réel

### 3.10

#### **courant post-arc**

courant qui circule dans l'espace entre les contacts d'arc d'un disjoncteur immédiatement après que le courant et la tension d'arc sont devenus nuls et que la tension transitoire de rétablissement a commencé à croître

### 3.11

#### **méthode par injection de courant**

méthode d'essais synthétiques dans laquelle la source de tension est appliquée au disjoncteur en essai avant le zéro de courant à fréquence industrielle

### 3.12

#### **courant injecté**

courant fourni par le circuit de tension d'un circuit à injection de courant au moment où cette source est reliée au disjoncteur en essai

**3.2****synthetic test**

a test in which all of the current, or a major portion of it, is obtained from one source (current circuit), and in which the applied voltage and/or the recovery voltages (transient and power-frequency) are obtained wholly or in part from one or more separate sources (voltage circuits)

**3.3****test circuit-breaker**

the circuit-breaker under test (see 6.102.2 of IEC 60056)

**3.4****auxiliary circuit-breaker(s)**

the circuit-breaker(s) forming part of a synthetic test circuit used to put the test circuit-breaker into the required relation with various circuits

**3.5****current circuit**

that part of the synthetic test circuit from which all or the major part of the power-frequency current is obtained

**3.6****voltage circuit**

that part of the synthetic test circuit from which all or the major part of the test voltage is obtained

**3.7****prospective current (of a circuit and with respect to a circuit-breaker)**

the current that would flow in the circuit if each pole of the test and auxiliary circuit-breakers were replaced by a conductor of negligible impedance [IEV 441-17-01, modified]

**3.8****actual current**

the current through the test circuit-breaker (prospective current modified by the arc-voltage of the test and auxiliary circuit-breakers)

**3.9****distortion current**

a calculated current equal to the difference between the prospective current and the actual current

**3.10****post-arc current**

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

**3.11****current-injection method**

a synthetic test method in which the voltage circuit is applied to the test circuit-breaker before power-frequency current-zero

**3.12****injected current**

the current supplied by the voltage circuit of a current injection circuit when it is connected to the circuit-breaker under test

### 3.13

#### **méthode par injection de tension**

méthode d'essais synthétiques dans laquelle la source de tension est appliquée au disjoncteur en essai après le zéro de courant à fréquence industrielle

### 3.14

#### **conditions du réseau de référence**

conditions d'un réseau électrique ayant les paramètres constitutifs dont les valeurs spécifiées et les valeurs d'essais de la CEI 60056 sont dérivées

## **4 Techniques et méthodes d'essais synthétiques – Essais de coupure de courant de court-circuit**

### **4.1 Principes fondamentaux et exigences générales pour les méthodes d'essais synthétiques de coupure**

Toute méthode d'essai synthétique retenue doit contraindre le disjoncteur en essai de manière adéquate. L'adéquation est généralement établie dès que la méthode satisfait aux exigences exposées dans les paragraphes suivants.

#### *Périodes principales*

Le disjoncteur a deux positions: fermé et ouvert. Fermé, il conduit le plein courant avec une chute de tension négligeable entre ses contacts. Ouvert, il ne laisse passer qu'un courant négligeable mais avec la pleine tension entre ses contacts. Cela définit les deux contraintes principales, la contrainte en courant et la contrainte en tension, qui sont séparées dans le temps.

Si on observe plus précisément les contraintes en tension et courant pendant le processus de coupure (figure 1), trois périodes principales peuvent être distinguées:

- La période fort courant  
Cette période est définie par le temps entre la séparation des contacts et le début du changement significatif de la tension d'arc. La période fort courant précède les périodes d'interaction et de contrainte diélectrique.
- La période d'interaction  
Cette période est définie par le temps séparant le début du changement significatif de la tension d'arc avant le zéro de courant, de la disparition du courant dans le disjoncteur, y compris, s'il existe, le courant post-arc (voir aussi annexe BB.2).
- La période de contrainte diélectrique  
Cette période est définie par le temps séparant la disparition du courant dans le disjoncteur en essai, y compris le courant post-arc, s'il existe, de la fin de l'essai.

#### **4.1.1 Période fort courant**

Pendant cette période, le disjoncteur en essai doit être contraint par le circuit de manière telle que les conditions initiales de la période d'interaction, avec des tolérances à préciser, soient les mêmes que celles apparaissant dans les conditions du réseau de référence.

Dans les circuits d'essais synthétiques, le rapport entre la tension à fréquence industrielle du circuit de courant et la tension d'arc est faible comparé à ce rapport lors d'essais dans les conditions du réseau de référence, pour deux raisons:

- cette tension d'alimentation est une fraction de la tension du réseau;
- les tensions d'arc des disjoncteurs en essai et auxiliaire s'ajoutent.

### 3.13

#### **voltage-injection method**

a synthetic test method in which the voltage circuit is applied to the test circuit-breaker after power-frequency current-zero

### 3.14

#### **reference system conditions**

the conditions of an electrical system having the parameters from which the rated and test values of IEC 60056 are derived

## **4 Synthetic testing techniques and methods – Short-circuit breaking tests**

### **4.1 Basic principles and general requirements for synthetic breaking test methods**

Any particular synthetic method chosen for testing shall adequately stress the test circuit-breaker. Generally, the adequacy is established when the test method meets the requirements set forth in the following subclauses.

#### *Basic intervals*

A circuit-breaker has two basic positions: closed and open. In the closed position a circuit-breaker conducts full current with negligible voltage drop across its contacts. In the open position it conducts negligible current but with full voltage across the contacts. This defines the two main stresses, the current stress and the voltage stress, which are separated in time.

If closer attention is paid to the voltage and current stresses during the interrupting process (figure 1), three main intervals can be recognized:

- High-current interval  
The high-current interval is the time from contact separation to the start of the significant change in arc voltage. The high-current interval precedes the interaction and high-voltage intervals.
- Interaction interval  
The interaction interval is the time from the start of the significant change in arc-voltage prior to current-zero to the time when the current including the post-arc current, if any, ceases to flow through the test circuit-breaker. (See also annex BB.2).
- High-voltage interval  
The high-voltage interval is the time from the moment when the current including the post-arc current, if any, ceases to flow through the test circuit-breaker to the end of the test.

#### **4.1.1 High-current interval**

During this interval the test circuit-breaker shall be stressed by the test circuit in such a way that the starting conditions for the interaction interval, within tolerances to be specified, are the same as under reference system conditions.

In synthetic test circuits the ratio of the power-frequency voltage of the current circuit to the arc-voltage is low in comparison with tests at reference system conditions due to:

- the voltage of the current circuit being a fraction of the system voltage;
- the fact that the arc-voltages of the test circuit-breaker and of the auxiliary circuit-breaker are added.

Il en résulte que la durée de l'onde de courant et sa valeur à la crête en sont réduites. Cette déformation est expliquée dans l'annexe AA.

L'étude de l'énergie d'arc dégagée dans le disjoncteur en essai conduit à fixer les tolérances pour limiter l'influence de cette déformation sur deux grandeurs caractéristiques de la forme du courant, à savoir la valeur crête de l'onde et la durée de cette onde (voir annexe AA).

Les tolérances sur l'amplitude et la fréquence du courant présumé à couper, comme indiqué en 6.103.2 et 6.104.3 de la CEI 60056, ne doivent pas être dépassées par le courant réel circulant dans le disjoncteur en essai. Les conditions suivantes devront donc être remplies:

- l'amplitude de la dernière alternance du courant réel dans le disjoncteur en essai doit satisfaire aux prescriptions imposées par le 6.104.3 de la CEI 60056, pour le courant présumé. L'amplitude de la dernière alternance du courant réel d'essai dans le circuit monophasé ne sera pas inférieure à 90 % de la valeur spécifiée;
- la durée de la dernière alternance du courant d'essai réel à fréquence industrielle ne doit pas être inférieure à 90 % de la durée de l'alternance qui serait obtenue avec la fréquence assignée pour le disjoncteur prenant en compte, si nécessaire, l'effet de la composante continue spécifiée;
- si des essais synthétiques sont entrepris sur des disjoncteurs dont la tension d'arc modifierait très sensiblement le courant en réseau, l'influence de cette tension d'arc sur l'amplitude et la durée de l'alternance peut être prise en considération lorsqu'on définit les tolérances ci-dessus.

La procédure détaillée d'estimation de ces corrections est donnée dans l'annexe AA avec des exemples d'établissement des tolérances.

Pour respecter ces tolérances, une augmentation du courant d'essai est permise, soit en augmentant la tension, soit en réduisant la réactance de la source de courant, soit en lui superposant une composante continue, ou encore en réduisant la fréquence industrielle. Dans ce but, les tolérances spécifiées pour la composante continue et la fréquence industrielle peuvent être dépassées avec l'accord du constructeur.

#### 4.1.2 Période d'interaction

Pendant la période d'interaction, la contrainte provoquée par le courant de court-circuit se change en contrainte à haute tension et, selon le comportement du disjoncteur, les tensions et courant du circuit peuvent être fortement affectés. Quand le courant décroît vers zéro, la tension d'arc peut augmenter en chargeant une capacité parallèle et déformer le courant traversant l'arc. Après le zéro de courant, la conductivité post-arc peut introduire un amortissement supplémentaire de la tension transitoire de rétablissement et, par là, modifier la tension entre les contacts du disjoncteur et l'énergie fournie à l'espace ionisé entre les contacts. L'interaction entre circuit et disjoncteur immédiatement avant et après le zéro de courant (c'est-à-dire pendant la période d'interaction) est d'une extrême importance pour le phénomène de coupure.

Pendant cette période d'interaction, les formes d'ondes de courant et de tension doivent être les mêmes en essais synthétiques que dans le réseau de référence (3.1.4), en prenant en compte les modifications possibles de ces courant et tension par rapport aux valeurs présumées, dues à l'interaction circuit-disjoncteur.

La période d'interaction représente la période critique pour une défaillance de coupure du disjoncteur en mode thermique. Par conséquent, il est d'une extrême importance que la forme et l'amplitude de la tension transitoire de rétablissement (TTR) présumée correspondent à celles associées au courant présumé de la séquence d'essais concernée.

As a result the duration of the current loop and the peak value of the current will be reduced. This distortion of the current is outlined in annex AA.

Considerations with respect to the arc-energy released in the test circuit-breaker lead to a maximum permissible influence in terms of tolerances on two characteristic values of the shape of the current, i.e. current-peak value and current-loop duration (see annex AA).

The tolerance on the amplitude and the power frequency of the prospective breaking current, as given in 6.103.2 and 6.104.3 of IEC 60056, shall not be exceeded by the actual current through the test circuit-breaker. Therefore the following conditions shall be met:

- the actual current amplitude during the last loop in the test circuit-breaker shall comply with the requirements for the prospective current stated in 6.104.3 of IEC 60056. The amplitude of the final loop of the actual test current in a single phase circuit shall be not less than 90 % of the value specified;
- the duration of the final loop of the actual power-frequency test current shall be not less than 90 % of the loop duration given by the rated frequency after taking into account, where this is appropriate, the effect of the specified d.c. component;
- when performing synthetic tests on circuit-breakers possessing arc-voltage characteristics which would significantly modify the current in service, the influence of the arc-voltage on the current amplitude and loop duration may be allowed for when considering the tolerances given above.

The detailed procedure for estimating these corrections with examples for establishing the tolerances is given in annex AA.

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 current circuit, or to apply a current with an increased d.c. component or a reduced power frequency. For this purpose the specified tolerances for d.c. component and power frequency may be exceeded subject to the consent of the manufacturer.

#### 4.1.2 Interaction interval

During the interaction interval, the short-circuit current stress changes into high-voltage stress and the circuit-breaker performance can significantly influence the current and voltages in the circuit. As the current decreases to zero, the arc voltage may rise to charge parallel capacitance and distort current passing through the arc. After the current-zero the post-arc conductivity may result in additional damping of the transient recovery voltage and thus influence the voltage across the circuit-breaker and the energy supplied to the ionised contact gap. The interaction between the circuit and the circuit-breaker immediately before and after current-zero (i.e. during the interaction interval) is of extreme importance to the interrupting process.

During the interaction interval the current and voltage wave forms shall be the same for a synthetic test as under reference system conditions (3.14), taking into account the possible deviations of the current and voltage from the prospective values due to the interaction between the circuit-breaker and the circuit.

The interaction interval presents the critical time for the thermal failure mode of the circuit-breaker. Therefore, it is of extreme importance that the shape and magnitude of the prospective transient recovery voltage (TRV) corresponds to that associated with the prospective current of the relevant test-duty.

Cela impose des exigences strictes pour le circuit d'essai. Pour la méthode par injection de courant, les exigences sont indiquées au 4.2.1 et pour la méthode par injection de tension, les exigences sont indiquées au 4.2.2.

NOTE Selon le circuit utilisé, l'interaction entre le circuit et le disjoncteur en essai peut être perturbée par la présence du disjoncteur auxiliaire pendant la période critique autour du zéro de courant.

Il convient que la tension d'arc du disjoncteur auxiliaire soit inférieure ou égale à la tension d'arc du disjoncteur en essai.

Si un disjoncteur auxiliaire à plus forte tension d'arc est utilisé, il peut être nécessaire d'augmenter la tension à fréquence industrielle du circuit fort courant.

#### 4.1.3 Période de contrainte diélectrique

Pendant cette période, l'intervalle entre contacts du disjoncteur en essai est contraint par la tension de rétablissement.

La TTR présumée doit satisfaire aux prescriptions des 4.102, 4.105, 4.106 et 6.104.5 de la CEI 60056. Les méthodes permettant de déterminer la TTR présumée dans les circuits d'essais synthétiques peuvent être choisies parmi celles décrites dans l'annexe GG de la CEI 60056.

L'impédance de la source de tension doit être assez faible pour mettre en évidence les réamorçages, s'il y en a.

NOTE 1 Si le disjoncteur en essai est équipé de résistances parallèles de faible valeur, une procédure spéciale peut être nécessaire (voir annexe FF).

NOTE 2 Si la TTR est obtenue depuis plusieurs sources, la forme de l'onde résultante ne devra pas présenter de discontinuité appréciable.

En principe, la tension de rétablissement à fréquence industrielle pour les séquences de coupure de courts-circuits doit satisfaire aux prescriptions du 6.104.7 de la CEI 60056. Pendant les essais synthétiques, la tension de rétablissement est fournie par le circuit de tension soit directement soit mis en série avec le circuit de courant. Cela fait apparaître une tension continue, une tension alternative ou leur combinaison, qui, dans la plupart des cas, décroît du fait de l'énergie limitée de la source de tension. Il peut alors ne pas être possible de maintenir la tension de rétablissement pendant au moins 0,1 s comme demandé au 6.104.7 de la CEI 60056. Ces écarts peuvent être acceptés si les conditions suivantes sont remplies:

- La valeur instantanée de la tension de rétablissement pendant une période égale au 1/8 d'un cycle de la fréquence assignée du disjoncteur ne doit pas être inférieure à la valeur instantanée équivalente de la tension de rétablissement à fréquence industrielle indiquée au 6.104.7 de la CEI 60056 qui apparaît avec une valeur crête minimale de  $0,95 h \sqrt{2} U / \sqrt{3}$ .  
 $h$  = facteur de premier pôle (1,3 ou 1,5)  
 $U$  = tension assignée du disjoncteur.
- Si une tension de rétablissement continue, alternative, ou alternative et continue combinée décroissant exponentiellement est utilisée, sa valeur instantanée (pour la tension continue) ou sa valeur crête (dans les autres cas) devrait être, en principe, maintenue aussi près que possible de  $\sqrt{2} U / \sqrt{3}$  et dans tous les cas, ne doit pas descendre au-dessous de  $0,5 \sqrt{2} U / \sqrt{3}$  en moins de 0,1 s (voir figure 2).
- Si une tension de rétablissement comme ci-dessus impose une contrainte incorrecte au disjoncteur par rapport à celle spécifiée dans les conditions du réseau de référence, on recherchera un autre circuit d'essai satisfaisant mieux à 6.104.7 de la CEI 60056 et aux limites indiquées ci-dessus.

The above implies strict requirements for the test circuit. The requirements are given for the current injection method in 4.2.1 and for the voltage injection method in 4.2.2.

NOTE Depending on the test circuit used, the interaction between circuit and test circuit-breaker may be disturbed by the behaviour of the auxiliary circuit-breaker during the critical interval around current-zero.

The arc-voltage of the auxiliary circuit-breaker should be less than or equal to the arc-voltage of the test circuit-breaker.

If an auxiliary circuit-breaker with a higher arc-voltage is used, a higher power-frequency voltage of the current circuit may be necessary.

### 4.1.3 High-voltage interval

During the high-voltage interval the gap of the test circuit-breaker is stressed by the recovery voltage.

The prospective TRV shall comply with the requirements of 4.102, 4.105, 4.106 and 6.104.5 of IEC 60056. Suitable methods for determining the prospective TRV in synthetic test circuits can be selected from annex GG of IEC 60056.

The impedance of the voltage circuit shall be low enough to give clear evidence of breakdown, if any.

NOTE 1 If the test circuit-breaker is fitted with low ohmic parallel resistors, a special procedure may be necessary (see annex FF).

NOTE 2 If the TRV is obtained from more than one source the overall wave shape should not show any appreciable discontinuity.

In principle, the power-frequency recovery voltage for the basic short-circuit test-duties shall equate with the requirements of 6.104.7 of IEC 60056. In synthetic testing the recovery voltage is supplied from the voltage circuit, either directly or in series with the 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 as specified in 6.104.7 of IEC 60056. Deviations from the specified recovery voltage are acceptable if the following conditions are met:

- The instantaneous value of the recovery voltage during a period equal to  $1/8$  of a cycle of the rated frequency of the circuit-breaker shall be not less than the equivalent instantaneous value of the power-frequency recovery voltage specified in 6.104.7 of IEC 60056 which starts with a minimum peak value of  $0,95 h \sqrt{2} U / \sqrt{3}$ .  
 $h$  = first pole-to-clear factor (1,3 or 1,5).  
 $U$  = rated voltage of the circuit-breaker.
- Whether an exponentially decaying d.c., an a.c. or a combined a.c. and d.c. recovery voltage is used, its instantaneous value (for d.c.) or its peak value (or a.c. or combined a.c. and d.c.) should in principle be kept as close as possible to  $\sqrt{2} U / \sqrt{3}$  and in any case must not fall below  $0,5 \sqrt{2} U / \sqrt{3}$  in less than 0,1 s (see figure 2).
- If an exponentially decaying d.c. or a combined a.c. and d.c. recovery voltage imposes an inappropriate stress on the circuit-breaker compared to that due to the specified a.c. recovery voltage in reference system conditions, then a more appropriate circuit may be used taking into account 6.104.7 of IEC 60056 and also the limits stated above.

## 4.2 Exigences spécifiques de chaque circuit d'essais synthétiques pour les essais de coupure

### 4.2.1 Méthodes par injection de courant

En termes généraux, ces méthodes peuvent se décrire ainsi (voir annexe BB):

- le courant de la source de tension est superposé au courant dans le disjoncteur en essai avant la période d'interaction;
- un disjoncteur auxiliaire coupe le courant de la source de courant avant la période d'interaction.

Pendant la période d'interaction, le disjoncteur en essai est soumis à la tension du circuit de tension dont l'impédance représente celle du réseau de référence. Cela explique la validité des méthodes par injection de courant. Plusieurs méthodes de ce type sont connues mais seule l'injection de courant parallèle est décrite ici puisque c'est celle utilisée par la plupart des laboratoires d'essais. Les conditions suivantes doivent être remplies:

#### a) Circuit représentant la TTR

- 1) La forme et l'amplitude de la TTR présumée doivent satisfaire aux exigences spécifiées.
- 2) L'impédance d'onde équivalente  $Z_h$  (voir figure 3) doit, idéalement être égale à  $(du/dt)/(di/dt)$  pendant la période d'interaction:  $du/dt$  est la pente de la tension transitoire de rétablissement spécifiée et  $di/dt$  est la pente du courant de court-circuit spécifié.
- 3) La combinaison des capacités  $C_{dh}$  localisées ou réparties, en parallèle avec  $Z_h$  provoque le temps de retard  $t_d = Z_h C_{dh}$ .

#### b) Inductance de la source de tension

La valeur de l'inductance doit être comprise entre 1,0 et 1,5 fois l'inductance calculée à partir de la tension à fréquence industrielle équivalente divisée par le courant présumé.

#### c) Fréquence du courant injecté et instant d'injection

La fréquence du courant injecté sera de préférence de l'ordre de 500 Hz avec une limite inférieure de 250 Hz et une limite supérieure de 1 000 Hz.

L'instant initial du courant injecté sera ajusté de façon telle que le temps durant lequel le disjoncteur en essai est alimenté uniquement par le courant injecté soit moins d'un quart de période de la fréquence du courant injecté, avec un maximum de 500  $\mu$ s.

C'est pour éviter une déformation anormale du courant à fréquence industrielle que la limite inférieure est fixée à 250 Hz.

La fréquence maximale du courant injecté est déterminée par la période de changement significatif de la tension d'arc, période qui doit être plus courte que le temps pendant lequel l'arc est alimenté uniquement par le courant injecté. Pour cela, la période du courant injecté devra être au moins quatre fois la durée du changement significatif de tension d'arc (voir annexe BB).

NOTE Il est conseillé de veiller à ne pas contraindre indûment le disjoncteur lorsque le temps où le disjoncteur en essai est alimenté seulement par le courant injecté est inférieur à 200  $\mu$ s.

#### d) Forme de l'onde de courant injecté

La pente présumée de décroissance  $(di/dt)$  du courant injecté doit correspondre à celle du courant présumé à fréquence industrielle.

Pratiquement, aucune oscillation ne doit perturber le courant injecté pendant au moins 100  $\mu$ s avant le zéro de courant.

## 4.2 Synthetic test circuits and related specific requirements for breaking tests

### 4.2.1 Current injection methods

These methods can be described in terms of general principles as follows (see annex BB):

- the current from the voltage source is superimposed on the current in the test circuit-breaker prior to the interaction interval;
- an auxiliary circuit-breaker interrupts the current from the current circuit prior to the interaction interval.

During the interaction interval the test circuit-breaker is exposed to the voltage of the voltage circuit having an impedance which is representative of the reference system conditions. This explains the validity of current injection methods. Several current injection methods are known but only the conditions for parallel current injection are given below since this method is used by the majority of the test laboratories. The following conditions shall be met:

#### a) TRV wave-shaping circuit

- 1) The shape and magnitude of the prospective TRV shall comply with the specified values.
- 2) Ideally the equivalent surge impedance  $Z_h$  (see figure 3) shall be equal to  $(du/dt)/(di/dt)$  during the interaction interval.  $(du/dt)$  is the rate of rise of the specified transient recovery voltage and  $di/dt$  is the rate of decrease of the specified short-circuit current.
- 3) The combination of the stray and lumped capacitance  $C_{dh}$  in parallel with  $Z_h$  gives rise to the delay time  $t_d = Z_h C_{dh}$ .

#### b) Inductance of the voltage circuit

The value of the inductance of the voltage circuit shall be between 1,0 and 1,5 times the inductance derived from the equivalent power-frequency voltage divided by the prospective current.

#### c) Frequency of the injected current and the injection timing

The frequency of the injected current shall preferably be of the order of 500 Hz with a lower limit of 250 Hz and an upper limit of 1 000 Hz.

The initiation of the injected current shall be adjusted such that the time, during which the test circuit-breaker is fed only by the injected current, is not more than a quarter of the period of the injected current frequency with a maximum of 500  $\mu$ s.

In order to prevent undue influence on the wave shape of the power-frequency current, the lower limit of the frequency of the injected current is 250 Hz.

The maximum frequency of the injected current is determined by the interval of significant change of arc-voltage, which interval shall be smaller than the time for which the arc is fed only by the injected current. To achieve this, the period of the injected frequency should be at least four times the interval of significant change of arc-voltage (see annex BB).

NOTE Attention should be paid to the possible overstressing of the circuit-breaker if the time that the test circuit-breaker is fed by the injected current only is less than 200  $\mu$ s.

#### d) Waveshape of the injected current

The prospective rate of decrease  $(di/dt)$  of the injected current shall correspond to that of the prospective power-frequency current.

The injected current shall be practically free of superimposed oscillations for a time not less than 100  $\mu$ s before current-zero.

#### 4.2.2 Méthode par injection de tension

Plusieurs méthodes par injection de tension sont connues, mais seule la méthode d'injection série est décrite ici en termes généraux comme suit (voir aussi l'annexe CC):

- La tension fournie par la source de tension est appliquée au disjoncteur en essai après la période d'interaction.
- Un disjoncteur auxiliaire et un condensateur en parallèle avec lui permettant d'appliquer la tension de rétablissement au disjoncteur en essai.
- Pendant les périodes de fort courant et d'interaction, seule la source de courant alimente le disjoncteur en essai.

Si cette méthode est utilisée pour vérifier l'absence de réallumages thermiques, par exemple pendant les essais de défauts aux bornes avec application de la tension transitoire de rétablissement initiale (TTRI) ou pendant les essais de défauts proches en ligne, il est nécessaire de démontrer la validité du circuit d'essai pendant la période d'interaction. Cela est soumis à un accord entre constructeur, utilisateur et représentant de la station d'essais.

Si cette méthode est utilisée pour vérifier l'absence de réamorçages diélectriques, les conditions suivantes doivent être respectées:

- il convient que le disjoncteur auxiliaire ait une tension d'arc inférieure ou égale à celle du disjoncteur en essai. Cette condition est remplie si les pointes d'extinction des deux disjoncteurs sont sensiblement les mêmes (voir la note du 4.1.2);
- l'impédance du circuit de tension doit être assez faible pour permettre les réallumages ou les réamorçages s'ils apparaissent.

La capacité aux bornes du disjoncteur auxiliaire doit donc être d'au moins 10 nF. Il convient de prendre des dispositions pour éviter une distorsion anormale du courant avant le zéro de courant à fréquence industrielle;

- aucune interruption de la contrainte ne doit provenir de la combinaison du circuit de courant et du circuit de tension.

NOTE Pour les essais de défauts proches en ligne, en complément de la source d'injection de tension appliquant la TTR du côté réseau, une source d'injection de courant peut être reliée du côté ligne du disjoncteur en essai pour appliquer la composante de la TTR provenant de cette ligne courte.

#### 4.2.3 Circuit de Skeats (ou par transformateur)

Cette méthode est principalement caractérisée comme suit (voir aussi l'annexe DD):

- les courant et tension proviennent d'une même source;
- la tension de rétablissement à fréquence alternative est fournie par un transformateur élévateur dont le primaire est raccordé à la source de courant;
- la tension de rétablissement est appliquée au disjoncteur en essai par l'intermédiaire d'une impédance (généralement une résistance).

Le disjoncteur auxiliaire coupe le courant avant le disjoncteur en essai (le plus souvent environ 10  $\mu$ s). Pendant ce court intervalle de temps, la valeur de la pente de courant  $di/dt$  dans le disjoncteur en essai est diminuée.

Ce circuit n'est donc pas valable pour réaliser des essais destinés à vérifier l'absence de réallumages thermiques du disjoncteur en essai.

Ce circuit convient pour essayer le comportement diélectrique du disjoncteur.

Ce circuit peut être utilisé pour les essais de fermeture.

#### 4.2.2 Voltage injection method

Several voltage injection methods are known but only series voltage injection is described here in general terms as follows (see also annex CC):

- The voltage from the voltage circuit is applied to the test circuit-breaker after the interaction interval.
- An auxiliary circuit-breaker with a parallel capacitor is used to apply the recovery voltage to the test circuit-breaker.
- During the high-current and interaction intervals the test circuit-breaker is exposed to the current circuit only.

If the voltage injection method is to be used to check the thermal behaviour of the circuit-breaker, i.e. to test under terminal fault conditions with initial transient recovery voltage (ITRV) stress or under short-line-fault conditions, it is necessary to demonstrate the validity of the test circuit for the interaction interval. This is subject to agreement between manufacturer, testing station and user.

When used for tests relating to the dielectric behaviour of the circuit-breaker, the following conditions shall be met:

- the auxiliary circuit-breaker should have an arc-voltage less than or equal to that of the test circuit-breaker. This condition is met if the extinction peaks of both circuit-breakers are approximately the same (see note in 4.1.2);
- the impedance of the voltage circuit shall be low enough to provide for reignitions or restrikes if they occur.

Therefore, the capacitance across the auxiliary circuit-breaker shall be at least 10 nF. Care should be taken to avoid undue distortion of the current before power-frequency current-zero;

- no pause shall be introduced by the combining of the current circuit and the voltage circuit.

NOTE For short-line fault tests, in addition to the voltage injection circuit supplying the source side TRV, a current injection circuit which is connected to the line-side terminal of the test circuit-breaker can be used to supply the line-side transient voltage.

#### 4.2.3 Duplicate circuit method (transformer or Skeats circuit)

This method can be described in terms of general principles as follows (see also annex DD):

- the current and voltage are supplied from the same source;
- the a.c. recovery voltage is supplied from a step-up transformer the primary of which is connected to the current circuit;
- the recovery voltage is applied to the test circuit-breaker through an impedance (normally a resistance).

The auxiliary circuit-breaker interrupts the current prior to the test circuit-breaker by a short time interval (usually about 10  $\mu$ s). During this short interval the value of  $di/dt$  of the current in the test circuit-breaker is decreased.

The test circuit is therefore not valid for tests where attention is paid to the thermal failure mode of the test circuit-breaker.

The test circuit is suitable for testing the dielectric behaviour of a circuit-breaker.

The test circuit can be used for making tests.

Il peut être facilement modifié pour fournir la pleine contrainte de tension pendant deux manoeuvres d'une séquence (ou plus), par exemple aux fermeture et ouverture d'un cycle CO, aux ouvertures d'un cycle O – t – CO et même à des zéros de courant consécutifs d'une manoeuvre d'ouverture. Voir l'annexe DD.

#### 4.2.4 Autres méthodes d'essais synthétiques

D'autres méthodes peuvent être valables ou avantageuses pour l'essai de disjoncteurs de caractéristiques spécifiques ou pour l'essai de disjoncteurs à des performances spécifiques. Même lorsque ces méthodes ne sont pas décrites dans la présente norme, il peut être possible de les appliquer sous réserve d'une étude détaillée des conditions d'utilisation et de l'accord du constructeur et de l'utilisateur.

Les méthodes synthétiques pour des essais triphasés de coupure de court-circuit sont décrites dans la CEI 61633.

Une méthode d'essai, applicable aux disjoncteurs munis d'une résistance parallèle, est décrite dans l'annexe FF.

### 5 Essais d'établissement en court-circuit

#### 5.1 Principes fondamentaux et exigences générales pour les essais synthétiques d'établissement en court-circuit

Pendant une fermeture sur un court-circuit, la distance entre contacts du disjoncteur est soumise à une tension correspondant à la valeur efficace de la tension assignée par  $\sqrt{3}$ , contrainte qui cause son franchissement. Après cet instant, le disjoncteur supporte le courant de fermeture qui s'exprime par sa valeur crête  $i$  dans la figure 4 (voir 4.103 de la CEI 60056).

Dans un circuit d'essais synthétiques, la tension appliquée est fournie par une source de tension séparée et le courant de court-circuit par une source de courant à tension réduite. Cette dernière est connectée au disjoncteur immédiatement après franchissement de l'espace entre contacts au moyen d'un enclencheur rapide, par exemple un éclateur commandé.

Toute méthode particulière d'essais synthétiques doit fournir les contraintes valides sur le disjoncteur en essai. Généralement, cette validité est établie quand les exigences ci-dessous sont respectées.

##### *Périodes principales*

Avant la fermeture, un disjoncteur supporte entre ses contacts la tension assignée entre phase et terre; à la fermeture, il est traversé par le courant de court-circuit assigné. Si les contraintes de tension et de courant sont plus finement étudiées pendant cet essai de fermeture – figure 4 – trois périodes principales apparaissent:

- La période de haute tension

La période de haute tension est le temps entre le commencement de l'essai, disjoncteur ouvert, et le moment de l'amorçage de l'espace entre contact.

- La période de pré-arc

La période de pré-arc est le temps, pendant le déplacement en fermeture des contacts du disjoncteur, entre l'instant d'amorçage de l'espace entre contacts et l'instant où les contacts se touchent.

- La période d'arrêt

La période d'arrêt est le temps, pendant la fermeture du disjoncteur, séparant l'instant où les contacts se touchent de l'instant où le mouvement des contacts s'arrête (position fermée).

The test circuit can easily be adapted to supply full voltage stresses in two (or more) operations e.g. at both closing and opening in a CO operation, at both openings in an O – t – CO operation or even at consecutive current-zeros in an opening operation. See annex DD.

#### 4.2.4 Other synthetic test methods

Other methods may prove correct and advantageous for testing of circuit-breakers with specific characteristics or for testing of a circuit-breaker for specific performance. Even though these methods are not covered by this standard, they can be used subject to understanding of their application and agreement between the manufacturer and the user.

Synthetic methods for three-phase short-circuit breaking tests are reported in IEC 61633.

A method available for testing circuit-breakers having parallel resistors is reported in annex FF.

## 5 Short-circuit making tests

### 5.1 Basic principles and general requirements for synthetic making test methods

During a closing operation onto a short-circuit, the circuit-breaker contact gap is subjected to the applied voltage corresponding to the r.m.s. value of the rated voltage divided by  $\sqrt{3}$  which causes its breakdown. After this moment, the circuit-breaker is subjected to the making current which is expressed by its maximum amplitude  $i$  in figure 4 (see 4.103 of IEC 60056).

In a synthetic test circuit the applied voltage is supplied by a separate voltage source and the short-circuit current is supplied by a reduced voltage current circuit. This latter is connected to the circuit-breaker immediately after breakdown of the contact gap by means of a fast making device, e.g. a triggered spark gap.

Any particular synthetic method chosen for testing shall adequately stress the test circuit-breaker. Generally the adequacy is established when the test method meets the requirements set forth in the following subclauses.

#### *Basic intervals*

Prior to making, a circuit-breaker withstands the rated phase-to-earth voltage applied across its terminals; during making, it carries the rated short-circuit current. If closer attention is paid to the voltage and current stresses during the making test – figure 4 – three main intervals can be recognised:

- High-voltage interval

The high-voltage interval is the time from the commencement of the test, with the circuit-breaker in the open position, to the moment of breakdown across the contact gap.

- Pre-arcing interval

The pre-arcing interval is the time, during the closing stroke of the circuit-breaker, from the moment of breakdown across the contact gap to the touching of the contacts.

- Latching interval

The latching interval is the time, during the closing stroke of the circuit-breaker, from the touching of the contacts to the moment when the contacts reach the fully closed (latched) position.

### 5.1.1 Période de haute tension

Pendant cette période, le disjoncteur se verra appliquer par le circuit d'essais des conditions initiales de la période de pré-arc identiques, sous réserve de certaines tolérances à spécifier, à celles imposées par le réseau de référence, dans les conditions correspondantes à l'essai.

Les conditions suivantes devront donc être respectées:

- La tension appliquée satisfera à la prescription du 6.104.1 de la CEI 60056.
- L'écart de phase entre la tension appliquée et le courant de court-circuit devra correspondre au facteur de puissance assignée du circuit d'essai avec les tolérances indiquées au 6.103.1 de la CEI 60056.

### 5.1.2 Période de pré-arc

Pendant cette période, des forces électrodynamiques sont produites par le courant sur le disjoncteur et l'énergie d'arc produit des dégradations. En général, le courant possède trois composantes:

- le courant transitoire initial de fermeture, ITMC,
- les composantes continue et alternative du courant de court-circuit.

Deux cas typiques peuvent se présenter selon l'instant de fermeture et le type du disjoncteur:

- L'amorçage apparaît près de la crête de la tension appliquée, établissant un courant presque symétrique: l'énergie du pré-arc et l'ITMC sont relativement élevés.
- L'amorçage apparaît près du zéro de la tension appliquée, établissant un courant asymétrique. L'énergie de pré-arc et l'ITMC sont négligeables sauf dans le cas de fermeture non simultanée dans un pôle multichambres.

NOTE L'ITMC n'est pas défini, explicitement au 4.103 de la CEI 60056, mais une valeur permettant de maintenir le pré-arc suffit pour l'essai.

### 5.1.3 Période d'arrêt et position de fermeture complète

Pendant ces périodes, le disjoncteur doit se fermer en présence des forces électrodynamiques dues au courant, et des forces de frottement des contacts. Le courant de fermeture doit donc satisfaire aux conditions du 4.103 de la CEI 60056 pendant ces périodes.

## 5.2 Circuit d'essais synthétiques pour essais de fermeture et exigences spécifiques s'y rapportant

### 5.2.1 Circuit d'essais

Comme on peut le voir à la figure 6, le circuit d'essai se compose de deux sources, à savoir le circuit de courant et le circuit de tension.

- Le circuit de tension, composé principalement d'un transformateur de faible puissance, fournit:
  - la tension appliquée pendant la période de contrainte diélectrique;
  - l'ITMC pendant la période de courant de pré-arc, par la décharge du circuit ITMC.
- Le circuit de courant à fréquence industrielle fournit le courant de fermeture pendant les périodes de courant de pré-arc et d'arrêt.

### 5.1.1 High-voltage interval

During this interval the circuit-breaker shall be stressed by the test circuit in such a way that the starting conditions for the pre-arcing interval, within the tolerances to be specified, are the same as under reference system conditions.

Therefore the following conditions shall be met:

- The applied voltage shall comply with the requirement set forth in 6.104.1 of IEC 60056.
- The phase relationship between the applied voltage and the short-circuit current shall correspond to the rated power factor of the test circuit within the tolerances given in 6.103.1 of IEC 60056.

### 5.1.2 Pre-arcing interval

During pre-arcing the circuit-breaker is subjected to electrodynamic forces due to the current and to deteriorating effects due to arc-energy. In general the current is composed of three components:

- the initial transient making current, ITMC,
- the d.c. and a.c. components of the short-circuit current.

Two typical cases may occur depending on the moment of closing and on the circuit-breaker design:

- Breakdown occurs near the crest of the applied voltage; an almost symmetrical current is established. Pre-arc energy and ITMC are relatively high.
- Breakdown occurs near zero of the applied voltage; an asymmetrical current is established. Pre-arc energy and ITMC are negligible with the exception of the case of non-simultaneous closing in a multi-unit pole.

NOTE The ITMC is not defined in 4.103 of IEC 60056; a value sufficient to maintain pre-arcing is adequate.

### 5.1.3 Latching interval and fully closed position

During these intervals the circuit-breaker has to close in presence of the electrodynamic forces due to the current and contact friction forces. Therefore during these intervals the making current shall comply with 4.103 of IEC 60056.

## 5.2 Synthetic test circuit and related specific requirements for making tests

### 5.2.1 Test circuit

The test circuit is made up with two sources namely the current and the voltage circuit as shown in figure 6.

- The voltage circuit, which mainly consists of a low power transformer, supplies:
  - the applied voltage during the high-voltage interval;
  - the ITMC during the pre-arcing interval, by the discharge of the ITMC-circuit.
- The current circuit supplies the making current during the pre-arcing, and latching intervals.

### 5.2.2 Conditions spécifiques

Lors d'un essai synthétique de fermeture, le déphasage entre la tension d'essai appliquée et le courant de court-circuit dépend des paramètres suivants:

- déphasage entre  $u_1$  et  $u_2$ ;
- temps de retard des enclencheurs;
- tension minimale d'amorçage de l'éclateur-enclencheur commandé.

Le déphasage entre la tension appliquée et le courant de court-circuit doit être de  $90 \pm 27$  degrés électriques.

Le courant injecté fourni par le circuit de tension permet au courant de pré-arc de s'établir avant l'amorçage de l'éclateur. En conséquence, la constante de temps du circuit ITMC sera plus grande que le temps de retard de l'éclateur de fermeture.

NOTE La source de tension  $u_2$  est soit une source alternative soit une source continue.

## 6 Exigences particulières pour les essais synthétiques d'établissement et de coupure relatives aux prescriptions des paragraphes 6.102 à 6.111 de la CEI 60056

Les paragraphes 6.102 à 6.111 de la CEI 60056 sont également applicables aux essais synthétiques. Cependant, des procédés spéciaux sont nécessaires dans les quelques cas qui sont mentionnés dans les paragraphes de cet article. Ces paragraphes se réfèrent à ceux de la CEI 60056 de mêmes numéros.

### 6.102.1.3 Essais en plusieurs parties

Des méthodes d'essais synthétiques des disjoncteurs équipés de résistances de faible valeur en parallèle sont données dans l'annexe FF.

### 6.102.2 Disposition du disjoncteur pour les essais

Pour les méthodes synthétiques relatives aux circuits triphasés, se reporter à la CEI 61633.

### 6.102.9 Disjoncteur comportant de courtes durées d'arc

De manière à réaliser les essais synthétiques avec les mêmes bases que les essais directs, il sera normalement nécessaire d'utiliser les méthodes spéciales de réallumages pour maintenir l'arc du disjoncteur en essai pendant le nombre nécessaire de zéros du courant à fréquence industrielle. L'annexe HH donne des exemples de circuits permettant la prolongation de l'arc.

NOTE Une méthode utilisant l'application multiple de la source de tension requiert en pratique une procédure identique à celle des essais directs. La source de tension est connectée au disjoncteur en essai à chaque zéro de courant. Si le disjoncteur en essai interrompt au moment d'un zéro, la procédure est arrêtée. Si le disjoncteur en essai réallume, la source de courant est alors connectée à nouveau en réallumant le disjoncteur auxiliaire. Au même moment, la source de tension est déconnectée, puis connectée à nouveau au zéro de courant suivant et sa polarité est inversée comme il convient. Toutefois, cette procédure est rarement utilisée à cause de sa complexité.

La méthode «pas à pas» est la méthode utilisée dans la plupart des essais synthétiques. La méthode est considérée comme étant une approximation suffisamment proche de la procédure d'essais directs.

### 5.2.2 Specific requirements

During a synthetic making test the phase relationship between the applied test voltage and the short-circuit current depends on the following parameters:

- phase displacement between the current source voltage  $u_1$  and the voltage source voltage  $u_2$ ;
- delay time of making gap;
- minimum sparkover voltage of making gap.

The phase displacement between the applied voltage and the short-circuit current shall be  $90 \pm 27$  electrical degrees.

The injected current supplied by the voltage circuit ensures pre-arcing before the closing of the fast make gap. Therefore the time constant of ITMC-circuit shall be longer than the make gap delay time.

NOTE The voltage source  $u_2$  may be an a.c. or a d.c. source.

## 6 Specific requirements for synthetic tests for making and breaking performance related to the requirements of subclauses 6.102 to 6.111 inclusive of IEC 60056

Subclauses 6.102 to 6.111 inclusive of IEC 60056 are also applicable for synthetic testing. However, in some cases special techniques are necessary. These cases are mentioned in the subclauses of this clause. The numbering of the subclauses corresponds to that of IEC 60056.

### 6.102.1.3 Multi-part testing

For synthetic methods for the testing of circuit-breakers fitted with low-ohmic parallel resistors see annex FF.

### 6.102.2 Arrangement of circuit-breaker for tests

For synthetic methods for three-phase testing refer to IEC 61633.

### 6.102.9 Circuit-breakers with short arcing times

In order to be able to perform synthetic tests on the same basis as direct tests, normally it will be necessary to apply special reignition methods to prolong the arcing of the test circuit-breaker through the necessary number of zeros of the power-frequency current. See annex HH for reignition methods to prolong arcing.

NOTE A method with multiple application of the voltage source involves practically the same procedure as for direct testing. 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. However, such a procedure is rarely used, because of its complexity.

The "step-by-step" method is the method used on most synthetic tests. The method is considered to be a sufficiently close approximation of the direct testing procedure.

La durée d'arc est prolongée par réallumages thermiques. Etant donné que cette méthode permet d'imposer que le disjoncteur en essai réallume en toutes circonstances, on doit veiller à ne pas réallumer le disjoncteur à un zéro de courant où il peut couper. Pour cela, il est nécessaire de déterminer pour chaque essai de défaut aux bornes, de défaut proche en ligne et de discordance de phase, la durée d'arc minimale du disjoncteur. Au moins deux essais, une coupure et un réallumage, sont nécessaires à cette détermination. La différence de durée d'arc entre ces deux essais est limitée à environ 1 ms.

La coupure au temps d'arc minimal est la première coupure valable.

L'autre essai est aussi réalisé pour prouver que le réallumage à un zéro de courant prématuré, c'est-à-dire avec un temps d'arc juste inférieur au temps d'arc minimal, lors d'une coupure à un temps d'arc maximal, se produirait entre les contacts d'arc.

NOTE 1 Les essais supplémentaires nécessaires pour prouver le comportement correct aux zéros de courant prématurés ne contribueront généralement que dans une faible mesure à l'usure des contacts, etc., étant donné la courte durée d'arc. C'est pourquoi la remise en état de l'appareil n'est pas nécessaire du fait de ces essais.

NOTE 2 Le ou les réallumages obtenus durant la détermination de la durée d'arc minimale n'indiquent pas un défaut du disjoncteur. Cependant, il est important de vérifier que ce réallumage s'est produit entre les contacts d'arc uniquement. Cela permet de prouver la coordination de la tenue en tension lors des réallumages diélectriques, au moins pour la position des contacts correspondante. Lorsque l'on utilise une méthode par injection de courant, la coupure du courant injecté quelques alternances après le réallumage est souvent un moyen utile d'appréciation. L'examen détaillé des écrans, des contacts d'arc et des contacts principaux, etc., a aussi lieu d'être effectué pour vérifier le comportement correct.

Pour les essais de défaut en ligne, le réallumage est généralement dû à un échec thermique, aussi la coordination de la tenue en tension ne peut être concernée.

NOTE 3 Ce paragraphe traite des disjoncteurs à durée d'arc courte, mais les mêmes exigences sont en principe valables pour les disjoncteurs de durées d'arc plus longues.

## 6.106 Séquences d'essais de court-circuit fondamentales

Les séquences de manoeuvres pour les séries 1, 2, 3 et 5 et les variantes de la série 4 sont indiquées dans le tableau I.

Symboles:  $C_s$  = Manoeuvre de fermeture avec des paramètres spécifiques d'un circuit synthétique.

$O_s$  = Manoeuvre d'ouverture du courant avec des paramètres spécifiques d'un circuit synthétique.

$C_d$  = Manoeuvre de fermeture avec, pour tension appliquée réduite, la tension de la source de courant et, pour courant de fermeture, la valeur spécifiée.

$O_d$  = Manoeuvre d'ouverture du courant avec, pour tension de rétablissement transitoire et à fréquence industrielle, la tension réduite de la source de courant et, pour courant, le courant spécifié de coupure.

NOTE 1 Du fait des possibilités des moyens d'essai synthétique, il peut être difficile de respecter les intervalles de temps spécifiés des séquences de manoeuvres assignées (voir le 6.105.1 de la CEI 60056).

NOTE 2 Pour satisfaire à toutes les conditions d'essai, il peut être nécessaire de réaliser plus de manoeuvres qu'indiqué dans la séquence de manoeuvres assignée. Le disjoncteur peut alors être remis en état après le nombre de manoeuvres de la séquence assignée.

### 6.106.1

### 6.106.2 Séquences nos 1, 2 et 3

### 6.106.3

Pour les séquences d'essais nos 1, 2 et 3, seules les manoeuvres d'ouverture sont spécifiées.

The arcing is prolonged by means of thermal reignitions. As this method makes it possible to force the test circuit-breaker to reignite in all conditions, special care shall be taken not to reignite the circuit-breaker at the instant of a current-zero when the circuit-breaker can clear. For this purpose it is necessary to determine, for each terminal fault, short-line fault and out-of-phase test duty, the minimum arcing time of the circuit-breaker. At least two breaking tests, one clearance and one reignition, are necessary for this determination. The arcing time difference between these two tests is limited to about 1 ms.

The clearance at the minimum arcing time is the first valid breaking operation.

The other test is also performed to demonstrate that a reignition at an early current zero, for example with an arcing time just below the minimum arcing time, as during a breaking operation at maximum arcing time, would take place between the arcing contacts.

NOTE 1 The extra tests necessary to demonstrate correct behaviour at early current zeros will usually contribute insignificantly to contact wear, etc., due to the short arcing times. Therefore, no reconditioning should be necessary because of these tests.

NOTE 2 The reignition(s) obtained when determining the minimum arcing time do(es) not indicate a fault of the circuit-breaker. However, it is important to establish that this reignition has taken place between the arcing contacts only. This may demonstrate the voltage withstand co-ordination at dielectric reignition, at least for the actual contact position. When using a current injection method the interruption of the injected current a few loops after the reignition is often a useful means for the judgement. Thorough inspection of screens, arcing and main contacts, etc., should also be made to verify correct behaviour.

For short-line-fault tests the reignition will usually be due to thermal failure, so that the voltage withstand co-ordination will not be involved.

NOTE 3 Although this subclause refers to circuit-breakers with short arcing times, the same requirements are in principle valid for circuit-breakers with longer arcing times.

## 6.106 Basic short-circuit test-duties

The operating sequences for test duties Nos. 1, 2, 3 and 5 together with the various methods of carrying out test-duty No. 4 are shown in table I.

Symbols:  $C_s$  = Making operation with specified parameters in a synthetic circuit.  
 $O_s$  = Breaking operation with specified parameters in a synthetic circuit.  
 $C_d$  = Making operation with reduced applied voltage of the current source only and the specified making current.  
 $O_d$  = Breaking operation with reduced transient and power-frequency recovery voltages of the current source only and with the specified breaking current.

NOTE 1 Due to the characteristics of synthetic testing it may be difficult to comply with the specified time intervals of the rated operating sequence. See 6.105.1 of IEC 60056.

NOTE 2 In order to comply with all test requirements it may be necessary to make more operations than provided for in the rated operating sequence. In such cases the circuit-breaker may be reconditioned after the number of operations provided for in the rated operating sequence.

### 6.106.1

### 6.106.2 Test-duties Nos. 1, 2 and 3

### 6.106.3

For test-duties Nos. 1, 2, and 3, only breaking tests are specified.

#### 6.106.4 Séquence no. 4

Plusieurs procédures peuvent être utilisées pour réaliser la séquence de manoeuvre assignée synthétiquement avec les paramètres spécifiés (voir le tableau 1).

Les méthodes suivantes sont disponibles:

##### *Méthodes 1i) et 1ii)*

Les méthodes 1i) ou 1ii) doivent être utilisées lorsque la constante de temps du circuit d'essais est égale à la valeur spécifiée associée au pouvoir de coupure assigné en court-circuit défini en 4.101.2 de la CEI 60056.

Les raisons du premier Os sont

- a) de respecter l'exigence d'avoir deux ou trois coupures (selon la séquence) aux valeurs spécifiées;
- b) de donner les renseignements nécessaires pour permettre le réglage des ordres de déclenchement pendant la séquence de la manoeuvre suivante. Cela permet de déterminer les conditions du temps d'arc minimales, comme si des essais directs avaient été réalisés aux valeurs spécifiées. Ces conditions peuvent être reproduites pendant la manoeuvre Od dans la séquence de manoeuvre suivante.

Les conditions à remplir lors de cet essai en deux parties sont les suivantes:

- a) la manoeuvre de coupure Od doit être réalisée avec le même temps d'arc minimal obtenu lors de la précédente coupure Os. Normalement, des méthodes de réallumage (voir annexe HH) sont nécessaires pour réaliser cela;
- b) la commande de l'ordre de déclenchement des manoeuvres d'ouverture doit satisfaire aux prescriptions de 6.102.9 (B) de la CEI 60056. Les temps d'arc lors de cette séquence, pour les réseaux à neutre isolé ou à la terre, doivent être conformes à ceux indiqués en 6.102.9 (B)1) de la CEI 60056.

Dans cette séquence,

- a)  $Cs_{sym}$  a pour but de prouver l'enclenchement d'un courant symétrique égal au pouvoir de coupure en court-circuit selon 6.104.2 de la CEI 60056, avec une durée de pré-arc maximale. Cette manoeuvre de fermeture doit être réalisée avec une tension appliquée telle que celle spécifiée en 6.104.1 de la CEI 60056;
- b)  $Cd_{asy}$  a pour but de prouver le pouvoir de fermeture assigné en court-circuit selon 6.104.2 de la CEI 60056. Pour prouver cela, la manoeuvre de fermeture peut être réalisée sous tension réduite en accord avec les limites indiquées en 6.104.2;
- c) aucune remise en état n'est autorisée pendant les séquences 1i) ou 1ii).

La méthode 1ii) peut être utilisée comme alternative à la méthode 1i) lorsque la station d'essais ne peut pas fournir un circuit d'essais tel que le disjoncteur puisse enclencher un courant symétrique égal au pouvoir de coupure assigné en court-circuit, sous une tension telle que spécifiée au en 6.104.1 de la CEI 60056, lors de la séquence de manoeuvre assignée. Dans ce cas, une manoeuvre de fermeture supplémentaire  $Cs_{sym}$  doit être réalisée en enclenchant un courant symétrique égal au pouvoir de coupure assigné en court-circuit, comme indiqué en 6.104.2 de la CEI 60056, et une tension d'essais comme celle spécifiée en 6.104.1 de la CEI 60056.

##### *Méthodes 2i) et 2ii)*

Les méthodes 2i) ou 2ii) doivent être utilisées lorsque la constante de temps du circuit d'essais est inférieure à la valeur spécifiée associée au pouvoir de coupure assigné en court-circuit définie en 4.101.2 de la CEI 60056.

#### 6.106.4 Test-duty No. 4

Several procedures may be used to perform the rated operating sequence synthetically with the specified parameters (see table 1).

The following methods are available:

##### *Methods 1i) and 1ii)*

Method 1i) or 1ii) shall be used when the time constant of the test circuit is equal to the standard value used for the rated short-circuit breaking current as defined by 4.101.2 of IEC 60056.

The purpose of the first Os is

- a) to comply with the requirement to have two or three (depending on the sequence) breaking operations at the specified values;
- b) to provide the necessary information to enable the control of the tripping impulse to be set for the relevant requirements during the subsequent operating sequence. This enables the minimum arcing time conditions to be established, as if direct tests were performed at specified values. These can then be reproduced during the Od operation in the subsequent operating sequence.

The conditions to be fulfilled during this two-part test are the following:

- a) the breaking operation Od shall be performed under the same minimum arcing time conditions deriving from the previously conducted Os. Normally, reignition methods (see annex HH) are necessary to achieve this;
- b) the control of the tripping impulse for the breaking operations of the operating sequence shall be in accordance with the requirements of 6.102.9 (B) of IEC 60056. The arcing time sequence, for both isolated and earthed neutral systems, shall reproduce that given in 6.102.9 (B)1) of IEC 60056.

In this sequence

- a)  $C_{S_{sym}}$  is aimed at demonstrating the closing against a symmetrical current equal to the rated short-circuit breaking current according to 6.104.2 of IEC 60056, and the longest prestriking arc; this closing operation shall be carried out at an applied voltage as specified in 6.104.1 of IEC 60056;
- b)  $C_{d_{asy}}$  is aimed at demonstrating the rated short-circuit making current according to 6.104.2 of IEC 60056. For this demonstration, the closing operation can be performed at reduced voltage with the limits stated in 6.104.2;
- c) no maintenance is allowed during sequence 1i) or 1ii).

Method 1ii) can be used as an alternative to method 1i) where the testing station is not able to provide a test circuit such that the circuit-breaker is closed against a symmetrical current equal to the rated short-circuit breaking current at an applied voltage as specified in 6.104.1 of IEC 60056 during the rated operating sequence. In this case, performance of a separate closing operation  $C_{S_{sym}}$  against a symmetrical current equal to the rated short-circuit breaking current according to 6.104.2 of IEC 60056 at an applied voltage, as specified in 6.104.1 of IEC 60056, is required.

##### *Methods 2i) and 2ii)*

Method 2i) or 2ii) shall be used when the time constant of the test circuit is less than the standard value used for the rated short-circuit breaking current according to 4.101.2 of IEC 60056.

Les méthodes 2i) et 2ii) sont soumises aux mêmes règles et exigences que celles établies pour les méthodes 1i) et 1ii). A cause de la constante de temps du circuit d'essais, inférieure à la valeur spécifiée associée au pouvoir de coupure assigné en court-circuit définie en 4.101.2 de la CEI 60056, une manoeuvre de fermeture supplémentaire  $C_{dasy}$  doit être réalisée, avec un courant crête égal au pouvoir de fermeture assigné en court-circuit. Cette séquence d'essais supplémentaire nécessite une valeur de courant efficace plus élevée.

NOTE La crête du courant pendant la deuxième fermeture, lors de la séquence de manoeuvre assignée complète, sera inférieure au pouvoir de fermeture assigné en court-circuit à cause de la valeur réduite de la constante de temps.

La méthode 2ii) peut être utilisée comme alternative à la méthode 2i) lorsque la station d'essais ne peut pas fournir un circuit d'essais tel que le disjoncteur puisse enclencher un courant symétrique égal au pouvoir de coupure assigné en court-circuit, sous une tension telle que celle spécifiée en 6.104.1 de la CEI 60056, lors de la séquence de manoeuvre assignée. Dans ce cas, une manoeuvre de fermeture supplémentaire  $C_{ssym}$  doit être réalisée en enclenchant un courant symétrique égal au pouvoir de coupure assigné en court-circuit, comme indiqué en 6.104.2 de la CEI 60056, et une tension d'essais comme celle spécifiée en 6.104.1 de la CEI 60056.

#### Méthodes 3i) et 3ii)

Les méthodes 3i) ou 3ii) doivent être utilisées lorsque la constante de temps du circuit d'essais est supérieure à la valeur spécifiée associée au pouvoir de coupure assigné en court-circuit définie en 4.101.2 de la CEI 60056.

Les méthodes 3i) et 3ii) sont soumises aux mêmes règles et exigences que celles établies pour les méthodes 1i) et 1ii). A cause de la constante de temps du circuit d'essais, supérieure à la valeur spécifiée associée au pouvoir de coupure assigné en court-circuit défini en 4.101.2 de la CEI 60056, la crête de courant lors de la fermeture asymétrique  $C_{dasy}$  sera supérieure au pouvoir de fermeture assigné en court-circuit. Par conséquent, il convient que la manoeuvre de fermeture soit contrôlée par un système de synchronisation sur l'onde de tension pour obtenir le pouvoir de fermeture assigné en court-circuit. La réalisation de la séquence de manoeuvre assignée avec un courant symétrique égal au pouvoir de coupure assigné en court-circuit et avec la fermeture sur un courant complètement asymétrique (ou en contrôlant l'instant de fermeture par un dispositif de synchronisation) est soumise à l'accord du constructeur. Dans ce cas, la séquence de manoeuvre assignée peut n'être réalisée qu'une seule fois. Sinon, la séquence de manoeuvre assignée peut être réalisée avec la première manoeuvre de fermeture sur un courant symétrique égal au pouvoir de coupure assigné en court-circuit et la seconde fermeture à vide; dans ce cas, la capacité du disjoncteur à réaliser la séquence de manoeuvre assignée sera démontrée en répétant la séquence de manoeuvre assignée, avec des exigences associées et un courant symétrique inférieur au pouvoir de coupure assigné en court-circuit, de telle sorte que le pouvoir de fermeture assigné en court-circuit soit obtenu lors de la fermeture asymétrique. Lors de cette répétition de la séquence d'essais, les manoeuvres de fermeture peuvent être réalisées sous tension réduite.

NOTE Comme la capacité du disjoncteur à fermer sur le pouvoir de fermeture assigné en court-circuit est démontrée lors de la répétition de la séquence de manoeuvre, une manoeuvre de fermeture supplémentaire sur le pouvoir de fermeture assigné en court-circuit indiqué en 6.104.2 n'est pas demandée.

La méthode 3ii) peut être utilisée comme alternative à la méthode 3i) lorsque la station d'essais n'est pas capable de fournir un circuit d'essais tel que le disjoncteur puisse enclencher un courant symétrique égal au pouvoir de coupure en court-circuit, sous une tension telle que celle spécifiée en 6.104.1 de la CEI 60056, lors de la séquence de manoeuvre assignée. Dans ce cas, une manoeuvre de fermeture supplémentaire  $C_{ssym}$  doit être réalisée, en enclenchant un courant symétrique égal au pouvoir de coupure assigné en court-circuit, comme indiqué en 6.104.2 de la CEI 60056, et une tension d'essais comme celle spécifiée en 6.104.1 de la CEI 60056.

Lors de cette séquence d'essais, quand la répétition de la séquence de manoeuvre assignée est choisie, une remise en état est autorisée avant la répétition de la séquence.

Methods 2i) and 2ii) are subject to the same rules and requirements established for method 1i) and 1ii). Due to the smaller time constant of the test circuit with respect to the standard values used for the rated short-circuit breaking current as defined by 4.101.2 of IEC 60056, an additional separate closing operation  $Cd_{asy}$ , with current peak equal to the rated short-circuit making current shall be performed as a separate duty. This will require a higher r.m.s. value of current.

NOTE The current peak during the second closing in the complete rated operating sequence will be smaller than the rated short-circuit making current due to the smaller value of the time constant.

Method 2ii) can be used as an alternative to method 2i) where the testing station is not able to provide a test circuit such that the circuit-breaker closes against a symmetrical current equal to the rated short-circuit breaking current at an applied voltage as specified in 6.104.1 of IEC 60056 during the rated operating sequence. In this case, performance of an additional, separate closing operation  $Cs_{sym}$  is required against a symmetrical current equal to the rated short-circuit breaking current according to 6.104.2 of IEC 60056 at an applied voltage as specified in 6.104.1 of IEC 60056.

#### *Methods 3i) and 3ii)*

Method 3i) or 3ii) shall be used when the time constant of the test circuit is greater than the standard value used for the rated short-circuit breaking current according to 4.101.2 of IEC 60056.

Methods 3i) and 3ii) are subject to the same rules and requirements established for method 1i) and 1ii). Due to the larger time constant of the test circuit with respect to the standard value used for the rated short-circuit breaking current according to 4.101.2 of IEC 60056, the current peak during the asymmetrical closing  $Cd_{asy}$  will be larger than the rated short-circuit making current. Therefore, the closing operation may be controlled by use of point-on-wave control to obtain the rated short-circuit making current. Performance of the rated operating sequence with symmetrical current equal to the rated short-circuit breaking current and closing against a fully asymmetrical current (or using point-on-wave control) is subject to the consent of the manufacturer. In such a case, the rated operating sequence need be performed only once. Alternatively, the rated operating sequence can be performed with the first closing operation against a symmetrical current equal to the rated short-circuit breaking current and the second closing operation at no load; in this case, evidence of the ability of the circuit-breaker to perform the rated operating sequence will be demonstrated by repeating the rated operating sequence, with relevant requirements, and a symmetrical current smaller than the rated short-circuit breaking current in such a manner that the rated short-circuit making current is obtained in the asymmetrical closing. During this repeated duty, the closing operations may be performed at reduced voltage.

NOTE Since the ability of the circuit-breaker to close against the rated short-circuit making current is proven during the repeated duty, a separate closing operation against the rated short-circuit making current according to 6.104.2 is not required.

Method 3ii) can be used as an alternative to method 3i) where the testing station is not able to provide a test circuit such that the circuit-breaker closes against a symmetrical current equal to the rated short-circuit breaking current at an applied voltage as specified in 6.104.1 of IEC 60056 during the rated operating sequence. In this case, performance of an additional, separate, closing operation  $Cs_{sym}$  is required against a symmetrical current equal to the rated short-circuit breaking current according to 6.104.2 of IEC 60056 at an applied voltage as specified in 6.104.1 of IEC 60056.

During this test sequence, when repetition of the rated operating sequence is adopted, maintenance is permitted before the repetition of the duty.

### 6.106.5 Séquence n° 5

Pour les disjoncteurs à durée d'arc courte, trois manoeuvres d'ouverture doivent être faites quelle que soit la séquence de manoeuvres assignée.

NOTE Pour que le disjoncteur en essai soit soumis aux contraintes effectives et pour établir la durée d'arc minimale on peut faire un essai supplémentaire. Pour cet essai, l'ordre de déclenchement est placé comme pour la première manoeuvre valide, soit pendant ou même avant la petite alternance et l'injection de TTR après la petite alternance. Le disjoncteur devra réallumer dans cet essai. Il est important d'établir que le réallumage a eu lieu seulement entre les contacts (d'arc). Cela démontre la coordination des tenues en tension pendant les réamorçages diélectriques.

Pendant les essais avec courant asymétrique, la pente  $di/dt$  et la TTR sont modifiées par la présence de la composante continue. Pour les essais synthétiques, ces modifications doivent être préparées par:

a) Le contrôle de la composante continue du courant

La composante continue peut être contrôlée en choisissant le point de l'onde auquel le court-circuit est provoqué.

b) La réduction de  $di/dt$  au zéro de courant

La réduction de  $di/dt$  peut être obtenue pour les méthodes d'injection de courant, en réduisant la tension de charge du circuit de tension.

La formule à appliquer pour la détermination de la tension de charge réduite est:

$$U_{HA} = U_{HS} \left[ \sqrt{1 - p^2} \pm \frac{p}{2\pi f \cdot \tau} \right] \quad \begin{array}{l} + \text{ grande alternance} \\ - \text{ petite alternance} \end{array}$$

où

$U_{HA}$  = tension de charge réduite pour l'essai asymétrique

$U_{HS}$  = tension de charge pour l'essai symétrique équivalent

$p$  = composante continue à l'instant du zéro de courant, par unité

$\tau$  = constante de temps selon la CEI 60056 (45 ms).

$p$  peut être calculée à partir de l'asymétrie au moment de la séparation des contacts  $p_{sc}$  avec:

$$p = p_{sc} \cdot e^{-\frac{t_a}{\tau}}$$

où

$t_a$  = durée d'arc

c) Correction de la TTR

1) Méthode simplifiée

Pour les TTR dont le temps  $t_2$  n'excède pas 500  $\mu s$ , une méthode simplifiée peut être utilisée. Celle-ci suppose que la correction de TTR ( $u_1$ ,  $t_1$ ,  $u_c$ ,  $t_2$ ) est proportionnelle à la correction des  $di/dt$ .

Alors la correction de TTR est automatiquement obtenue par l'application de b).

2) La méthode simplifiée ci-dessus n'est pas applicable à une TTR où  $t_2$  est supérieure à 500  $\mu s$ . Dans ce cas, un autre circuit doit être utilisé. La TTR présumée demandée est indiquée dans le tableau II.

### 6.106.5 Test-duty No. 5

On circuit-breakers having short arcing times three breaking operations shall be made irrespective of the rated operating sequence.

NOTE In order to ensure that the test circuit-breaker is correctly stressed and to establish the minimum arcing time, an extra test may be made. For this test the setting of the control of the tripping impulse has to be as prescribed for the first valid operation, i.e. in or even before the minor loop. The injection of the TRV has to be applied after the minor loop. In this test the test circuit-breaker should reignite. It is important to establish that this reignition has taken place between the arcing contacts only. This demonstrates the voltage withstand co-ordination at dielectric reignitions.

During tests with asymmetrical current both  $di/dt$  and the TRV are modified due to the d.c. component. In synthetic tests these modifications have to be pre-arranged by:

a) Control of the d.c. component of the current

The d.c. component may be controlled by selection of the point on the wave at which the short-circuit is initiated.

b) Reduction of  $di/dt$  at current-zero

The reduction of  $di/dt$  may for current injection methods be obtained by reducing the charging voltage of the voltage circuit.

The formula to be applied for the determination of the reduced charging voltage is:

$$U_{HA} = U_{HS} \left[ \sqrt{1 - p^2} \pm \frac{p}{2\pi f \cdot \tau} \right] \begin{array}{l} + \text{ for major loop} \\ - \text{ for minor loop} \end{array}$$

where:

$U_{HA}$  = reduced charging voltage at asymmetrical test

$U_{HS}$  = charging voltage for equivalent symmetrical test

$p$  = the per unit value of the d.c. component at current zero

$\tau$  = time constant according to IEC 60056 (45 ms).

$p$  can be calculated from the asymmetry at contact separation  $p_{CS}$ :

$$p = p_{SC} \cdot e^{-\frac{t_a}{\tau}}$$

where:

$t_a$  = arcing time

c) Correction of TRV

1) Simplified method

For TRV's with time  $t_2$  not exceeding 500  $\mu s$ , a simplified method can be used. This method is based upon the supposition that the correction of TRV ( $u_1$ ,  $t_1$ ,  $u_c$ ,  $t_2$ ) is proportional to the correction for  $di/dt$ .

This means that the correction of TRV is automatically covered by the reduced  $di/dt$  according to b).

2) For TRV's with time  $t_2$  exceeding 500  $\mu s$  other corrections and/or circuit modifications have to be used. The required prospective TRV values are given in table II.

#### d) Correction de la tension de rétablissement

Quand l'essai représente la coupure à la fin d'une grande alternance, la forme apériodique de la tension de rétablissement réduite «couvrira» correctement le premier quart de période de la tension de rétablissement (de l'essai direct correspondant).

Ce n'est plus le cas pour la coupure à la fin d'une petite alternance, puisque la tension de rétablissement à fréquence industrielle continue normalement de croître après l'établissement de la TTR.

Sous réserve d'un accord entre la station d'essais, le constructeur et l'utilisateur, on peut juger que, avec les séquences d'essais asymétriques, on a assez d'éléments pour prouver les caractéristiques du disjoncteur. On estime qu'un essai asymétrique avec interruption après une petite alternance avec  $di/dt$  réduit et la TTR en résultant est moins sévère qu'un essai symétrique correspondant. Cependant, si l'on doit établir entièrement la validité de cette condition d'essai, on dispose de trois possibilités:

- 1) l'essai est réalisé avec des conditions de courant asymétrique avec une source de tension à pleine charge comme pour les essais symétriques. Il faut reconnaître que cela implique une augmentation considérable de la sévérité par rapport à un essai direct équivalent puisque  $di/dt$  et la TTR sont plus élevés;
- 2) l'essai est réalisé comme dans 1) mais l'inductance du circuit d'injection est augmentée en proportion inverse de  $di/dt$ . Dans ce cas, la valeur de  $di/dt$  est correcte, mais la TTR est plus élevée;
- 3) l'essai est réalisé avec une tension de rétablissement alternative.

#### 6.109 Essais de défaut proche en ligne

Pour les essais synthétiques de défaut proche en ligne, les paramètres du circuit représentant la ligne courte sont ceux indiqués dans la CEI 60056. Ce circuit doit être inséré dans le circuit de courant pendant la totalité de la période d'interaction.

Avec des circuits d'injection de courant, le circuit de ligne courte peut se mettre en série avec le circuit de tension, son inductance devenant une partie de  $L_h$ , par exemple comme indiqué à la figure BB.1.

Ce circuit de défaut proche en ligne introduit dans le circuit de tension peut engendrer des oscillations qui se superposent à l'onde de courant injecté. Il convient que ces oscillations soient amorties (pour satisfaire aux exigences du 4.2.1d), de manière à ne pas perturber le courant pendant la période de changement significatif de la tension d'arc ou au moins pendant 100  $\mu$ s avant le zéro du courant.

Une résistance mise en série dans le circuit de TTR peut convenir. Dans la plupart des cas, la résistance destinée à imposer la pente initiale de la tension de rétablissement est suffisante pour assurer l'amortissement nécessaire.

NOTE Il est recommandé d'apporter un soin particulier à la répartition des tensions et au mesurage des TTR présumées lorsque le circuit représentant la ligne courte et le circuit de tension sont du même côté du disjoncteur en essai.

#### 6.111 Méthodes d'essais synthétiques pour l'établissement et la coupure des courants capacitifs

Voir l'annexe GG.

#### d) Correction of recovery voltage

When a test is made for clearance at the end of a major loop the d.c. form of the reduced recovery voltage will adequately cover the first quarter loop of the recovery voltage (of an equivalent direct test).

For clearance at the end of a minor loop of current the d.c. form of the reduced recovery voltage will not cover reference system conditions since in the system the power-frequency recovery voltage continues to rise after the onset of the TRV.

Subject to agreement between testing station, manufacturer and user it may be considered that taken together with the symmetrical test-duties the evidence is sufficient to prove the performance of the circuit-breaker. An asymmetrical test with clearance after a minor loop with reduced  $di/dt$  and the resulting reduced TRV is assumed to be less severe than an equivalent symmetrical test. However, if it is required to prove fully this test condition, there are three possibilities:

- 1) the test is performed with asymmetrical current conditions with the voltage source charged as for the symmetrical test. It must be recognized that this represents a considerable increase in severity above that of an equivalent direct test since both  $di/dt$  and the TRV are higher;
- 2) the test is performed as under 1) except that the inductance of the injection circuit is increased in inverse proportion to  $di/dt$ . In this case, the  $di/dt$  value is correct but the TRV higher;
- 3) the test is performed with an a.c. recovery voltage.

#### 6.109 Short-line fault tests

For short-line fault synthetic testing the parameters of the short-line circuit shall be those given in IEC 60056 and the line circuit shall be in the current carrying circuit during the whole interaction interval.

With current injection circuits the short-line circuit may be connected in series with the voltage circuit, its inductance becoming part of  $L_1$ , e.g. as shown in figure BB.1.

The presence of the short-line fault circuit in the voltage circuit may cause oscillations to be superimposed on the injected current wave. These oscillations should be damped out (to satisfy the requirements of 4.2.1d), so as not to affect the current during the interval of significant change of arc-voltage or at least 100  $\mu$ s before current-zero.

A resistance may be connected in series with the TRV shaping circuit. In most cases this resistance, selected to control the initial rate of rise of recovery voltage, is sufficient to supply the necessary damping.

NOTE If, for short line fault tests, the line is connected to the same side of the test circuit-breaker as the voltage circuit impedance, special attention should be given to voltage distribution and measurement of prospective TRV.

#### 6.111 Synthetic methods for capacitive-current switching

See annex GG.

**Tableau I – Séquence d'essais synthétiques pour les séquences 1, 2, 3, 4 et 5**

| Séquence d'essais no.                                                                                                                                                                                                                                                 | Essai synthétique                                                                                                | Séquence de manoeuvre assignée                                                          |                                                                                                                |                                                                                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                  | $O - t - CO - t' - CO$<br>$t = 0,3 \text{ s ou } 3 \text{ min}$<br>$t' = 3 \text{ min}$ | $CO - t'' - CO$<br>$t'' = 15 \text{ s}$                                                                        |                                                                                                |
| 1, 2, 3                                                                                                                                                                                                                                                               | Manoeuvres de coupure <sup>e</sup>                                                                               | i)                                                                                      | $Os - t - Os - t' - Os$                                                                                        | $Os - t'' - Os$                                                                                |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                  | ii)                                                                                     | $Os$<br>$Od - t - Os - t' - Os$                                                                                | $Os$<br>$Od - t'' - Os$                                                                        |
| 4 <sup>d</sup>                                                                                                                                                                                                                                                        | Séquence de manoeuvres assignée complète                                                                         |                                                                                         | $Os - t - CsOs - t' - CsOs$                                                                                    | $CsOs - t'' - CsOs$                                                                            |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       | Méthode 1 (constante de temps de la composante apériodique du circuit d'essais égale à la valeur spécifiée)      | i)                                                                                      | $Os$<br>$Od - t - Cs_{sym}Os - t' - Cd_{asy}Os$                                                                | $Os$<br>$Cs_{sym}Od - t'' - Cd_{asy}Os$                                                        |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                  | ii)                                                                                     | $Cs_{sym}$<br>$Os$<br>$Od - t - Cd_{sym}Os - t' - Cd_{asy}Os$                                                  | $Cs_{sym}$<br>$Os$<br>$Cd_{sym}Od - t'' - Cd_{asy}Os$                                          |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       | Méthode 2 (constante de temps de la composante apériodique du circuit d'essais inférieure à la valeur spécifiée) | i)                                                                                      | $Cd_{asy}^a$<br>$Os$<br>$Od - t - Cs_{sym}Os - t' - Cd_{asy}Os$                                                | $Cd_{asy}^a$<br>$Os$<br>$Cs_{sym}Od - t'' - Cd_{asy}Os$                                        |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                  | ii)                                                                                     | $Cd_{asy}^a$<br>$Cs_{sym}$<br>$Os$<br>$Od - t - Cd_{sym}Os - t' - Cd_{asy}Os$                                  | $Cd_{asy}^a$<br>$Cs_{sym}$<br>$Os$<br>$Cd_{sym}Od - t'' - Cd_{asy}Os$                          |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       | Méthode 3 (constante de temps de la composante apériodique du circuit d'essais supérieure à la valeur spécifiée) | i)                                                                                      | $Os$<br>$Od - t - Cs_{sym}Os - t' - (Cd_{asy}^b)Os$<br>$Od - t - Cd_{sym}Os - t' - Cd_{asy}Os^c$               | $Os$<br>$Cs_{sym}Od - t'' - (Cd_{asy}^b)Os$<br>$Cd_{sym}Od - t'' - Cd_{asy}Os^c$               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                  | ii)                                                                                     | $Cs_{sym}$<br>$Os$<br>$Od - t - Cd_{sym}Os - t' - (Cd_{asy}^b)Os$<br>$Od - t - Cd_{sym}Os - t' - Cd_{asy}Os^c$ | $Cs_{sym}$<br>$Os$<br>$Cd_{sym}Od - t'' - (Cd_{asy}^b)Os$<br>$Cd_{sym}Od - t'' - Cd_{asy}Os^c$ |
|                                                                                                                                                                                                                                                                       | 5                                                                                                                | Manoeuvres de coupure <sup>e</sup>                                                      |                                                                                                                | $Os$<br>$Os$<br>$Os$                                                                           |
| <sup>a</sup> La valeur efficace du courant pour cette manoeuvre est supérieure au pouvoir de coupure assigné en court-circuit pour obtenir la valeur crête requise du courant égale au pouvoir de fermeture assigné en court-circuit.                                 |                                                                                                                  |                                                                                         |                                                                                                                |                                                                                                |
| <sup>b</sup> La valeur crête du courant pour cette manoeuvre peut être supérieure au pouvoir de fermeture assigné en court-circuit, selon qu'un système de contrôle de l'instant de fermeture par synchronisation est utilisé ou pas (voir les méthodes 3i) et 3ii)). |                                                                                                                  |                                                                                         |                                                                                                                |                                                                                                |
| <sup>c</sup> La valeur efficace du courant pour cette séquence est inférieure au pouvoir de coupure assigné en court-circuit pour obtenir la valeur crête requise du courant égale au pouvoir de fermeture assigné en court-circuit.                                  |                                                                                                                  |                                                                                         |                                                                                                                |                                                                                                |
| <sup>d</sup> Pour la commodité des essais, il est permis d'échanger l'ordre de $C_{sym}$ et $C_{asy}$ lors de la séquence de manoeuvre assignée no. 4.                                                                                                                |                                                                                                                  |                                                                                         |                                                                                                                |                                                                                                |
| <sup>e</sup> Pour la commodité des essais, il est permis d'introduire une manoeuvre de fermeture avant toute manoeuvre d'ouverture lors des séquences d'essais 1, 2, 3 et 5.                                                                                          |                                                                                                                  |                                                                                         |                                                                                                                |                                                                                                |

Table I – Synthetic test sequence for test-duties 1, 2, 3, 4 and 5

| Test-duty No.  | Synthetic test                                                                                        |     | Rated operating sequence                                                                                       |                                                                                                |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                |                                                                                                       |     | $O - t - CO - t' - CO$<br>$t = 0,3 \text{ s or } 3 \text{ min}$<br>$t' = 3 \text{ min}$                        | $CO - t'' - CO$<br>$t'' = 15 \text{ s}$                                                        |
| 1, 2, 3        | Breaking operations <sup>e</sup>                                                                      | i)  | $Os - t - Os - t' - Os$                                                                                        | $Os - t'' - Os$                                                                                |
|                |                                                                                                       | ii) | $Os$<br>$Od - t - Os - t' - Os$                                                                                | $Os$<br>$Od - t'' - Os$                                                                        |
| 4 <sup>d</sup> | Complete rated operating sequence                                                                     |     | $Os - t - CsOs - t' - CsOs$                                                                                    | $CsOs - t'' - CsOs$                                                                            |
|                | Method 1<br>(time constant of the d.c. component of the test circuit equal to the standard value)     | i)  | $Os$<br>$Od - t - Cs_{sym}Os - t' - Cd_{asy}Os$                                                                | $Os$<br>$Cs_{sym}Od - t'' - Cd_{asy}Os$                                                        |
|                |                                                                                                       | ii) | $Cs_{sym}$<br>$Os$<br>$Od - t - Cd_{sym}Os - t' - Cd_{asy}Os$                                                  | $Cs_{sym}$<br>$Os$<br>$Cd_{sym}Od - t'' - Cd_{asy}Os$                                          |
|                | Method 2<br>(time constant of the d.c. component of the test circuit less than the standard value)    | i)  | $Cd_{asy}^a$<br>$Os$<br>$Od - t - Cs_{sym}Os - t' - Cd_{asy}Os$                                                | $Cd_{asy}^a$<br>$Os$<br>$Cs_{sym}Od - t'' - Cd_{asy}Os$                                        |
|                |                                                                                                       | ii) | $Cd_{asy}^a$<br>$Cs_{sym}$<br>$Os$<br>$Od - t - Cd_{sym}Os - t' - Cd_{asy}Os$                                  | $Cd_{asy}^a$<br>$Cs_{sym}$<br>$Os$<br>$Cd_{sym}Od - t'' - Cd_{asy}Os$                          |
|                | Method 3<br>(time constant of the d.c. component of the test circuit greater than the standard value) | i)  | $Os$<br>$Od - t - Cs_{sym}Os - t' - (Cd_{asy}^b)Os$<br>$Od - t - Cd_{sym}Os - t' - Cd_{asy}Os^c$               | $Os$<br>$Cs_{sym}Od - t'' - (Cd_{asy}^b)Os$<br>$Cd_{sym}Od - t'' - Cd_{asy}Os^c$               |
|                |                                                                                                       | ii) | $Cs_{sym}$<br>$Os$<br>$Od - t - Cd_{sym}Os - t' - (Cd_{asy}^b)Os$<br>$Od - t - Cd_{sym}Os - t' - Cd_{asy}Os^c$ | $Cs_{sym}$<br>$Os$<br>$Cd_{sym}Od - t'' - (Cd_{asy}^b)Os$<br>$Cd_{sym}Od - t'' - Cd_{asy}Os^c$ |
| 5              | Breaking operations <sup>e</sup>                                                                      |     | $Os$<br>$Os$<br>$Os$                                                                                           |                                                                                                |

<sup>a</sup> The r.m.s value of the current for this operation is higher than the rated short-circuit breaking current to obtain the required short-circuit making current peak.

<sup>b</sup> The peak value of the current for this operation may be higher than the rated short-circuit making current depending on whether the closing operation is controlled by use of point on wave control or not (see methods 3i) and 3ii)).

<sup>c</sup> The r.m.s value of the current for this sequence is less than the rated short-circuit breaking current to obtain the required short-circuit making current peak.

<sup>d</sup> For convenience of testing, it is permissible to exchange the order of  $C_{sym}$  and  $C_{asy}$  during the rated operating sequence in test-duty No. 4.

<sup>e</sup> For convenience of testing, it is permissible to introduce a closing operation before any opening operations in test-duties 1, 2, 3 and 5.

Tableau II/Table II

TTR après la coupure de courant asymétrique/TRV after breaking asymmetrical current

| Fréquence / Frequency (Hz)                                                                                            |    | 50                     |       |       |       |       |       |       |       |       |       | 60    |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| Tension / Voltage (kV)                                                                                                |    | 245                    |       | 300   |       | 362   |       | 420   |       | 525   |       | 765   |       | 300   |       | 362   |       | 420   |       | 525   |       | 765   |       |     |
| Instant / Time co-ordinate (μs)                                                                                       |    | $t_1$                  | $t_2$ | $t_1$ | $t_2$ | $t_1$ | $t_2$ | $t_1$ | $t_2$ | $t_1$ | $t_2$ | $t_1$ | $t_2$ | $t_1$ | $t_2$ | $t_1$ | $t_2$ | $t_1$ | $t_2$ | $t_1$ | $t_2$ | $t_1$ | $t_2$ |     |
|                                                                                                                       |    | $u_i$                  | $u_c$ | $u_i$ | $u_c$ | $u_i$ | $u_c$ | $u_i$ | $u_c$ | $u_i$ | $u_c$ | $u_i$ | $u_c$ | $u_i$ | $u_c$ | $u_i$ | $u_c$ | $u_i$ | $u_c$ | $u_i$ | $u_c$ | $u_i$ | $u_c$ |     |
|                                                                                                                       |    | Tension / Voltage (kV) |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |     |
| Après une grande alternance : asymétrie à l'instant du zéro de courant<br>After major-loop: asymmetry at current zero | 0  | 260                    | 364   | 318   | 446   | 384   | 538   | 446   | 624   | 557   | 780   | 812   | 1137  | 260   | 364   | 318   | 446   | 384   | 538   | 446   | 624   | 557   | 780   | 812 |
|                                                                                                                       | 5  | 260                    | 363   | 319   | 445   | 385   | 536   | 446   | 621   | 557   | 775   | 811   | 1124  | 260   | 363   | 319   | 444   | 384   | 535   | 445   | 620   | 557   | 773   | 810 |
|                                                                                                                       | 10 | 260                    | 362   | 318   | 444   | 384   | 532   | 445   | 616   | 556   | 768   | 808   | 109   | 260   | 361   | 318   | 441   | 383   | 530   | 444   | 614   | 555   | 764   | 806 |
|                                                                                                                       | 15 | 259                    | 359   | 317   | 439   | 382   | 527   | 443   | 610   | 553   | 758   | 804   | 1091  | 258   | 358   | 316   | 436   | 381   | 525   | 442   | 606   | 551   | 753   | 801 |
|                                                                                                                       | 20 | 257                    | 356   | 315   | 434   | 380   | 521   | 440   | 602   | 549   | 747   | 797   | 1070  | 257   | 354   | 314   | 431   | 378   | 517   | 438   | 597   | 547   | 740   | 793 |
|                                                                                                                       | 25 | 255                    | 351   | 312   | 428   | 376   | 514   | 436   | 593   | 543   | 734   | 788   | 1046  | 254   | 349   | 311   | 424   | 374   | 509   | 434   | 586   | 540   | 724   | 783 |
|                                                                                                                       | 30 | 252                    | 346   | 308   | 421   | 371   | 504   | 430   | 583   | 536   | 718   | 776   | 1019  | 251   | 343   | 307   | 417   | 369   | 498   | 428   | 574   | 533   | 707   | 770 |
|                                                                                                                       | 35 | 248                    | 339   | 303   | 412   | 365   | 494   | 423   | 568   | 521   | 701   | 763   | 988   | 247   | 336   | 302   | 407   | 363   | 487   | 420   | 560   | 523   | 688   | 756 |
|                                                                                                                       | 40 | 244                    | 332   | 298   | 403   | 358   | 481   | 415   | 553   | 517   | 681   | 746   | 954   | 242   | 327   | 296   | 397   | 356   | 473   | 412   | 543   | 512   | 666   | 738 |
|                                                                                                                       | 45 | 238                    | 323   | 291   | 391   | 350   | 467   | 405   | 536   | 504   | 658   | 728   | 916   | 236   | 318   | 289   | 385   | 347   | 458   | 401   | 525   | 499   | 641   | 719 |
|                                                                                                                       | 50 | 232                    | 313   | 283   | 379   | 341   | 451   | 394   | 517   | 490   | 633   | 706   | 875   | 230   | 308   | 280   | 371   | 337   | 441   | 390   | 505   | 484   | 614   | 696 |
|                                                                                                                       | 55 | 224                    | 301   | 274   | 364   | 329   | 433   | 381   | 496   | 474   | 604   | 681   | 829   | 222   | 296   | 271   | 356   | 326   | 422   | 376   | 482   | 467   | 584   | 670 |
| Après une petite alternance : asymétrie à l'instant du zéro de courant<br>After minor loop: asymmetry at current zero | 0  | 260                    | 364   | 318   | 446   | 384   | 538   | 446   | 624   | 557   | 780   | 812   | 1137  | 260   | 364   | 318   | 446   | 384   | 538   | 446   | 624   | 557   | 780   | 812 |
|                                                                                                                       | 5  | 259                    | 364   | 317   | 446   | 383   | 539   | 444   | 626   | 556   | 783   | 811   | 1146  | 259   | 364   | 318   | 447   | 383   | 540   | 445   | 627   | 556   | 785   | 812 |
|                                                                                                                       | 10 | 257                    | 363   | 315   | 445   | 381   | 538   | 442   | 626   | 553   | 785   | 807   | 1153  | 258   | 364   | 316   | 446   | 381   | 540   | 443   | 628   | 554   | 789   | 809 |
|                                                                                                                       | 15 | 255                    | 361   | 313   | 443   | 378   | 536   | 438   | 624   | 549   | 784   | 802   | 1157  | 256   | 362   | 313   | 445   | 379   | 539   | 440   | 628   | 550   | 790   | 805 |
|                                                                                                                       | 20 | 252                    | 358   | 309   | 440   | 373   | 533   | 434   | 621   | 543   | 782   | 795   | 1158  | 253   | 360   | 310   | 443   | 375   | 537   | 435   | 626   | 545   | 789   | 798 |
|                                                                                                                       | 25 | 249                    | 354   | 305   | 435   | 368   | 528   | 428   | 616   | 536   | 777   | 785   | 1156  | 250   | 356   | 306   | 439   | 370   | 533   | 430   | 622   | 539   | 786   | 790 |
|                                                                                                                       | 30 | 244                    | 349   | 299   | 430   | 362   | 522   | 421   | 609   | 527   | 770   | 773   | 1150  | 245   | 352   | 301   | 434   | 364   | 528   | 423   | 617   | 531   | 781   | 779 |
|                                                                                                                       | 35 | 239                    | 343   | 293   | 423   | 355   | 514   | 412   | 601   | 517   | 761   | 759   | 1142  | 240   | 346   | 295   | 428   | 357   | 521   | 415   | 610   | 521   | 774   | 766 |
|                                                                                                                       | 40 | 233                    | 336   | 286   | 414   | 346   | 505   | 402   | 591   | 505   | 750   | 742   | 1130  | 235   | 340   | 288   | 420   | 349   | 513   | 406   | 601   | 509   | 764   | 750 |
|                                                                                                                       | 45 | 226                    | 327   | 278   | 405   | 336   | 494   | 391   | 578   | 491   | 736   | 723   | 1114  | 228   | 332   | 280   | 411   | 339   | 502   | 395   | 590   | 496   | 752   | 732 |
|                                                                                                                       | 50 | 219                    | 318   | 269   | 393   | 325   | 481   | 378   | 564   | 475   | 719   | 700   | 1094  | 221   | 323   | 271   | 401   | 328   | 490   | 382   | 576   | 481   | 737   | 710 |
|                                                                                                                       | 55 | 210                    | 307   | 258   | 380   | 312   | 465   | 364   | 547   | 457   | 699   | 675   | 1070  | 212   | 313   | 261   | 388   | 316   | 476   | 368   | 561   | 463   | 720   | 688 |
|                                                                                                                       | 60 | 200                    | 294   | 248   | 368   | 302   | 448   | 347   | 527   | 437   | 676   | 646   | 1041  | 203   | 301   | 249   | 374   | 302   | 460   | 352   | 542   | 444   | 698   | 658 |
|                                                                                                                       | 65 | 189                    | 280   | 233   | 348   | 282   | 428   | 328   | 504   | 414   | 649   | 613   | 1007  | 192   | 287   | 236   | 358   | 286   | 441   | 334   | 521   | 421   | 673   | 626 |
|                                                                                                                       | 70 | 177                    | 264   | 217   | 329   | 264   | 405   | 307   | 478   | 387   | 618   | 576   | 966   | 179   | 271   | 221   | 339   | 268   | 413   | 306   | 496   | 395   | 644   | 590 |
|                                                                                                                       | 75 | 162                    | 245   | 200   | 306   | 243   | 378   | 283   | 448   | 357   | 581   | 533   | 917   | 165   | 252   | 204   | 317   | 248   | 393   | 289   | 467   | 366   | 609   | 548 |
|                                                                                                                       | 80 | 146                    | 223   | 179   | 279   | 218   | 346   | 255   | 412   | 322   | 537   | 483   | 858   | 149   | 231   | 184   | 291   | 224   | 362   | 261   | 432   | 332   | 567   | 499 |

First pole to clear factor 1,3  
Time constant of d.c. decrement 45 ms

Facteur de premier pôle: 1,3  
Constante de temps de la composante continue: 45 ms



Tableau IV/Table IV

TTR après la coupure de courant asymétrique/TRV after breaking asymmetrical current

| Fréquence / Frequency (Hz)                                                                                                    |     | 50                     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | 60    |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Tension / Voltage (kV)                                                                                                        |     | 245                    |       |       |       | 300   |       |       |       | 362   |       |       |       | 420   |       |       |       | 525   |       |       |       | 765   |       |       |       |
| Instant / Time co-ordinate (µs)                                                                                               |     | $t_1$                  | $t_2$ | $u_i$ | $u_c$ | $t_1$ | $t_2$ | $u_i$ | $u_c$ | $t_1$ | $t_2$ | $u_i$ | $u_c$ | $t_1$ | $t_2$ | $u_i$ | $u_c$ | $t_1$ | $t_2$ | $u_i$ | $u_c$ | $t_1$ | $t_2$ | $u_i$ | $u_c$ |
|                                                                                                                               |     | $u_i$                  | $u_c$ | $u_i$ | $u_c$ | $u_i$ | $u_c$ | $u_i$ | $u_c$ | $u_i$ | $u_c$ | $u_i$ | $u_c$ | $u_i$ | $u_c$ | $u_i$ | $u_c$ | $u_i$ | $u_c$ | $u_i$ | $u_c$ | $u_i$ | $u_c$ | $u_i$ | $u_c$ |
| %                                                                                                                             |     | Tension / Voltage (kV) |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| Après une grande alternance :<br>asymétrie à l'instant du zéro de courant<br>After major loop :<br>asymmetry at current zero  | 0   | 300                    | 420   | 367   | 514   | 443   | 621   | 514   | 720   | 643   | 900   | 937   | 1312  | 300   | 420   | 367   | 514   | 443   | 621   | 514   | 720   | 643   | 900   | 937   | 1312  |
|                                                                                                                               | 5   | 300                    | 419   | 368   | 512   | 444   | 618   | 515   | 716   | 643   | 893   | 936   | 1295  | 300   | 418   | 367   | 512   | 443   | 616   | 514   | 714   | 642   | 890   | 934   | 1290  |
|                                                                                                                               | 10  | 300                    | 417   | 367   | 509   | 443   | 615   | 513   | 710   | 641   | 883   | 932   | 1274  | 299   | 416   | 366   | 507   | 442   | 611   | 512   | 706   | 640   | 878   | 929   | 1265  |
|                                                                                                                               | 15  | 299                    | 414   | 366   | 505   | 441   | 607   | 511   | 702   | 638   | 871   | 926   | 1251  | 298   | 412   | 365   | 502   | 439   | 603   | 509   | 697   | 636   | 864   | 922   | 1236  |
|                                                                                                                               | 20  | 297                    | 409   | 363   | 453   | 438   | 599   | 507   | 692   | 633   | 857   | 917   | 1224  | 296   | 407   | 362   | 495   | 436   | 594   | 505   | 685   | 630   | 847   | 912   | 1205  |
|                                                                                                                               | 25  | 294                    | 404   | 360   | 492   | 433   | 590   | 502   | 680   | 626   | 840   | 906   | 1193  | 293   | 401   | 358   | 487   | 431   | 583   | 499   | 672   | 622   | 828   | 900   | 1169  |
|                                                                                                                               | 30  | 290                    | 397   | 355   | 483   | 428   | 578   | 495   | 666   | 617   | 823   | 893   | 1159  | 289   | 393   | 353   | 478   | 425   | 571   | 492   | 656   | 613   | 807   | 885   | 1130  |
|                                                                                                                               | 35  | 286                    | 390   | 350   | 473   | 413   | 565   | 487   | 650   | 607   | 800   | 877   | 1121  | 284   | 385   | 347   | 467   | 418   | 557   | 484   | 639   | 602   | 783   | 868   | 1088  |
|                                                                                                                               | 40  | 281                    | 380   | 343   | 461   | 413   | 551   | 478   | 632   | 594   | 775   | 858   | 1080  | 279   | 375   | 340   | 454   | 409   | 541   | 474   | 619   | 589   | 756   | 848   | 1041  |
|                                                                                                                               | 45  | 274                    | 370   | 335   | 448   | 403   | 534   | 466   | 612   | 580   | 748   | 835   | 1033  | 272   | 364   | 332   | 440   | 399   | 522   | 462   | 597   | 574   | 726   | 824   | 990   |
|                                                                                                                               | 50  | 267                    | 358   | 326   | 433   | 392   | 515   | 453   | 589   | 563   | 717   | 810   | 983   | 264   | 352   | 323   | 424   | 388   | 502   | 448   | 573   | 556   | 693   | 798   | 935   |
|                                                                                                                               | 55  | 258                    | 345   | 315   | 416   | 379   | 493   | 438   | 563   | 544   | 683   | 781   | 927   | 256   | 337   | 312   | 406   | 374   | 479   | 433   | 545   | 536   | 657   | 767   | 874   |
|                                                                                                                               | 60  | 249                    | 329   | 303   | 396   | 364   | 469   | 421   | 534   | 522   | 645   | 748   | 865   | 246   | 321   | 299   | 385   | 359   | 454   | 415   | 514   | 616   | 733   | 808   | 935   |
| 65                                                                                                                            | 237 | 312                    | 289   | 375   | 347   | 442   | 401   | 502   | 492   | 603   | 710   | 797   | 234   | 303   | 285   | 363   | 342   | 426   | 394   | 481   | 488   | 572   | 694   | 735   |       |
| 70                                                                                                                            | 224 | 292                    | 273   | 350   | 328   | 411   | 378   | 466   | 468   | 556   | 667   | 722   | 221   | 283   | 269   | 337   | 322   | 394   | 371   | 443   | 458   | 522   | 650   | 655   |       |
| 75                                                                                                                            | 209 | 269                    | 255   | 321   | 305   | 376   | 352   | 424   | 435   | 502   | 618   | 638   | 205   | 259   | 250   | 308   | 299   | 357   | 344   | 400   | 424   | 466   | 599   | 566   |       |
| 80                                                                                                                            | 191 | 243                    | 233   | 288   | 279   | 336   | 321   | 376   | 396   | 440   | 509   | 542   | 187   | 232   | 228   | 274   | 272   | 316   | 313   | 350   | 385   | 402   | 540   | 465   |       |
| Après une petite alternance :<br>asymétrie à l'instant du zéro de courant<br>After minor loop :<br>asymmetric at current zero | 0   | 300                    | 420   | 367   | 514   | 443   | 621   | 514   | 720   | 643   | 900   | 937   | 1312  | 300   | 420   | 367   | 514   | 443   | 621   | 514   | 720   | 643   | 900   | 937   | 1312  |
|                                                                                                                               | 5   | 299                    | 420   | 366   | 515   | 442   | 622   | 513   | 723   | 642   | 905   | 936   | 1325  | 299   | 421   | 367   | 516   | 442   | 623   | 513   | 724   | 642   | 908   | 937   | 1330  |
|                                                                                                                               | 10  | 297                    | 419   | 364   | 514   | 440   | 622   | 510   | 724   | 638   | 908   | 933   | 1336  | 298   | 420   | 365   | 516   | 440   | 625   | 511   | 727   | 640   | 913   | 935   | 1345  |
|                                                                                                                               | 15  | 295                    | 417   | 381   | 512   | 436   | 621   | 506   | 722   | 634   | 909   | 927   | 1343  | 295   | 419   | 362   | 515   | 437   | 624   | 508   | 727   | 636   | 916   | 930   | 1357  |
|                                                                                                                               | 20  | 291                    | 414   | 357   | 509   | 431   | 617   | 501   | 720   | 627   | 907   | 919   | 1347  | 292   | 416   | 358   | 513   | 433   | 623   | 503   | 726   | 630   | 917   | 924   | 1366  |
|                                                                                                                               | 25  | 287                    | 410   | 352   | 504   | 425   | 612   | 494   | 715   | 619   | 903   | 908   | 1347  | 288   | 413   | 354   | 509   | 427   | 619   | 497   | 723   | 623   | 915   | 914   | 1371  |
|                                                                                                                               | 30  | 282                    | 404   | 346   | 498   | 418   | 606   | 486   | 708   | 609   | 896   | 895   | 1343  | 283   | 408   | 348   | 504   | 421   | 613   | 489   | 718   | 614   | 911   | 902   | 1372  |
|                                                                                                                               | 35  | 276                    | 397   | 339   | 491   | 410   | 597   | 476   | 699   | 598   | 887   | 879   | 1336  | 278   | 402   | 341   | 493   | 413   | 606   | 480   | 710   | 603   | 904   | 887   | 1370  |
|                                                                                                                               | 40  | 269                    | 390   | 331   | 482   | 400   | 587   | 465   | 688   | 584   | 875   | 860   | 1325  | 271   | 395   | 333   | 489   | 401   | 597   | 469   | 701   | 590   | 894   | 870   | 1363  |
|                                                                                                                               | 45  | 262                    | 380   | 321   | 471   | 389   | 575   | 452   | 674   | 568   | 860   | 838   | 1309  | 265   | 386   | 324   | 479   | 392   | 586   | 457   | 689   | 575   | 882   | 849   | 1353  |
|                                                                                                                               | 50  | 253                    | 369   | 311   | 458   | 376   | 560   | 438   | 658   | 550   | 842   | 813   | 1289  | 255   | 376   | 314   | 467   | 380   | 573   | 443   | 675   | 557   | 866   | 825   | 1337  |
|                                                                                                                               | 55  | 243                    | 357   | 298   | 443   | 362   | 544   | 421   | 640   | 530   | 820   | 784   | 1264  | 246   | 364   | 302   | 454   | 366   | 567   | 427   | 568   | 538   | 847   | 798   | 1317  |
|                                                                                                                               | 60  | 232                    | 343   | 285   | 427   | 345   | 524   | 402   | 618   | 507   | 795   | 751   | 1233  | 235   | 351   | 289   | 438   | 350   | 539   | 408   | 637   | 515   | 824   | 766   | 1291  |
| 65                                                                                                                            | 219 | 327                    | 269   | 407   | 327   | 501   | 381   | 593   | 480   | 765   | 714   | 1196  | 222   | 335   | 273   | 419   | 332   | 518   | 387   | 614   | 489   | 796   | 730   | 1259  |       |
| 70                                                                                                                            | 204 | 308                    | 252   | 385   | 306   | 475   | 356   | 563   | 450   | 730   | 671   | 1151  | 208   | 317   | 256   | 398   | 311   | 493   | 364   | 586   | 460   | 764   | 689   | 1219  |       |
| 75                                                                                                                            | 188 | 286                    | 232   | 359   | 281   | 445   | 329   | 529   | 416   | 689   | 622   | 1098  | 192   | 296   | 236   | 373   | 288   | 464   | 336   | 553   | 426   | 725   | 641   | 1170  |       |
| 80                                                                                                                            | 169 | 261                    | 208   | 329   | 253   | 409   | 296   | 488   | 375   | 640   | 564   | 1032  | 173   | 272   | 213   | 343   | 260   | 429   | 304   | 514   | 387   | 678   | 584   | 1109  |       |

First pole to clear factor: 1.5  
Time constant of d.c. decrement: 45 ms

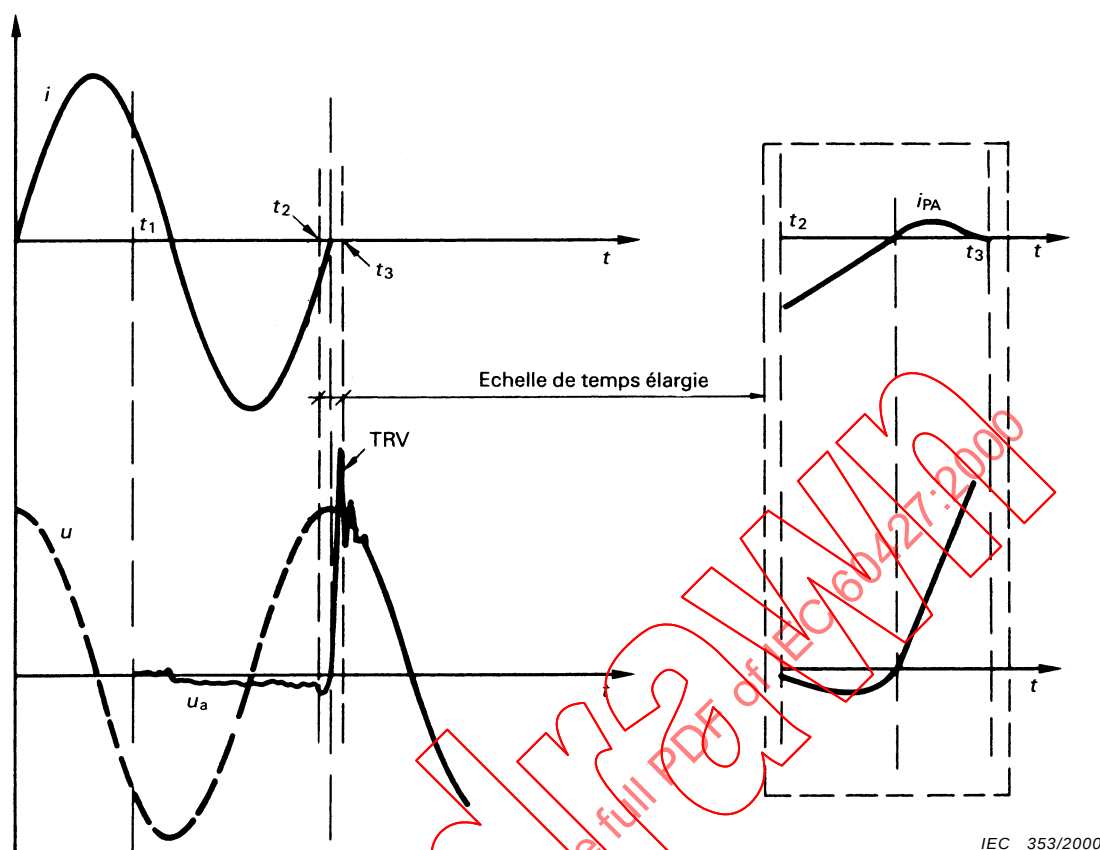
Facteur de premier pôle: 1,5  
Constante de temps de la composante continue: 45 ms

Tableau V/Table V

TTR après la coupure de courant asymétrique/TRV after breaking asymmetrical current

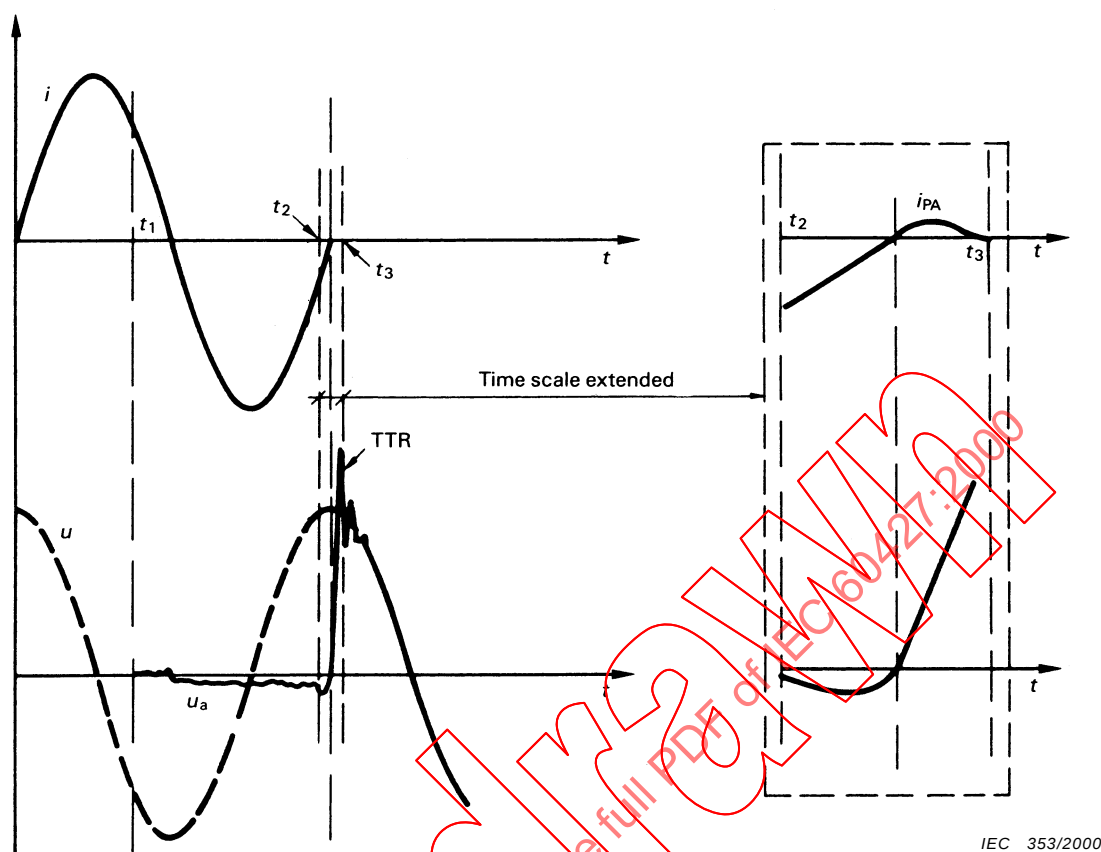
| Fréquence / Frequency<br>(Hz)                                                                                                        | 50    |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | 60    |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                                                                                                                      | 245   |       |       | 300   |       |       | 362   |       |       | 420   |       |       | 480   |       |       | 540   |       |       | 600   |       |       | 660   |       |       |
|                                                                                                                                      | $t_1$ | $t_2$ | $u_c$ | $t_1$ | $t_2$ | $u_c$ | $t_1$ | $t_2$ | $u_c$ | $t_1$ | $t_2$ | $u_c$ | $t_1$ | $t_2$ | $u_c$ | $t_1$ | $t_2$ | $u_c$ | $t_1$ | $t_2$ | $u_c$ | $t_1$ | $t_2$ | $u_c$ |
| Tension / Voltage<br>(kV)                                                                                                            | 150   | 450   |       | 184   | 551   |       | 222   | 665   |       | 257   | 772   |       | 321   | 964   |       | 362   | 1098  |       | 420   | 1260  |       | 480   | 1440  |       |
| Instant / Time co-ordinate<br>(μs)                                                                                                   | $u_i$ |       |       | $u_i$ |       |       | $u_i$ |       |       | $u_i$ |       |       | $u_i$ |       |       | $u_i$ |       |       | $u_i$ |       |       | $u_i$ |       |       |
| %                                                                                                                                    |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| Après une grande<br>alternance :<br>asymétrie à l'instant<br>du zéro de courant<br>After major loop:<br>asymmetry at current<br>zero | 0     | 300   | 420   | 367   | 514   | 443   | 621   | 514   | 720   | 643   | 900   | 937   | 1312  | 300   | 420   | 367   | 514   | 443   | 621   | 514   | 720   | 643   | 900   | 937   |
|                                                                                                                                      | 5     | 300   | 418   | 367   | 511   | 443   | 616   | 513   | 714   | 641   | 891   | 934   | 1292  | 300   | 418   | 367   | 511   | 442   | 615   | 513   | 713   | 641   | 889   | 933   |
|                                                                                                                                      | 10    | 299   | 415   | 365   | 507   | 441   | 610   | 511   | 706   | 638   | 879   | 928   | 1269  | 298   | 414   | 365   | 506   | 440   | 608   | 510   | 704   | 637   | 875   | 926   |
|                                                                                                                                      | 15    | 297   | 411   | 363   | 501   | 438   | 603   | 507   | 697   | 633   | 865   | 909   | 1242  | 296   | 409   | 363   | 499   | 437   | 600   | 507   | 693   | 632   | 859   | 917   |
|                                                                                                                                      | 20    | 294   | 406   | 360   | 494   | 434   | 594   | 503   | 685   | 627   | 849   | 896   | 1212  | 294   | 404   | 359   | 492   | 433   | 589   | 501   | 680   | 625   | 841   | 906   |
|                                                                                                                                      | 25    | 291   | 399   | 356   | 486   | 428   | 583   | 496   | 672   | 619   | 830   | 876   | 1179  | 290   | 397   | 355   | 482   | 427   | 578   | 495   | 665   | 616   | 820   | 892   |
|                                                                                                                                      | 30    | 287   | 392   | 350   | 476   | 422   | 570   | 489   | 657   | 609   | 809   | 851   | 1141  | 286   | 389   | 349   | 472   | 420   | 564   | 487   | 648   | 606   | 797   | 875   |
|                                                                                                                                      | 35    | 281   | 383   | 344   | 465   | 414   | 556   | 479   | 639   | 597   | 786   | 826   | 1101  | 280   | 380   | 343   | 460   | 412   | 549   | 477   | 630   | 594   | 771   | 856   |
|                                                                                                                                      | 40    | 275   | 373   | 336   | 452   | 405   | 540   | 469   | 619   | 583   | 759   | 793   | 1056  | 274   | 369   | 335   | 446   | 403   | 531   | 466   | 608   | 579   | 742   | 834   |
|                                                                                                                                      | 45    | 268   | 362   | 328   | 438   | 394   | 521   | 456   | 597   | 567   | 730   | 761   | 1007  | 267   | 357   | 326   | 431   | 392   | 512   | 453   | 585   | 563   | 711   | 809   |
|                                                                                                                                      | 50    | 260   | 349   | 318   | 422   | 382   | 501   | 442   | 573   | 549   | 697   | 728   | 953   | 259   | 344   | 316   | 414   | 380   | 491   | 439   | 559   | 544   | 676   | 780   |
|                                                                                                                                      | 55    | 251   | 334   | 306   | 404   | 368   | 478   | 426   | 546   | 529   | 661   | 688   | 894   | 250   | 329   | 304   | 395   | 365   | 467   | 422   | 531   | 523   | 638   | 748   |
|                                                                                                                                      | 60    | 241   | 318   | 293   | 383   | 352   | 453   | 407   | 515   | 505   | 621   | 643   | 830   | 239   | 312   | 291   | 374   | 349   | 440   | 403   | 499   | 500   | 596   | 712   |
|                                                                                                                                      | 65    | 229   | 300   | 279   | 360   | 335   | 424   | 386   | 481   | 479   | 577   | 593   | 759   | 227   | 293   | 276   | 350   | 331   | 411   | 382   | 464   | 473   | 550   | 672   |
|                                                                                                                                      | 70    | 215   | 279   | 262   | 334   | 314   | 392   | 362   | 443   | 448   | 538   | 558   | 683   | 213   | 272   | 259   | 324   | 311   | 378   | 358   | 424   | 442   | 498   | 626   |
|                                                                                                                                      | 75    | 199   | 255   | 242   | 304   | 290   | 356   | 335   | 400   | 414   | 472   | 487   | 593   | 197   | 248   | 240   | 293   | 287   | 340   | 330   | 380   | 407   | 441   | 573   |
|                                                                                                                                      | 80    | 181   | 228   | 220   | 270   | 263   | 314   | 303   | 351   | 373   | 408   | 427   | 494   | 179   | 220   | 217   | 259   | 259   | 297   | 298   | 329   | 366   | 375   | 512   |
| Après une petite<br>alternance :<br>asymétrie à l'instant<br>du zéro de courant<br>After minor loop:<br>asymmetry at current<br>zero | 0     | 300   | 420   | 367   | 514   | 443   | 621   | 514   | 720   | 643   | 900   | 937   | 1312  | 300   | 420   | 367   | 514   | 443   | 621   | 514   | 720   | 643   | 900   | 937   |
|                                                                                                                                      | 5     | 300   | 421   | 367   | 516   | 443   | 624   | 514   | 724   | 643   | 907   | 938   | 1328  | 300   | 422   | 367   | 517   | 443   | 625   | 514   | 726   | 643   | 909   | 939   |
|                                                                                                                                      | 10    | 298   | 421   | 366   | 517   | 442   | 625   | 513   | 727   | 641   | 912   | 937   | 1342  | 299   | 422   | 366   | 518   | 442   | 627   | 513   | 729   | 642   | 916   | 938   |
|                                                                                                                                      | 15    | 297   | 420   | 363   | 516   | 439   | 625   | 510   | 727   | 638   | 915   | 933   | 1352  | 297   | 421   | 364   | 518   | 440   | 628   | 511   | 731   | 639   | 921   | 936   |
|                                                                                                                                      | 20    | 294   | 418   | 360   | 514   | 435   | 623   | 505   | 726   | 633   | 915   | 927   | 1358  | 294   | 420   | 361   | 516   | 436   | 629   | 507   | 731   | 635   | 923   | 930   |
|                                                                                                                                      | 25    | 290   | 414   | 356   | 510   | 430   | 619   | 500   | 723   | 626   | 913   | 918   | 1362  | 291   | 417   | 357   | 514   | 431   | 634   | 501   | 729   | 629   | 923   | 923   |
|                                                                                                                                      | 30    | 286   | 410   | 351   | 505   | 424   | 614   | 493   | 717   | 618   | 908   | 907   | 1367  | 287   | 413   | 352   | 504   | 426   | 630   | 495   | 726   | 621   | 921   | 912   |
|                                                                                                                                      | 35    | 281   | 404   | 344   | 499   | 417   | 607   | 484   | 710   | 608   | 901   | 893   | 1371  | 282   | 407   | 346   | 504   | 418   | 634   | 487   | 720   | 611   | 916   | 899   |
|                                                                                                                                      | 40    | 275   | 397   | 337   | 491   | 408   | 598   | 474   | 701   | 595   | 891   | 876   | 1379  | 276   | 401   | 339   | 496   | 410   | 636   | 477   | 712   | 599   | 908   | 884   |
|                                                                                                                                      | 45    | 268   | 389   | 329   | 481   | 398   | 587   | 463   | 689   | 581   | 878   | 857   | 1386  | 269   | 393   | 330   | 487   | 400   | 637   | 465   | 701   | 585   | 897   | 865   |
|                                                                                                                                      | 50    | 259   | 379   | 319   | 469   | 386   | 574   | 449   | 674   | 565   | 862   | 833   | 1391  | 261   | 384   | 321   | 477   | 388   | 638   | 452   | 688   | 569   | 883   | 842   |
|                                                                                                                                      | 55    | 250   | 367   | 307   | 456   | 372   | 559   | 434   | 657   | 545   | 842   | 807   | 1297  | 252   | 373   | 309   | 464   | 375   | 639   | 437   | 672   | 551   | 865   | 817   |
|                                                                                                                                      | 60    | 240   | 354   | 294   | 440   | 357   | 540   | 416   | 637   | 524   | 819   | 776   | 1269  | 241   | 360   | 297   | 449   | 360   | 639   | 420   | 653   | 529   | 844   | 787   |
|                                                                                                                                      | 65    | 227   | 339   | 280   | 422   | 339   | 519   | 396   | 613   | 499   | 791   | 741   | 1235  | 229   | 345   | 282   | 431   | 343   | 639   | 400   | 631   | 505   | 818   | 752   |
|                                                                                                                                      | 70    | 214   | 321   | 263   | 401   | 319   | 494   | 372   | 585   | 470   | 758   | 700   | 1193  | 216   | 328   | 266   | 411   | 323   | 639   | 377   | 604   | 477   | 787   | 713   |
|                                                                                                                                      | 75    | 198   | 300   | 244   | 376   | 296   | 465   | 346   | 552   | 437   | 719   | 653   | 1142  | 200   | 308   | 246   | 387   | 300   | 639   | 350   | 573   | 444   | 750   | 666   |
|                                                                                                                                      | 80    | 179   | 276   | 221   | 347   | 269   | 431   | 314   | 513   | 398   | 672   | 598   | 1080  | 182   | 284   | 224   | 359   | 273   | 639   | 320   | 535   | 406   | 705   | 612   |

First pole to clear factor: 1,5  
Time constant of d.c. decrement 120 msFacteur de premier pôle: 1,5  
Constante de temps de la composante continue : 120 ms



|          |                                         |             |                                                        |
|----------|-----------------------------------------|-------------|--------------------------------------------------------|
| $i$      | = courant à couper                      | $t_2$       | = début du changement significatif de la tension d'arc |
| $u$      | = tension à fréquence industrielle      | $t_3$       | = disparition du courant post-arc                      |
| $u_a$    | = tension d'arc                         | $t_2 - t_1$ | = période fort courant                                 |
| TTR      | = tension transitoire de rétablissement | $t_3 - t_2$ | = période d'interaction                                |
| $i_{PA}$ | = courant post-arc                      | Après $t_3$ | = période de contrainte diélectrique                   |
| $t_1$    | = instant de séparation des contacts    |             |                                                        |

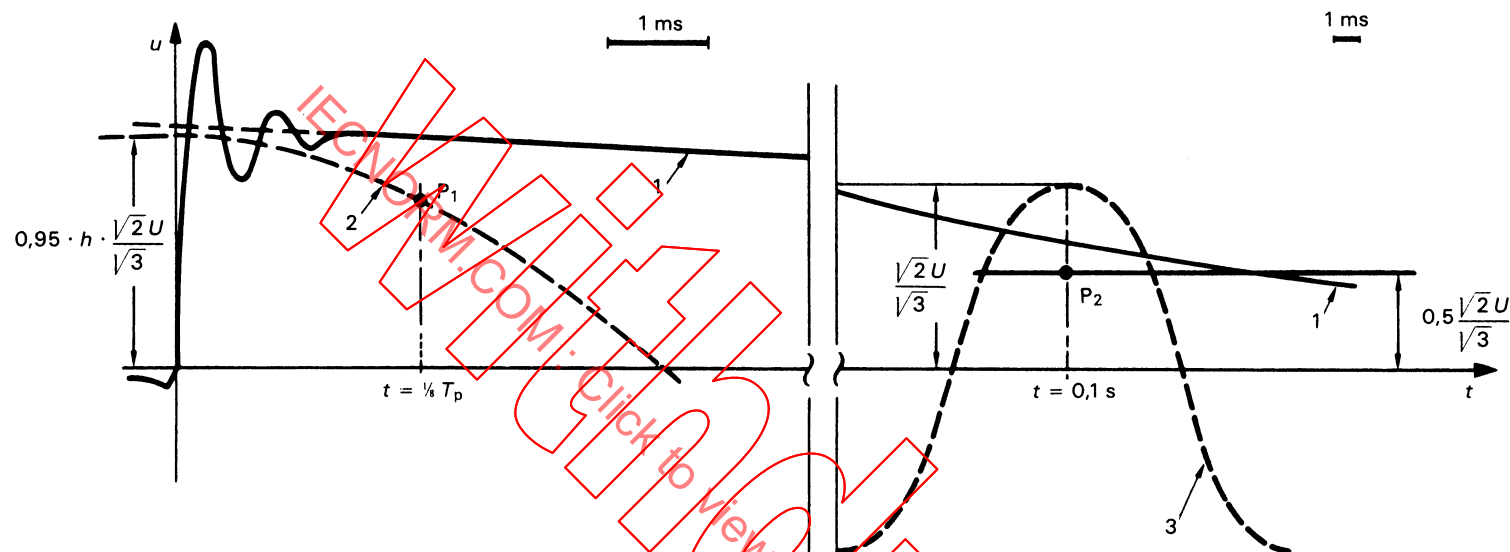
**Figure 1 – Processus d'interruption; périodes principales**



IEC 353/2000

|          |                                 |             |                                              |
|----------|---------------------------------|-------------|----------------------------------------------|
| $i$      | = breaking current              | $t_2$       | = start of significant change in arc voltage |
| $u$      | = power-frequency voltage       | $t_3$       | = instant of cessation of post-arc current   |
| $u_a$    | = arc-voltage                   | $t_2 - t_1$ | = high-current interval                      |
| TRV      | = transient recovery voltage    | $t_3 - t_2$ | = interaction interval                       |
| $i_{PA}$ | = post-arc current              | After $t_3$ | = high-voltage interval                      |
| $t_1$    | = instant of contact separation |             |                                              |

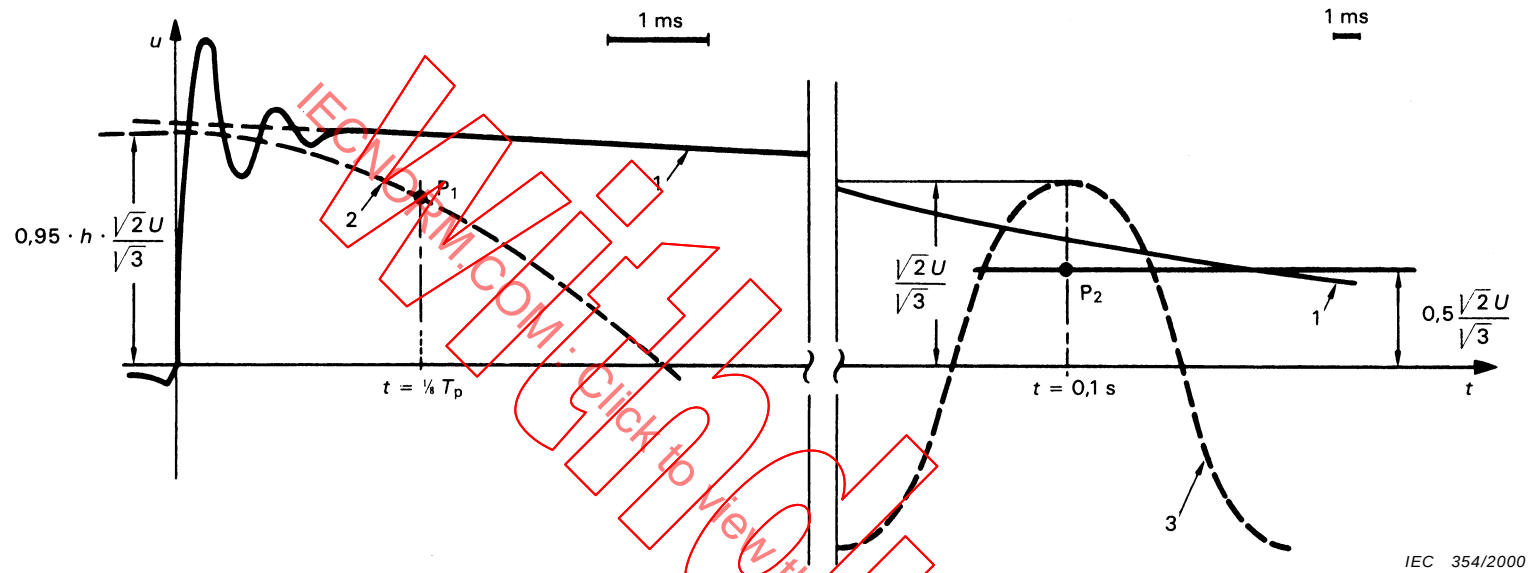
Figure 1 – Interrupting process; basic time intervals



IEC 354/2000

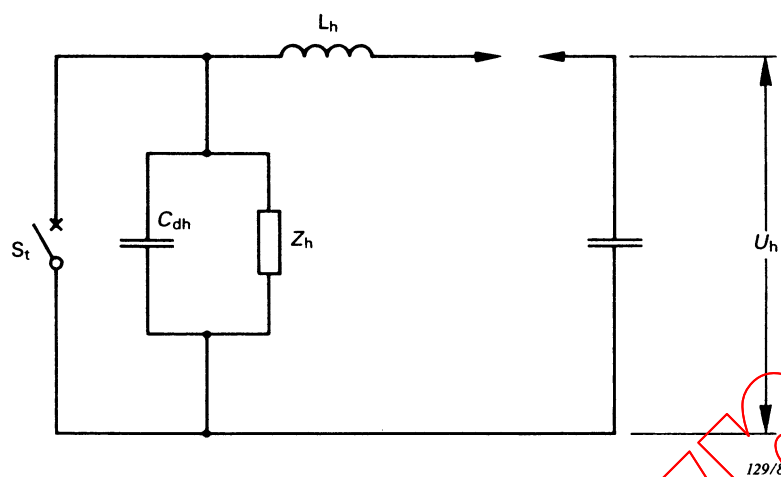
- |                                                                                                                                                                      |                                                                                                                   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 = tension de rétablissement avec décroissance exponentielle, aux bornes d'un disjoncteur en essai synthétique                                                      | $P_1$ = la tension de rétablissement (1) ne doit pas se trouver au-dessous de la valeur spécifiée (2) en ce point |
| 2 = tension de rétablissement à fréquence industrielle pour le premier pôle lors d'un essai direct équivalent, par exemple avec un facteur de premier pôle $h = 1,3$ | $P_2$ = point au-dessous duquel la tension de rétablissement (1) durant l'essai synthétique ne doit pas tomber    |
| 3 = tension de rétablissement à fréquence industrielle après l'interruption des courants dans les 3 pôles pendant l'essai direct équivalent                          | $T_p$ = période de la fréquence industrielle                                                                      |

Figure 2 – Exemple de tension de rétablissement



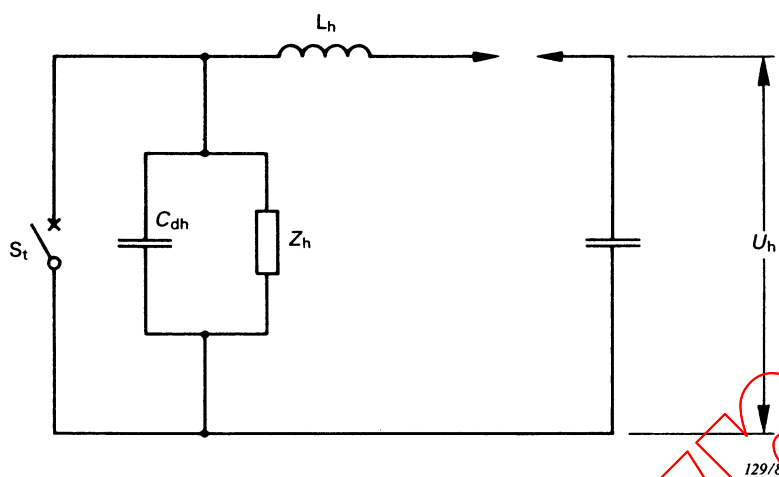
- |   |                                                                                                                                             |       |                                                                                        |
|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | = recovery voltage with exponential decrement across the circuit-breaker during a synthetic test                                            | $P_1$ | = point to which the recovery-voltage (1) shall not fall below the specified value (2) |
| 2 | = power-frequency recovery voltage of the first extinguishing pole in the equivalent direct test, e.g. first-pole-to-clear factor $h = 1,3$ | $P_2$ | = point below which the recovery-voltage (1) shall not fall during a synthetic test    |
| 3 | = power-frequency recovery voltage after interruption of currents in all three poles in the equivalent direct test                          | $T_p$ | = power frequency period                                                               |

Figure 2 – Example of recovery voltage



- $U_h$  = tension de charge du circuit de tension  
 $L_h$  = bobine d'inductance du circuit de tension  
 $Z_h$  = impédance d'onde équivalente  
 $C_{dh}$  = capacité servant à introduire le retard initial de la TTR  
 $S_t$  = disjoncteur en essai

**Figure 3 – Impédance d'onde équivalente dans le circuit de tension du schéma à injection de courant**



$U_h$  = charging voltage of voltage circuit

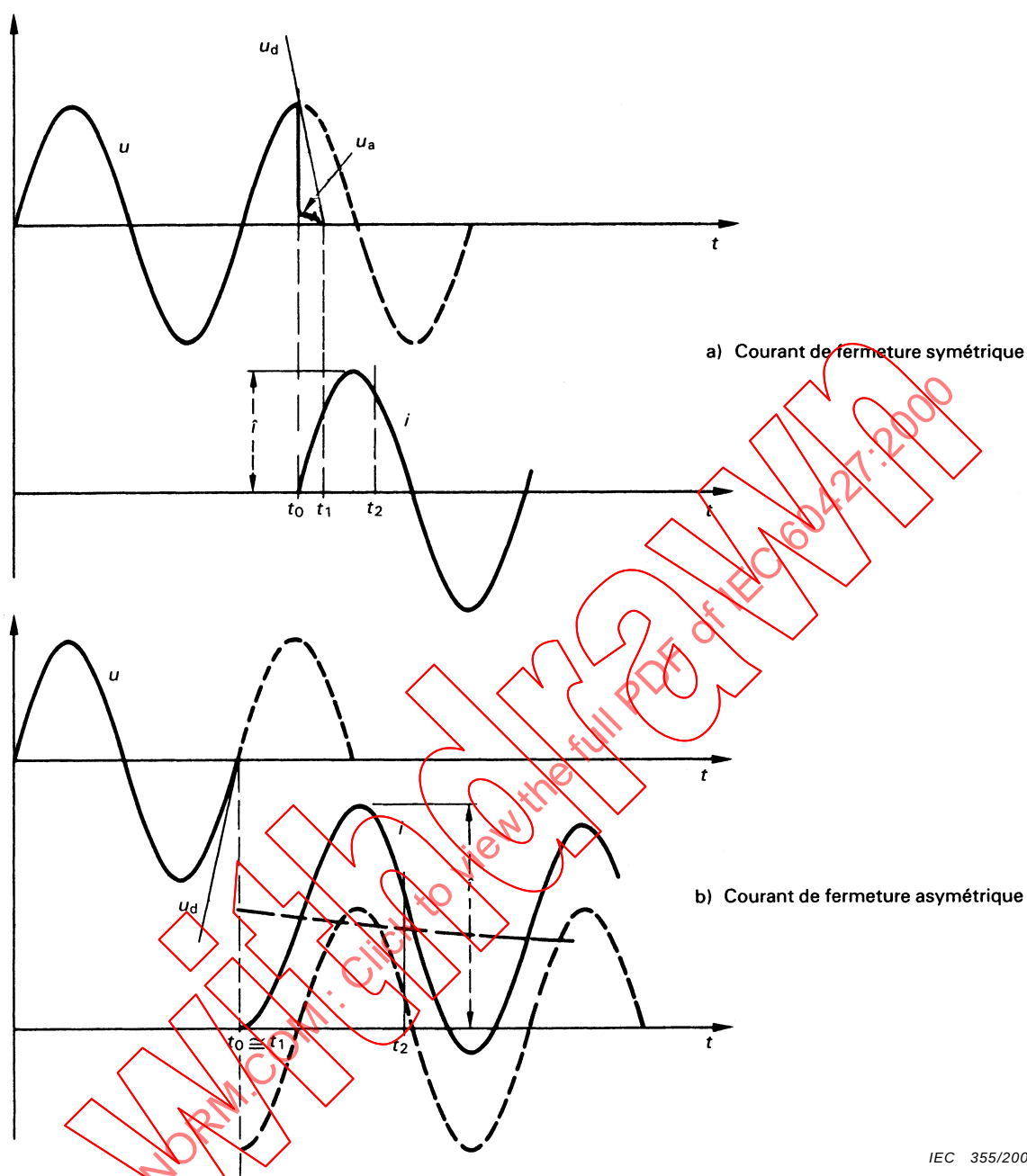
$L_h$  = inductance of voltage circuit

$Z_h$  = equivalent surge impedance

$C_{dh}$  = capacitance for time delay of voltage circuit

$S_t$  = test circuit-breaker

**Figure 3 – Equivalent surge impedance within the voltage circuit of current injection scheme**

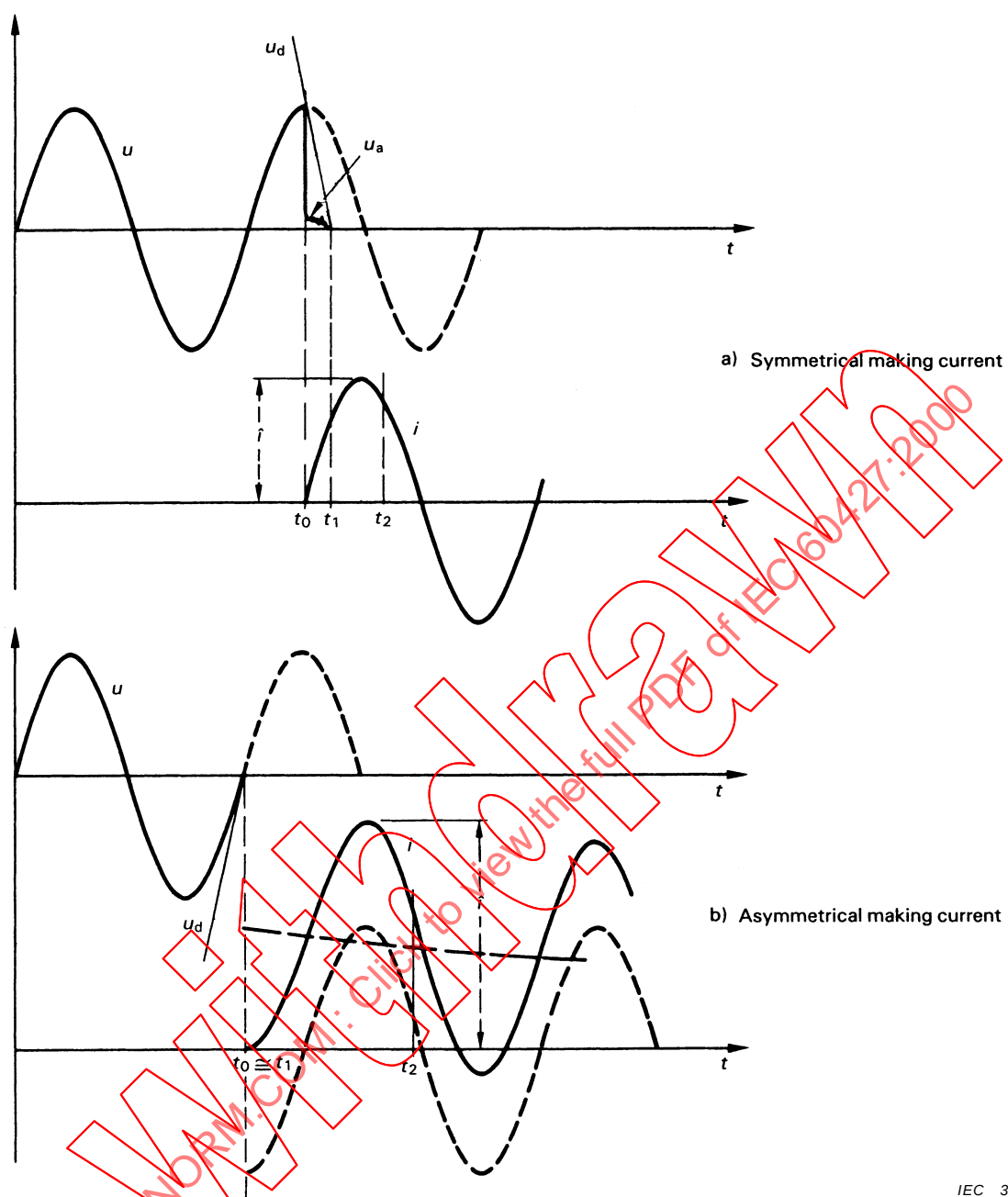


IEC 355/2000

$i$  = courant  
 $\hat{i}$  = valeur crête du courant de fermeture  
 $u$  = tension à fréquence industrielle  
 $u_d$  = caractéristique diélectrique en fermeture  
 $u_a$  = tension d'arc

Intervalles de temps:  
 Avant  $t_0$  = période de contrainte diélectrique  
 $t_0 - t_1$  = période de pré-arc  
 $t_1 - t_2$  = période d'arrêt  
 Après  $t_2$  = position de fermeture complète

Figure 4 – Processus de fermeture; périodes principales



$i$  = current

$\hat{i}$  = making current peak

$u$  = power-frequency voltage

$u_d$  = dielectric closing characteristic

$u_a$  = arc-voltage

Time intervals:

Before  $t_0$  = high-voltage interval

$t_0 - t_1$  = pre-arcing interval

$t_1 - t_2$  = latching interval

After  $t_2$  = fully closed position

Figure 4 – Making process; basic time intervals

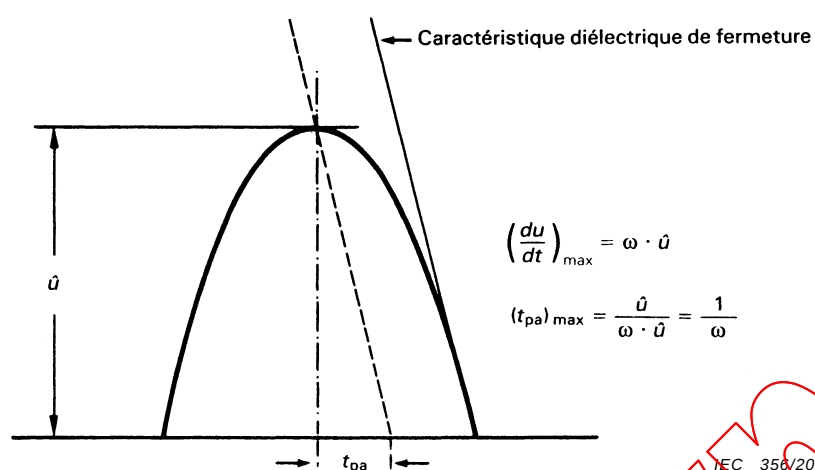


Figure 5 – Durée maximale permise de pré-arc pour qu'un essai de fermeture à tension réduite soit valide

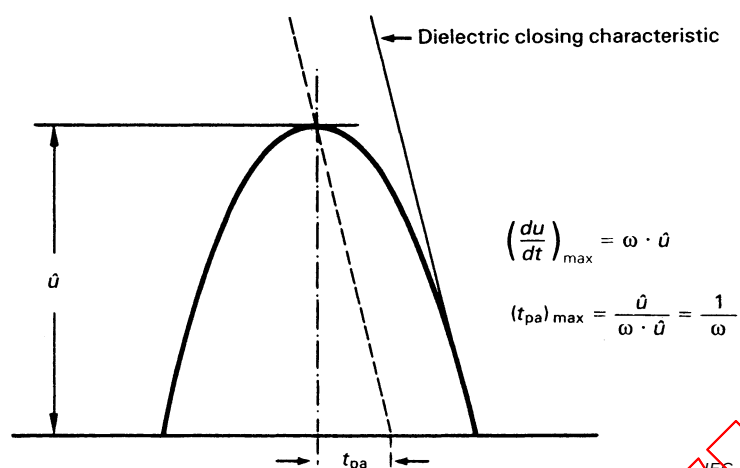
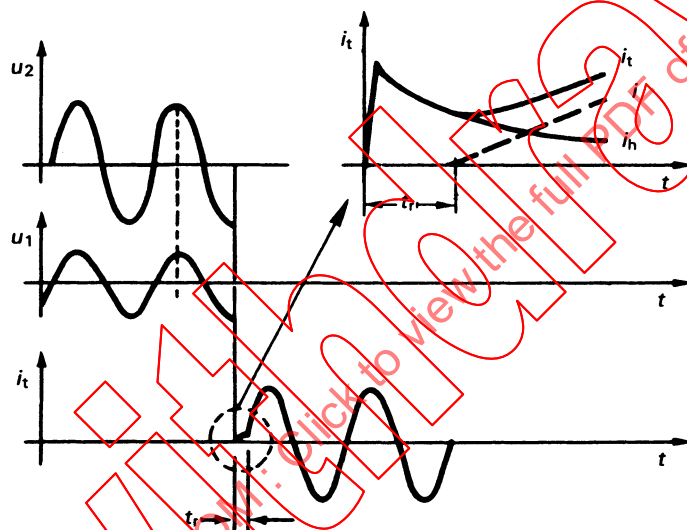
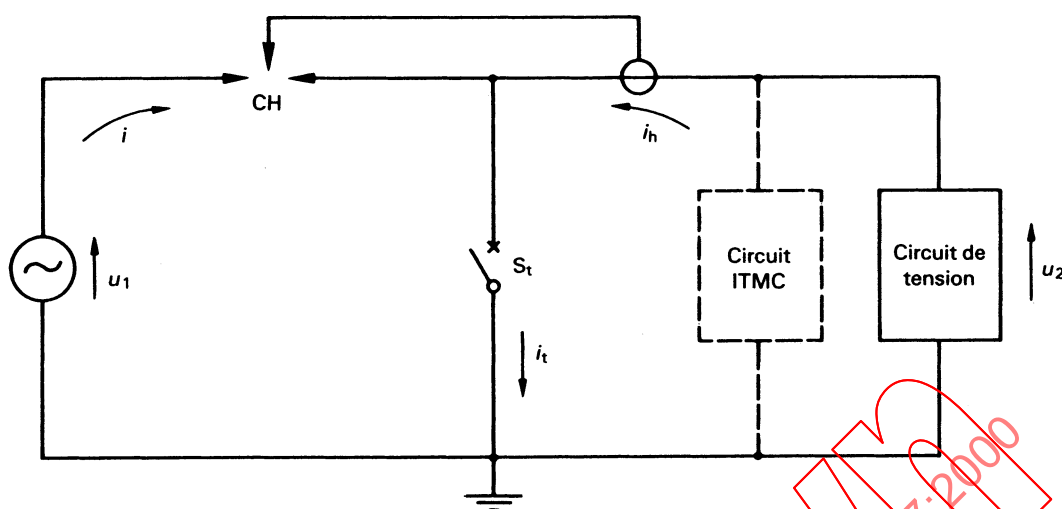


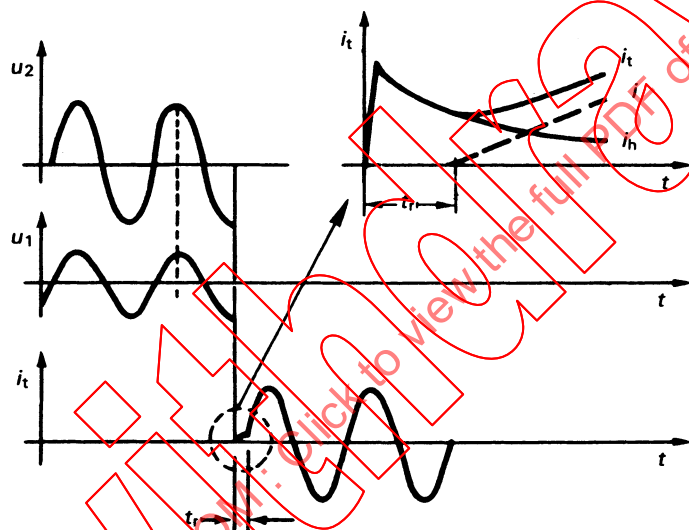
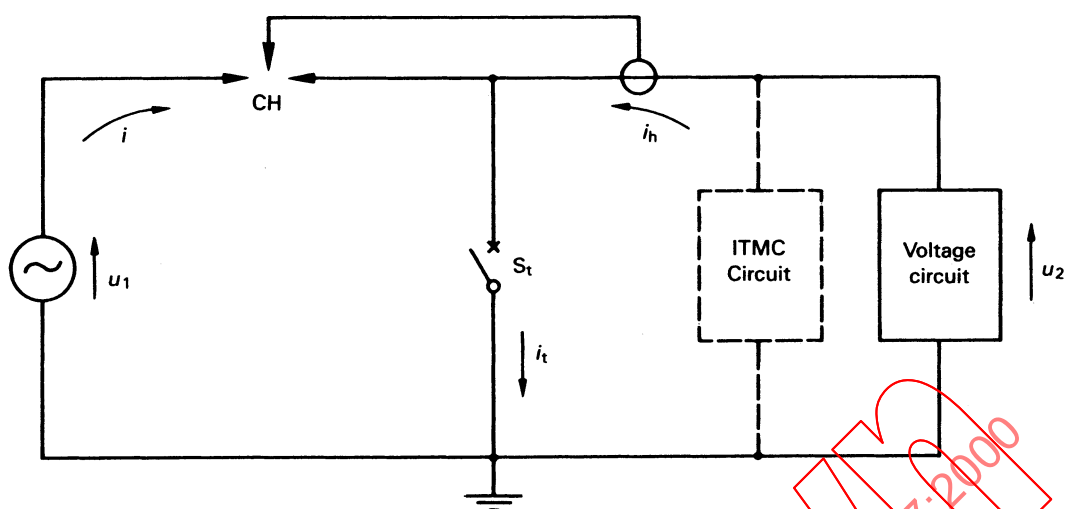
Figure 5 – Maximum allowable pre-arcing time for valid making test at reduced voltage



IEC 357/2000

|       |                                                                     |       |                                                   |
|-------|---------------------------------------------------------------------|-------|---------------------------------------------------|
| $u_1$ | = tension du circuit de courant                                     | $u_2$ | = tension appliquée                               |
| CH    | = enclencheur (éclateur commandé)                                   | $i_h$ | = courant transitoire initial de fermeture (ITMC) |
| $i$   | = courant à fréquence industrielle fourni par le circuit de courant | $i_t$ | = courant dans le disjoncteur en essai            |
| $S_t$ | = disjoncteur en essai                                              | $t_r$ | = retard de l'enclencheur                         |

**Figure 6 – Circuit synthétique de fermeture et formes d'ondes**



IEC 357/2000

|       |                                                       |       |                                           |
|-------|-------------------------------------------------------|-------|-------------------------------------------|
| $u_1$ | = voltage of current circuit                          | $u_2$ | = applied voltage                         |
| CH    | = making device (triggered spark gap)                 | $i_h$ | = initial transient making current (ITMC) |
| $i$   | = power-frequency current supplied by current circuit | $i_t$ | = current in the test circuit-breaker     |
| $S_t$ | = test circuit breaker                                | $t_r$ | = time delay of making device             |

Figure 6 – Synthetic make circuit and waveforms

## Annexe AA (informative)

### Déformation du courant

#### AA.1 Déformation du courant immédiatement avant le zéro de courant

La période d'interaction commence lorsque la tension d'arc change de façon significative et que le courant tend vers zéro. La variation de la tension d'arc modifie la forme et la pente du courant juste avant le zéro de courant.

Cet écart par rapport au courant présumé a pour origine le courant déformant, qui s'écoule principalement dans l'impédance à faible constante de temps et dépendant bien sûr de tous les paramètres du circuit réel.

La manière particulière dont le courant approche de zéro est directement responsable des conditions physiques du milieu inter-contacts du disjoncteur au moment du zéro de courant. L'interaction la plus importante entre le circuit et le disjoncteur résulte de la charge et de la décharge des capacités par la tension d'arc et de l'influence de cette dernière sur la pente du courant  $di/dt$  avant le zéro.

Sur un circuit simplifié, tel que celui de la figure AA.1a représentant un court-circuit dans le réseau ou en essai direct, la tension  $u$  alimente le courant d'arc  $i$  avec la tension d'arc appropriée  $u_a$ . En parallèle sur l'arc se trouve le condensateur  $C$ .

Si on admet que la tension d'arc  $u_a$  est nulle, alors le courant présumé de court-circuit  $i_p$  circule à travers l'arc (voir figure AA.1b), l'amplitude et la forme d'onde de ce courant étant fonction de la bobine d'inductance  $L$ , de la tension  $u$ , de la fréquence de cette tension et de l'instant d'injection du courant.

Si on admet que la tension d'alimentation  $u$  est nulle et qu'une tension d'arc existe, alors cette tension d'arc provoque la circulation d'un courant. Ce courant  $i_d$  (voir figure AA.1c) est le courant déformant qui se partage en deux courants  $i_{dL}$  à travers l'inductance  $L$  et  $i_{dC}$  à travers le condensateur  $C$ . Dans ces conditions, l'équation suivante s'applique:

$$u_a - L \cdot \frac{d}{dt}(i_{dL}) = 0$$

et

$$C \frac{d}{dt}(u_a) - i_{dC} = 0$$

On en déduit l'équation suivante pour  $i_d$ :

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

Si à la fois les tensions  $u$  et  $u_a$  existent (voir figure AA.1d), alors le courant résultant réel est donné par:

$$i = i_p - i_d$$

NOTE Dans les cas réels, des calculs sur machine permettent de mieux prendre en compte les formes des tensions d'arc.

## Annex AA (informative)

### Current distortion

#### AA.1 Current distortion immediately prior to current-zero

The interaction 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 is caused by the distortion current, which mainly flows in the low time constant impedance, 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.

In a simplified circuit, as in figure AA.1a 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 AA.1b) 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 AA.1c) is the distortion current, which will flow partly as  $i_{dL}$  through the inductance  $L$ , and partly as  $i_{dC}$  through the capacitance  $C$ . For this condition, the following equations apply:

$$u_a - L \cdot \frac{d}{dt}(i_{dL}) = 0$$

and

$$C \frac{d}{dt}(u_a) - i_{dC} = 0$$

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

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

if both of the voltages,  $u$  and  $u_a$  are present (see figure AA.1d), then the resulting actual current is given by:

$$i = i_p - i_d$$

NOTE For actual cases digital calculations by computers may be more appropriate where various arc-voltage wave shapes can be introduced.

## AA.2 Courant déformant pendant la période fort courant

Pendant cette période, la tension d'arc engendre un courant déformant  $i_d$  dans le circuit.  $i_d$  se superpose au courant total.

En le comparant au courant présumé, le courant d'arc résultant présente des différences sous quatre aspects: l'amplitude du courant, la durée de l'alternance, l'énergie d'arc et  $di/dt$ .

Pour évaluer l'influence de la tension d'arc, il suffit, en pratique, de considérer l'amplitude du courant et la durée de l'alternance.

En première approximation, deux caractéristiques de tension d'arc peuvent être considérées, à savoir:

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

Puisque le courant à travers le condensateur C (voir figure AA.1a) est petit pendant cette période d'arc, le schéma simplifié de la figure AA.2a peut être utilisé.

### AA.2.1 Distorsion due à un courant d'arc symétrique pendant une alternance

Les formules suivantes sont obtenues en négligeant la résistance dans le schéma de la figure AA.2a, ce qui est licite pour une seule alternance. Quelques résultats sont donnés aux figures AA.3a et AA.3b.

Les calculs utilisent les caractéristiques indiquées aux figures AA.2b et AA.2c.

$\hat{u} = L \cdot \omega \cdot \hat{i}_p$  = valeur de crête de la tension du circuit de courant

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

$\hat{i}$  = valeur de crête du courant d'arc réel (réduite par la tension d'arc)

$t_m$  = instant de la valeur de crête de  $\hat{i}$ .

#### a) Rapport des amplitudes de courant

- pour une tension d'arc constante:

$$\frac{\hat{i}}{\hat{i}_p} = \sin \omega \cdot t_m - \frac{U_a}{\hat{u}} \cdot \omega t_m$$

- pour une tension d'arc linéairement croissante:

$$\frac{\hat{i}}{\hat{i}_p} = \sin \omega \cdot t_m - \frac{S \omega}{2 \hat{u}} t_m^2$$

#### b) Durée réelle de l'alternance de courant $T_1$ (réduite par la tension d'arc)

- pour une tension d'arc constante:

$$\sin \omega T_1 = \frac{U_a}{\hat{u}} \omega T_1$$

- pour une tension d'arc linéairement croissante:

$$\sin \omega T_1 = \frac{S \omega}{2 \hat{u}} T_1^2$$

## AA.2 Current distortion during the high current interval

During this interval, the arc-voltage generates a distortion current  $i_d$ , in the circuit.  $i_d$  is superimposed on the total current.

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

To evaluate the influence of the arc-voltage it is sufficient, in practice, to consider the current amplitude and the loop duration.

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  $u_a = S \cdot t$

Since the current through the capacitor C (see figure AA.1a) will be small during this period of arcing, the simplified diagram of figure AA.2a is adequate.

### AA.2.1 Distortion during one loop of arcing related to a symmetrical current

The following formulae are derived, where the resistance in figure AA.2a is neglected since the effect of this during the single loop is negligible. Some results are given in figure AA.3a and AA.3b.

Calculations are made based on the characteristics shown in figure AA.2b and AA.2c.

- $\hat{u} = L \cdot \omega \cdot \hat{i}_p$  = peak value of voltage of current circuit  
 $\hat{i}_p$  = peak value of prospective current  
 $\hat{i}$  = peak value of actual current (reduced by arc-voltage)  
 $t_m$  = instant of peak value  $i$ .

#### a) Ratio of current amplitudes

- for constant arc-voltage:

$$\frac{\hat{i}}{\hat{i}_p} = \sin \omega \cdot t_m - \frac{U_a}{\hat{u}} \cdot \omega t_m$$

- for linearly rising arc-voltage:

$$\frac{\hat{i}}{\hat{i}_p} = \sin \omega \cdot t_m - \frac{S \omega}{2 \hat{u}} t_m^2$$

#### b) Actual current loop duration $T_1$ (reduced by arc-voltage)

- for constant arc-voltage

$$\sin \omega T_1 = \frac{U_a \omega}{\hat{u}} T_1$$

- for linearly rising arc-voltage:

$$\sin \omega T_1 = \frac{S \omega}{2 \hat{u}} T_1^2$$

Les figures AA.3a et AA.3b montrent la réduction relative de l'amplitude du courant  $\Delta i/\hat{i}_p$  et de la durée de l'alternance  $\Delta t/T_p$  en fonction respectivement du rapport  $U_a/\hat{u}$  pour une tension d'arc constante et du rapport  $S \cdot T_a/2 \cdot \hat{u}$  pour une tension d'arc linéairement croissante, où:

$$\Delta i = \hat{i}_p - \hat{i},$$

$$\Delta t = T_p - T_1$$

$T_p$  = durée présumée de l'alternance

$T_a$  = durée d'arc réelle ( $T_a = T_1$  pour une seule alternance d'arc, voir figures AA.2b et AA.2c).

### AA.2.2 Déformation dans le cas général

Le courant déformant en cas de défaut symétrique ou asymétrique avec un arc durant plus d'une alternance peut être calculé à l'aide des formules suivantes qui sont applicables dans les deux cas de tension d'arc constante ou linéairement croissante. Ces calculs sont basés sur le schéma de la figure AA.2a où la constante de temps  $L/R$  de l'impédance d'alimentation est introduite. Le courant présumé par unité est donné par:

$$i_p/\hat{i}_p = \sin(\omega t + \omega t_1 - \varphi) - \sin(\omega t_1 - \varphi) \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$$

où

$t$  = temps compté à partir du début du courant

$t_1$  = intervalle de temps compris entre le début de l'alternance positive de tension et le début du courant

$\varphi = \arctan \frac{\omega L}{R}$  pour un courant symétrique  $\varphi = \omega t_1$

Les courants déformants, par unité, sont:

$i_d/\hat{i}_p = C$  pour la première alternance d'arc

$i_d/\hat{i}_p = D - E$  pour la deuxième alternance d'arc

$i_d/\hat{i}_p = D - F + G$  pour la troisième alternance d'arc

où

$C, D, E, F$  et  $G$  sont définis comme suit:

a) pour une tension d'arc constante:

$$C = \frac{M}{\cos \varphi} \left[ 1 - e^{-\frac{R}{L}(t - t_{cs})} \right]$$

$$D = \frac{M}{\cos \varphi} \left[ 1 - e^{-\frac{R}{L}(t'_0 - t_{cs})} \right] e^{-\frac{R}{L}(t' - t'_0)}$$

$$E = \frac{M}{\cos \varphi} \left[ 1 - e^{-\frac{R}{L}(t - t'_0)} \right]$$

$$F = \frac{M}{\cos \varphi} \left[ 1 - e^{-\frac{R}{L}(t''_0 - t'_0)} \right] e^{-\frac{R}{L}(t - t''_0)}$$

$$G = \frac{M}{\cos \varphi} \left[ 1 - e^{-\frac{R}{L}(t - t''_0)} \right]$$

In figure AA.3a, and AA.3b relative reduction of current amplitude  $\Delta i/\hat{i}_p$  and current loop duration  $\Delta t/T_p$  are given as a function of ratio  $U_a/\hat{u}$  for constant arc-voltage and of ratio  $S \cdot T_a/2 \cdot \hat{u}$  for linearly rising arc-voltage respectively, where:

$$\Delta i = \hat{i}_p - \hat{i},$$

$$\Delta t = T_p - T_1$$

$T_p$  = prospective current loop duration

$T_a$  = actual arcing time ( $T_a = T_1$  for one loop of arcing, see figures AA.2b and AA.2c).

### AA.2.2 Distortion in general case

The distortion currents in the case of both symmetrical and asymmetrical currents including more than one loop of arcing are obtained by the following formulae which are applicable for the case of constant and linearly rising arc-voltages. These calculations are based on a circuit as in figure AA.2a where the  $L/R$  time constant of the supply impedance is introduced. The p.u. prospective current is given by:

$$i_p/\hat{i}_p = \sin(\omega t + \omega t_1 - \varphi) - \sin(\omega t_1 - \varphi) \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$$

where:

$t$  = time coordinate counting from the instant of current initiation

$t_1$  = time interval between the beginning of the positive voltage loop and current initiation

$\varphi = \arctan \frac{\omega L}{R}$  for symmetrical current  $\varphi = \omega t_1$

The per unit distortion currents are:

$$\begin{aligned} i_d/\hat{i}_p &= C && \text{for the first loop of arcing} \\ i_d/\hat{i}_p &= D - E && \text{for the second loop of arcing} \\ i_d/\hat{i}_p &= D - F + G && \text{for the third loop of arcing} \end{aligned}$$

where

$C, D, E, F$  and  $G$  are defined as follows:

a) for constant arc-voltage:

$$C = \frac{M}{\cos \varphi} \left[ 1 - e^{-\frac{R}{L}(t-t_{cs})} \right]$$

$$D = \frac{M}{\cos \varphi} \left[ 1 - e^{-\frac{R}{L}(t'_0-t_{cs})} \right] e^{-\frac{R}{L}(t'-t'_0)}$$

$$E = \frac{M}{\cos \varphi} \left[ 1 - e^{-\frac{R}{L}(t-t'_0)} \right]$$

$$F = \frac{M}{\cos \varphi} \left[ 1 - e^{-\frac{R}{L}(t'_0-t'_0)} \right] e^{-\frac{R}{L}(t-t'_0)}$$

$$G = \frac{M}{\cos \varphi} \left[ 1 - e^{-\frac{R}{L}(t-t'_0)} \right]$$

où

$M = \frac{U_a}{\hat{u}}$  = rapport entre la tension d'arc et la valeur de crête de la tension à fréquence industrielle

$$\cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$$

$t_{cs}$  = instant de séparation des contacts

$t'_0, t''_0$  = instants de la fin de chaque alternance

b) pour une tension d'arc linéairement croissante:

$$C = \frac{M}{\cos \varphi} \left[ (t - t_{cs}) - \frac{L}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}(t - t_{cs})}) \right]$$

$$D = \frac{M}{\cos \varphi} \left[ (t'_0 - t_{cs}) - \frac{L}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}(t'_0 - t_{cs})}) \right] e^{-\frac{R}{L}(t - t'_0)}$$

$$E = \frac{M}{\cos \varphi} \left[ (t - t'_0) - \frac{L}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}(t - t'_0)}) + (t'_0 - t_{cs}) \cdot (1 - e^{-\frac{R}{L}(t - t'_0)}) \right]$$

$$F = \frac{M}{\cos \varphi} \left[ (t''_0 - t'_0) - \frac{L}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}(t''_0 - t'_0)}) + (t'_0 - t_{cs}) \cdot (1 - e^{-\frac{R}{L}(t''_0 - t'_0)}) \right] e^{-\frac{R}{L}(t - t''_0)}$$

$$G = \frac{M}{\cos \varphi} \left[ (t - t''_0) - \frac{L}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}(t - t''_0)}) + (t''_0 - t_{cs}) \cdot (1 - e^{-\frac{R}{L}(t - t''_0)}) \right]$$

où

$$M = \frac{S \cdot T_a}{2 \hat{u}}$$

Les réductions relatives de l'amplitude et de la durée de l'alternance du courant sont données aux figures AA.3a à AA.3d dans quelques cas caractéristiques en fonction de la dernière alternance d'arc.

Pour un courant symétrique, les valeurs sont données à la figure AA.3a en fonction du rapport  $U_a/\hat{u}$  dans le cas de tension d'arc constante et à la figure AA.3b en fonction du rapport  $S \cdot T_a/2\hat{u}$  dans le cas d'une tension d'arc linéairement croissante. Les figures AA.3c et AA.3d donnent les résultats correspondant à un courant asymétrique.

Pour les différentes durées d'arc, on a considéré trois cas caractéristiques: 1, 2 et 2,5 alternances. Pour les courants asymétriques, la position de séparation des contacts a été fixée à 1,5 cycle après l'origine du courant.

L'effet de la tension d'arc dépend beaucoup, non seulement de la tension d'arc elle-même mais aussi de la durée d'arc et de l'asymétrie du courant. Par conséquent, chaque cas nécessite une évaluation précise.

NOTE Pour comparer les courbes correspondant aux deux types d'arc, les valeurs de  $U_a$  ont été choisies de manière à ce que la tension d'arc croissant linéairement atteigne deux fois la valeur constante de tension d'arc, au moment du dernier zéro de courant.

where

$M = \frac{U_a}{\hat{u}}$  = the ratio between the arc-voltage and the peak value of the power-frequency voltage

$$\cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$$

$t_{cs}$  = instant of contact separation

$t'_0, t''_0$  = instants at the end of each current loop

b) for linearly rising arc-voltage:

$$C = \frac{M}{\cos \varphi} \left[ (t - t_{cs}) - \frac{L}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}(t - t_{cs})}) \right]$$

$$D = \frac{M}{\cos \varphi} \left[ (t'_0 - t_{cs}) - \frac{L}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}(t'_0 - t_{cs})}) \right] e^{-\frac{R}{L}(t - t'_0)}$$

$$E = \frac{M}{\cos \varphi} \left[ (t - t'_0) - \frac{L}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}(t - t'_0)}) + (t'_0 - t_{cs}) \cdot (1 - e^{-\frac{R}{L}(t - t'_0)}) \right]$$

$$F = \frac{M}{\cos \varphi} \left[ (t''_0 - t'_0) - \frac{L}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}(t''_0 - t'_0)}) + (t'_0 - t_{cs}) \cdot (1 - e^{-\frac{R}{L}(t''_0 - t'_0)}) \right] e^{-\frac{R}{L}(t - t''_0)}$$

$$G = \frac{M}{\cos \varphi} \left[ (t - t''_0) - \frac{L}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}(t - t''_0)}) + (t''_0 - t_{cs}) \cdot (1 - e^{-\frac{R}{L}(t - t''_0)}) \right]$$

where

$$M = \frac{S \cdot T_a}{2 \hat{u}}$$

Relative reductions of current amplitudes and loop durations related to the last arcing loop for some typical cases are given in figures AA.3a to AA.3d.

For symmetrical current, values are given for constant arc-voltage as a function of ratio  $U_a/\hat{u}$  in figure AA.3a and for linearly rising arc-voltage as a function of the ratio  $S \cdot T_a/2\hat{u}$  in figure AA.3b. For asymmetrical current the corresponding results are given in figures AA.3c and AA.3d.

For arcing times, three typical values, i.e. for one, two and two and half loops, are introduced. In the case of asymmetrical current contact parting positions have been selected starting about 1,5 cycles after current initiation.

The modifying of arc-voltage is much dependent on not only arc-voltage but also arcing time and current asymmetry, therefore an exact evaluation for each case is necessary.

NOTE In order to be able to compare the curves relevant to either type of arcing suitable values have been chosen for the arc-voltages: the value at the last current zero for linearly rising arc-voltage is twice the value  $U_a$  for the constant arc-voltage.

### AA.3 Exemples d'estimation des paramètres du courant déformant

Quelques exemples d'application des méthodes d'évaluation du courant déformant proposées ci-dessus, aux articles AA.1 et AA.2 sont donnés, ci-après, pour l'essai tripolaire d'un disjoncteur 123 kV.

Pour les exemples d'essais synthétiques, on a supposé égales les tensions d'arc et les positions de départ des contacts pour le disjoncteur en essai et pour le disjoncteur auxiliaire.

#### AA.3.1 Essai avec un courant symétrique

##### AA.3.1.1 Tension d'arc constante

###### *Essai direct*

Tension assignée

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

Tension d'essai monophasé

$$U_t = \frac{123 \cdot 1,3}{\sqrt{3}} = 92 \text{ kV}$$

Valeur moyenne de la tension d'arc constante (dernière alternance)

$$U_a = 1 \text{ kV}$$

En conséquence

$$\frac{U_a}{\hat{u}} = \frac{1}{92 \cdot \sqrt{2}} = 0,0077$$

d'où par le calcul pour une alternance d'arc (voir AA.2.1):

$$\frac{\Delta i}{\hat{i}_p} = -12 \%$$

et:

$$\frac{\Delta t}{T_p} = -0,7 \%$$

###### *Essai synthétique*

Tension du circuit de courant

$$U_1 = 31 \text{ kV}$$

Valeur moyenne d'une tension d'arc constante (disjoncteur en essai et disjoncteur auxiliaire, dernière alternance)

$$U_{as} = 2 U_a = 2 \text{ kV}$$

donc:

$$\frac{U_{as}}{\hat{u}} = \frac{2}{31 \cdot \sqrt{2}} = 0,046$$

et à l'aide de la figure AA.3a pour une alternance d'arc

$$\frac{\Delta i}{\hat{i}_p} = -7 \%$$

et:

$$\frac{\Delta t}{T_p} = -4,5 \%$$

### AA.3 Examples of estimation of the parameters of the distorted current

In the following, some examples of application of the methods of evaluation of the distorted current shown in the preceding clauses AA.1 and AA.2 are given for the single pole test of a 123 kV circuit-breaker.

For the synthetic test examples, equal arc-voltages and contact parting positions of both the test and the auxiliary circuit-breaker are assumed.

#### AA.3.1 Symmetrical current test

##### AA.3.1.1 Constant arc-voltage

*Direct test*

Rated voltage

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

Single pole test voltage

$$U_t = \frac{123 \cdot 1,3}{\sqrt{3}} = 92 \text{ kV}$$

Mean value of constant arc-voltage (last loop)

$$U_a = 1 \text{ kV}$$

Therefore:

$$\frac{U_a}{\hat{u}} = \frac{1}{92 \cdot \sqrt{2}} = 0,0077$$

by calculation for one loop of arcing (see AA.2.1):

$$\frac{\Delta i}{\hat{i}_p} = -12 \%$$

and:

$$\frac{\Delta t}{T_p} = -0,7 \%$$

*Synthetic test*

Current circuit voltage

$$U_1 = 31 \text{ kV}$$

Mean value of constant arc-voltage (test and auxiliary circuit-breaker, last loop)

$$U_{as} = 2 U_a = 2 \text{ kV}$$

therefore:

$$\frac{U_{as}}{\hat{u}} = \frac{2}{31 \cdot \sqrt{2}} = 0,046$$

from figure AA.3a for one loop of arcing

$$\frac{\Delta i}{\hat{i}_p} = -7 \%$$

and:

$$\frac{\Delta t}{T_p} = -4,5 \%$$

### AA.3.1.2 Tension d'arc croissant linéairement

#### Essai direct

Tension d'essai monophasé

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

Tension d'arc croissant linéairement

$$\frac{S T_a}{2} = 3 \text{ kV}$$

donc:

$$\frac{S T_a}{2 \hat{u}} = \frac{3}{92 \sqrt{2}} = 0,023$$

et par la figure AA.3b pour une alternance d'arc

$$\frac{\Delta i}{\hat{i}_p} = -1,7\%$$

et:

$$\frac{\Delta t}{T_p} = -2,2\%$$

#### Essai synthétique

Tension du circuit de courant

$U_1 = 31 \text{ kV}$  comme ci-dessus

Tension d'arc croissant linéairement (disjoncteur en essai et disjoncteur auxiliaire)

$$\frac{S T_a}{2} = 2 \cdot 3 \text{ kV} = 6 \text{ kV}$$

donc:

$$\frac{S T_a}{2 \hat{u}} = \frac{6}{31 \sqrt{2}} = 0,137$$

et par la figure AA.3b pour une alternance d'arc

$$\frac{\Delta i}{\hat{i}_p} = -10\%$$

et:

$$\frac{\Delta t}{T_p} = -11,2\%$$

Dans le premier exemple, les tolérances sur l'amplitude et la durée de l'alternance de courant à fréquence industrielle ne doivent pas, en principe, être dépassées pendant l'essai synthétique réel selon 4.1. Cependant, cela n'est possible que si la décroissance de la composante alternative du courant est négligeable.

Dans le deuxième exemple, la tension du circuit de courant doit être augmentée ou d'autres mesures doivent être prises, comme indiqué au 4.1, lorsque les tolérances sur la durée de l'alternance sont dépassées. Alors que la tolérance sur l'amplitude du courant n'est apparemment pas dépassée, elle peut l'être en pratique quand il existe une décroissance de la composante alternative du courant présumé.

**AA.3.1.2 Linearly rising arc-voltage***Direct test*

Single pole test voltage

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

Linearly rising arc-voltage

$$\frac{S T_a}{2} = 3 \text{ kV}$$

therefore:

$$\frac{S T_a}{2 \hat{u}} = \frac{3}{92 \sqrt{2}} = 0,023$$

from figure AA.3b for one loop of arcing

$$\frac{\Delta i}{\hat{i}_p} = -1,7\%$$

and:

$$\frac{\Delta t}{T_p} = -2,2\%$$

*Synthetic test*

Current circuit voltage

$$U_1 = 31 \text{ kV as above}$$

Linearly rising arc-voltage (test and auxiliary circuit-breaker)

$$\frac{S T_a}{2} = 2 \cdot 3 \text{ kV} = 6 \text{ kV}$$

therefore:

$$\frac{S T_a}{2 \hat{u}} = \frac{6}{31 \sqrt{2}} = 0,137$$

from figure AA.3b for one loop of arcing

$$\frac{\Delta i}{\hat{i}_p} = -10\%$$

and:

$$\frac{\Delta t}{T_p} = -11,2\%$$

In the first example, the tolerances on the amplitude and the duration of the power-frequency current loop, according to 4.1, 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 the second example, the current circuit voltage has to be increased or other measures as described in 4.1 have to be taken 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.

### AA.3.2 Essai avec un courant asymétrique

Si la tension d'arc est présumée presque constante ou croissant linéairement, on peut utiliser les courbes des figures AA.3c et AA.3d. La méthode d'évaluation est similaire à celle décrite pour le cas symétrique. Par exemple, dans le cas des tensions d'arc constante:

#### Essai direct

Tension d'essai monophasé

$$U_t = \frac{123 \cdot 13}{\sqrt{3}} = 92 \text{ kV}$$

(comme ci-dessus)

Tension d'arc constante

$$U_a = 1 \text{ kV}$$

donc:

$$\frac{U_a}{\hat{u}} = \frac{1}{92 \cdot \sqrt{2}} = 0,0077$$

pour une séparation des contacts environ 1,5 cycle après l'apparition du courant et une alternance d'arc

$$\frac{\Delta i}{\hat{i}_p} = -1\%$$

et:

$$\frac{\Delta t}{T_p} = -0,6 \% \text{ (figure AA.3c)}$$

#### Essai synthétique

Tension de la source de courant

$$U_1 = 14,2 \text{ kV}$$

Tension d'arc constante (disjoncteur en essai et disjoncteur auxiliaire)

$$U_a = 2 \text{ kV}$$

donc:

$$\frac{U_a}{\hat{u}} = \frac{2}{14,2 \cdot \sqrt{2}} = 0,10$$

pour le même cas que ci-dessus:

$$\frac{\Delta i}{\hat{i}_p} = -12,6 \%$$

et:

$$\frac{\Delta t}{T_p} = -8,0 \% \text{ (figure AA.3c)}$$

La tension d'arc réelle peut ne pas présenter l'une des caractéristiques simplifiées. Dans un tel cas, la réduction de courant pendant l'essai synthétique peut être mesurée à partir des enregistrements oscillographes réels ou calculés. Le courant réel de l'essai direct qui est nécessaire pour déterminer la tension de la source de courant d'essai synthétique ne peut être calculé.

Pour les disjoncteurs ayant une tension d'arc relativement faible (par exemple  $U_a = 2 \% U_1$ ) l'effet de la tension d'arc sur le courant d'arc dans le réseau et dans le circuit direct est négligeable. Par conséquent, on peut admettre pour courant de référence, le courant présumé spécifié.

NOTE Si l'ouverture du disjoncteur auxiliaire est retardée par rapport à l'ouverture du disjoncteur en essai, ou si un disjoncteur auxiliaire avec une tension d'arc plus faible est utilisé, son influence sur le courant coupé sera plus faible que celle du disjoncteur en essai.

### AA.3.2 Asymmetrical current test

If the arc-voltage is approximately constant or linearly rising, the curves in figures AA.3c and AA.3d can be used. The method of evaluation is similar to the one outlined for the symmetrical case. For example in case of constant arc-voltage:

#### Direct test

Single pole test voltage

$$U_t = \frac{123 \cdot 13}{\sqrt{3}} = 92 \text{ kV}$$

(as above)

Constant arc-voltage

$$U_a = 1 \text{ kV}$$

therefore:

$$\frac{U_a}{\hat{u}} = \frac{1}{92 \cdot \sqrt{2}} = 0,0077$$

for contact parting at around 1,5 cycle after current initiation and one loop of arcing

$$\frac{\Delta i}{\hat{i}_p} = -1\%$$

and:

$$\frac{\Delta t}{T_p} = -0,6\% \text{ (figure AA.3c)}$$

#### Synthetic test

Current circuit voltage

$$U_1 = 14,2 \text{ kV}$$

Constant arc-voltage (test and auxiliary circuit-breakers)

$$U_a = 2 \text{ kV}$$

therefore:

$$\frac{U_a}{\hat{u}} = \frac{2}{14,2 \sqrt{2}} = 0,10$$

for the same situation as above:

$$\frac{\Delta i}{\hat{i}_p} = -12,6\%$$

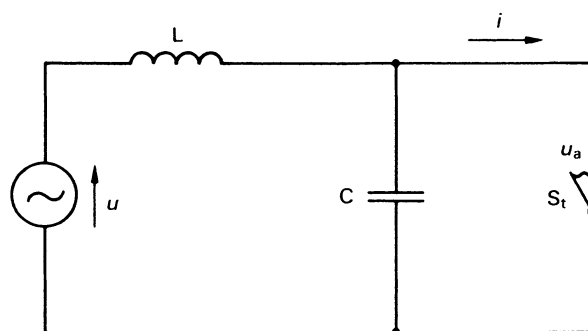
and:

$$\frac{\Delta t}{T_p} = -8,0\% \text{ (figure AA.3c)}$$

The actual arc-voltage may not follow one of the simplified characteristics. In such a case the current reduction during the synthetic test can be measured from actual oscillograms or calculated. The actual current of the direct test which is required to establish the synthetic test driving voltage can only be calculated.

For circuit-breakers having relatively low arc-voltage (e.g.  $U_a = 2\% U_1$ ), the modifying effect of the arc-voltage on the current in the system or in the direct circuit is negligible. Therefore the specified prospective current is assumed as reference current.

NOTE If the opening of the auxiliary circuit-breaker is delayed in relation to the opening of the test circuit-breaker 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.



133/89

$u$  = tension alimentant le circuit direct

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

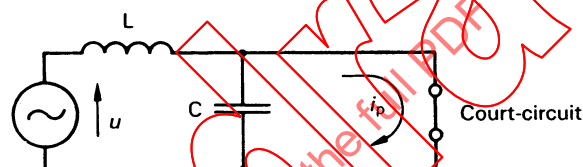
$u_a$  = tension d'arc du disjoncteur

$S_t$  = disjoncteur

$L$  = bobine d'inductance du circuit direct à pleine puissance, contrôlant avec  $u$  le courant de court-circuit

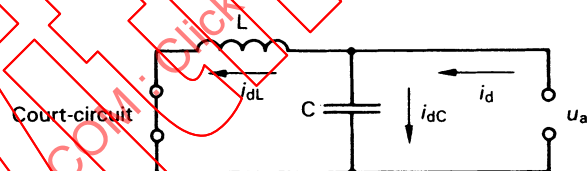
$i$  = courant d'arc

Figure AA.1a – Circuit direct, schéma simplifié



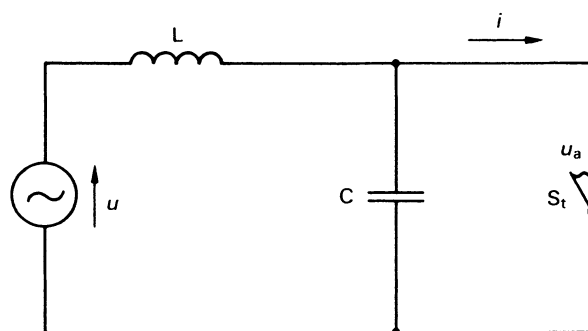
IEC 358/2000

Figure AA.1b – Courant de court-circuit présumé



IEC 359/2000

Figure AA.1c – Courant déformant



133/89

$u$  = voltage supplying the direct circuit

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

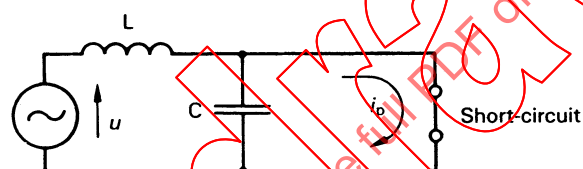
$u_a$  = arc-voltage of circuit-breaker

$S_t$  = circuit-breaker

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

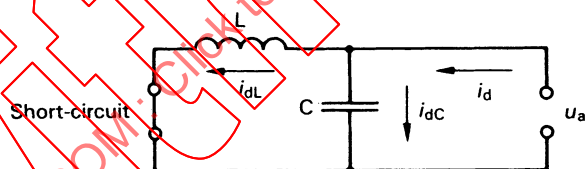
$i$  = arc-current

**Figure AA.1a – Direct circuit, simplified diagram**



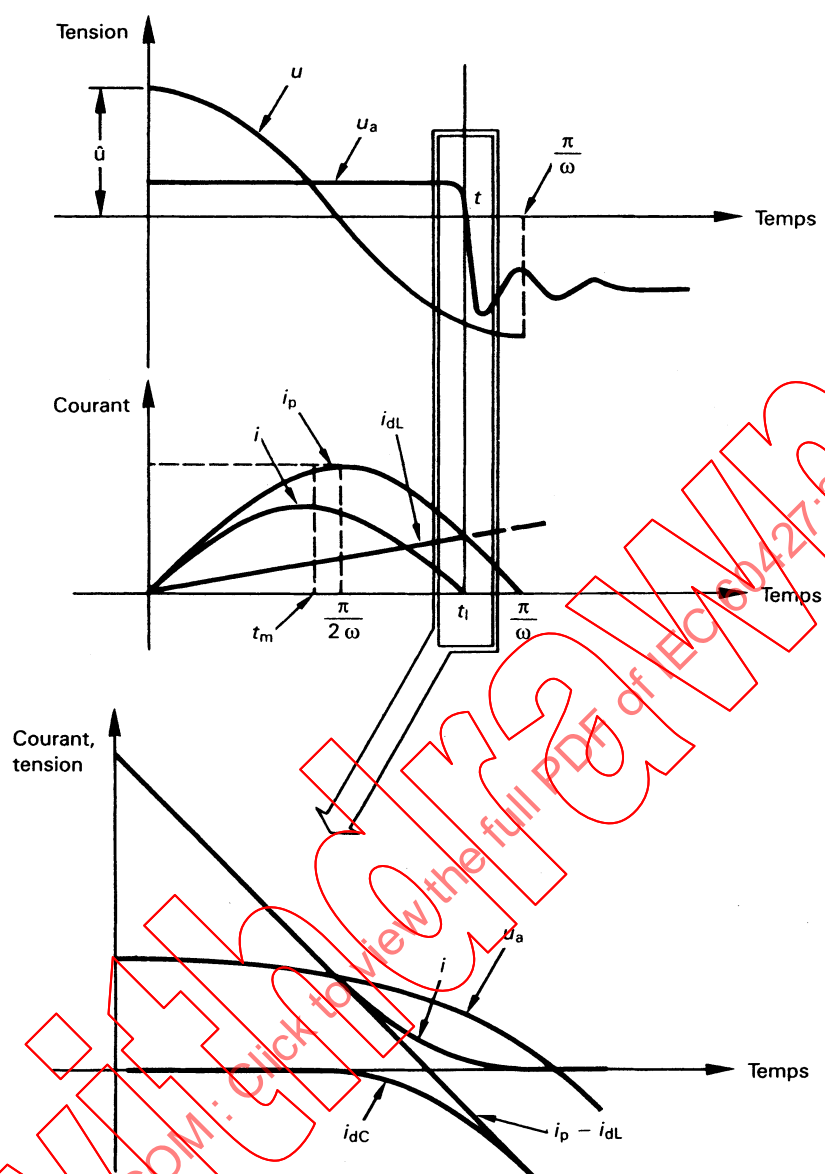
IEC 358/2000

**Figure AA.1b – Prospective short-circuit current**



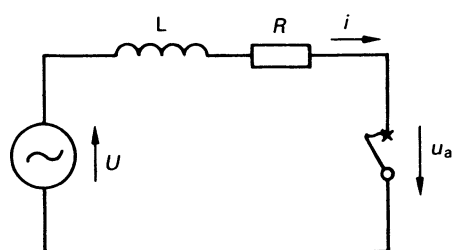
IEC 359/2000

**Figure AA.1c – Distortion current**



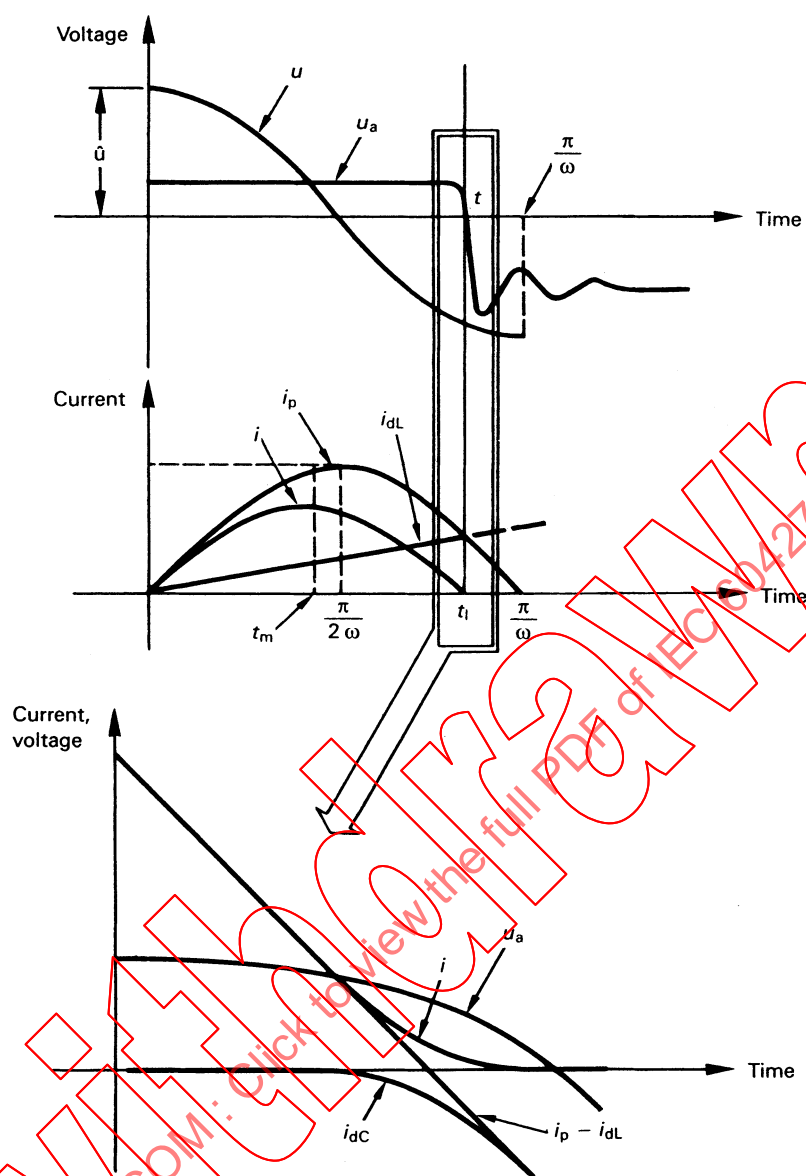
IEC 360/2000

Figure AA.1d – Courant déformant



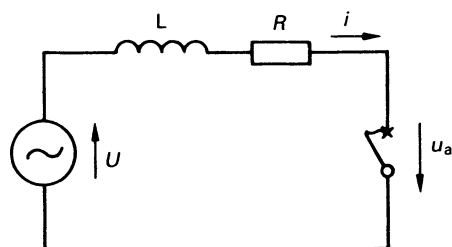
137/89

Figure AA.2a – Schéma de circuit simplifié



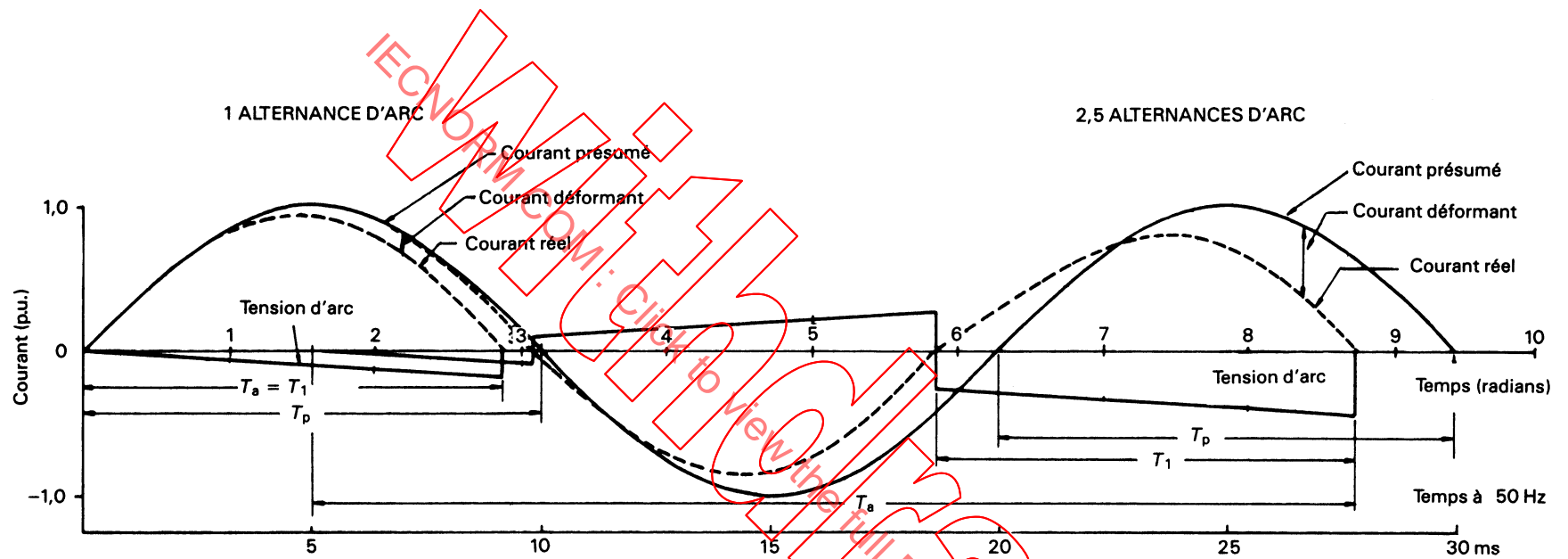
IEC 360/2000

Figure AA.1d – Distortion current



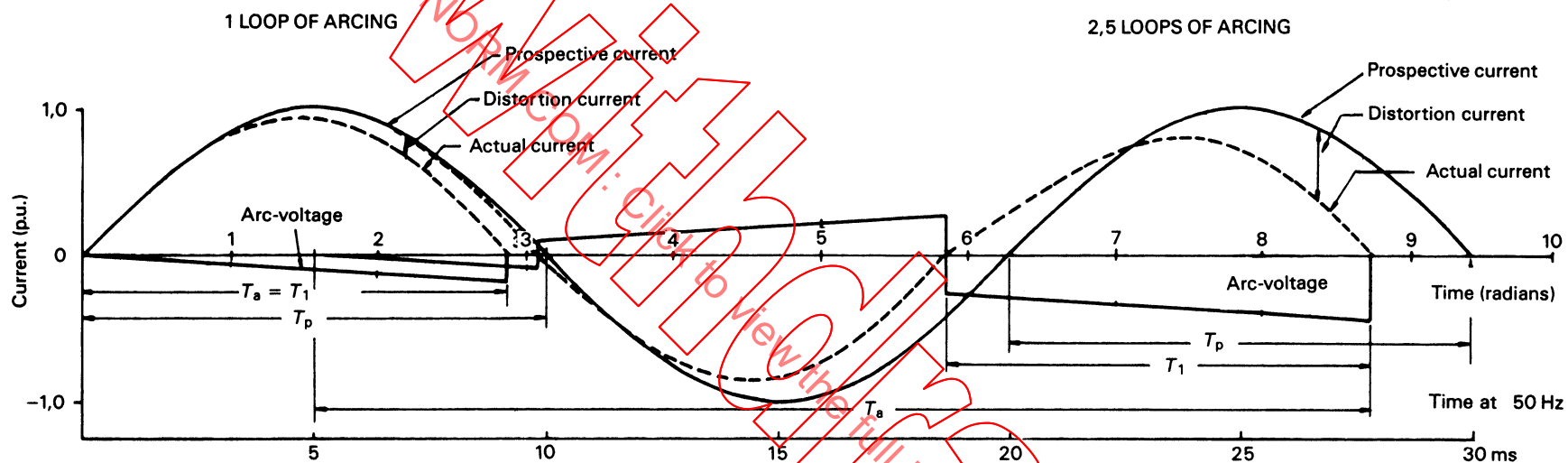
137/89

Figure AA.2a – Simplified circuit diagram



IEC 361/2000

Figure AA.2b – Caractéristiques du courant et de la tension d'arc pour courant symétrique



IEC 361/2000

Figure AA.2b – Current and arc-voltage characteristics for symmetrical current

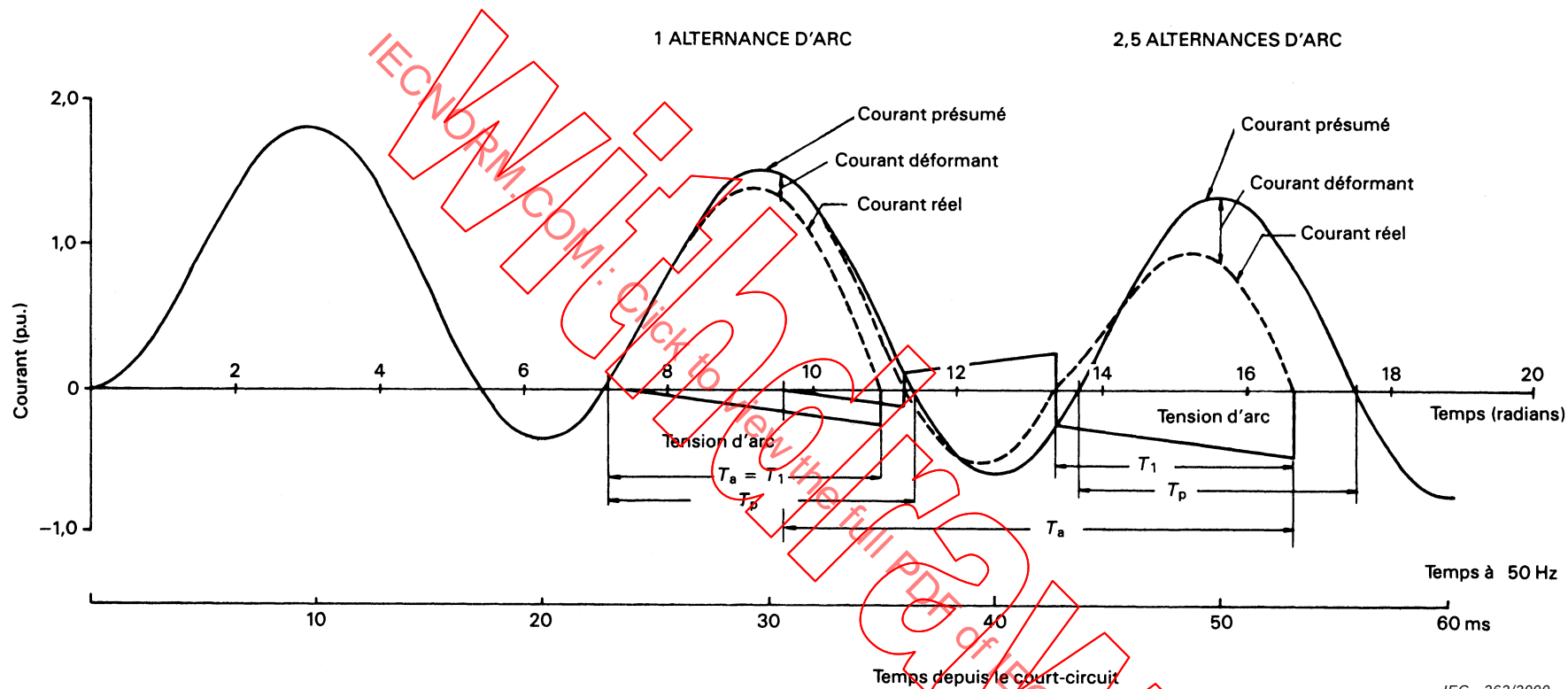


Figure AA.2c – Caractéristiques de courant et de tension d'arc pour courant asymétrique

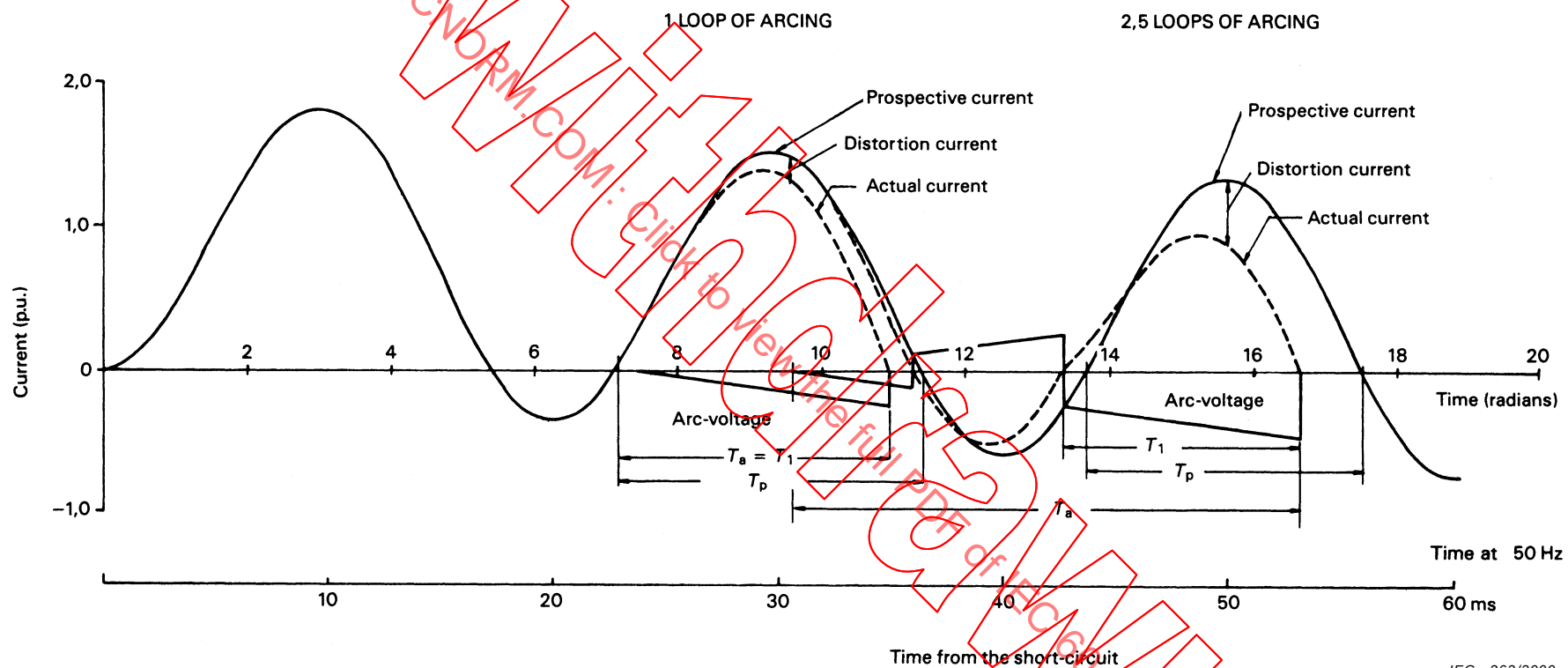
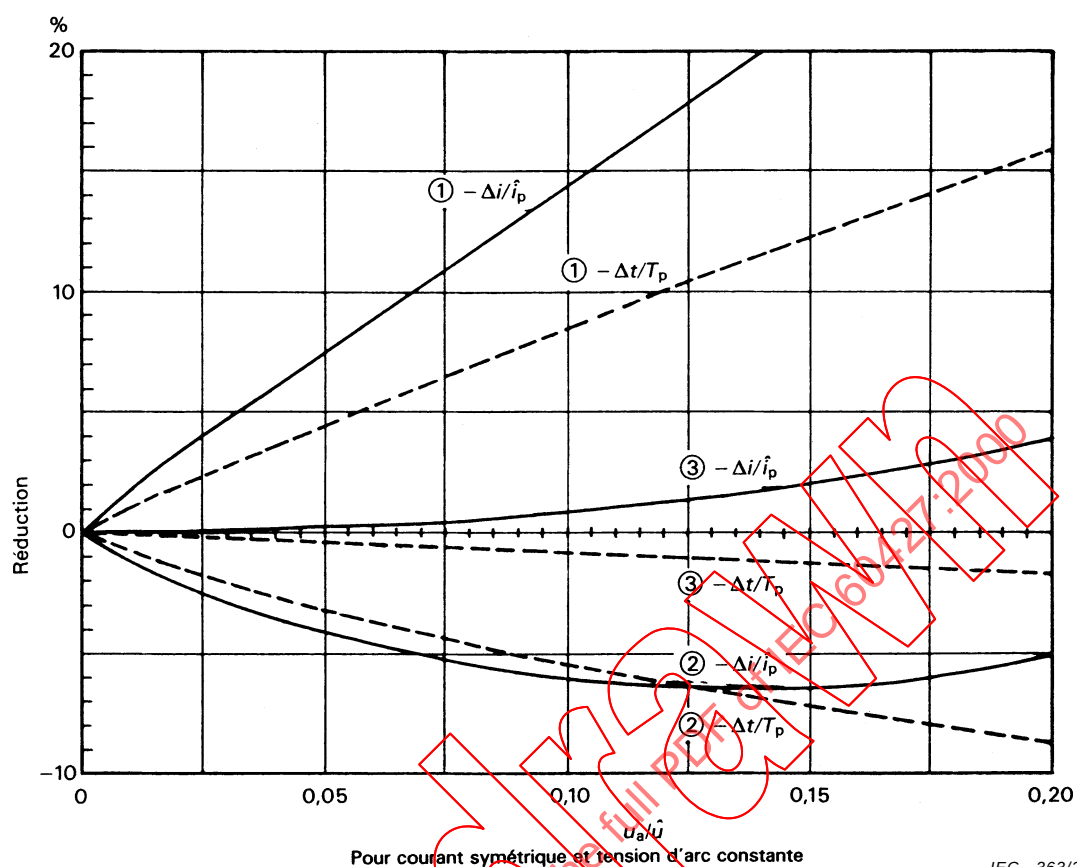


Figure AA.2c – Current and arc-voltage characteristics for asymmetrical current

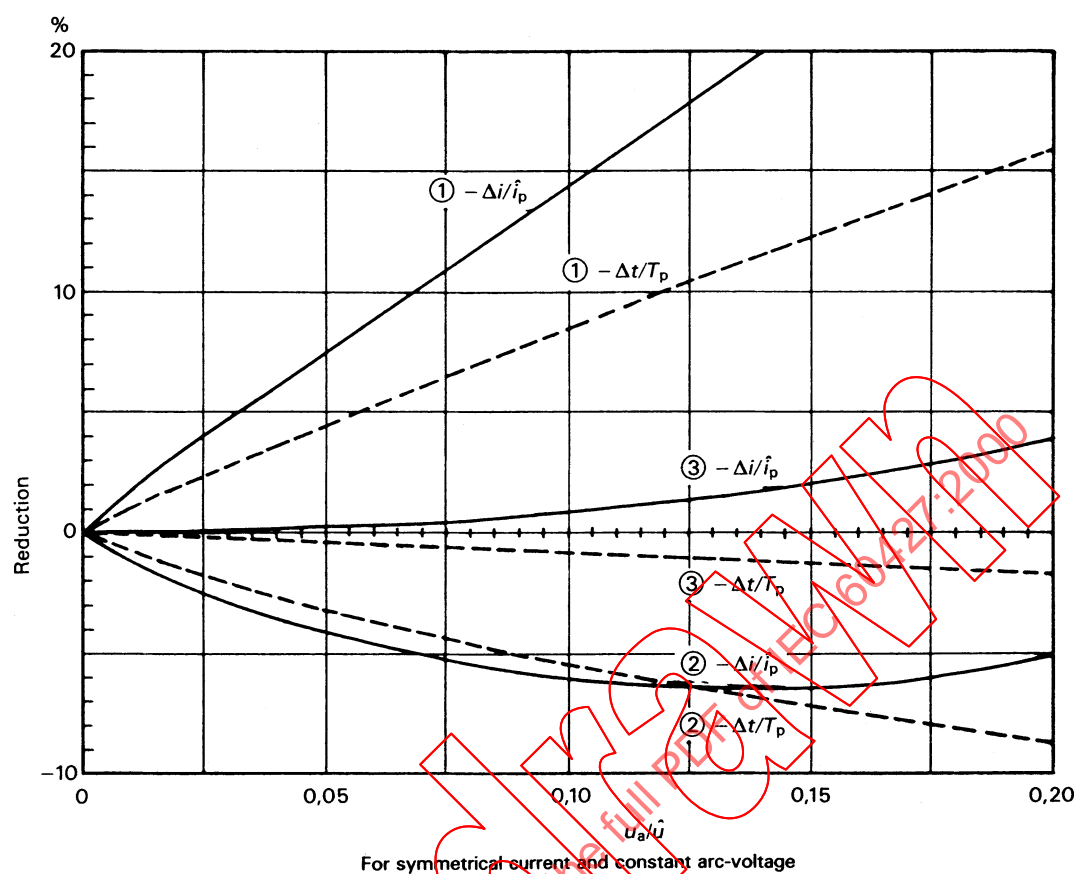
IEC 362/2000



- ① Arc durant 1 alternance
- ② Arc durant 2 alternances
- ③ Arc durant 2,5 alternances

Voir figure AA.2b

Figure AA.3a – Réduction de l'amplitude et de la durée de la dernière alternance

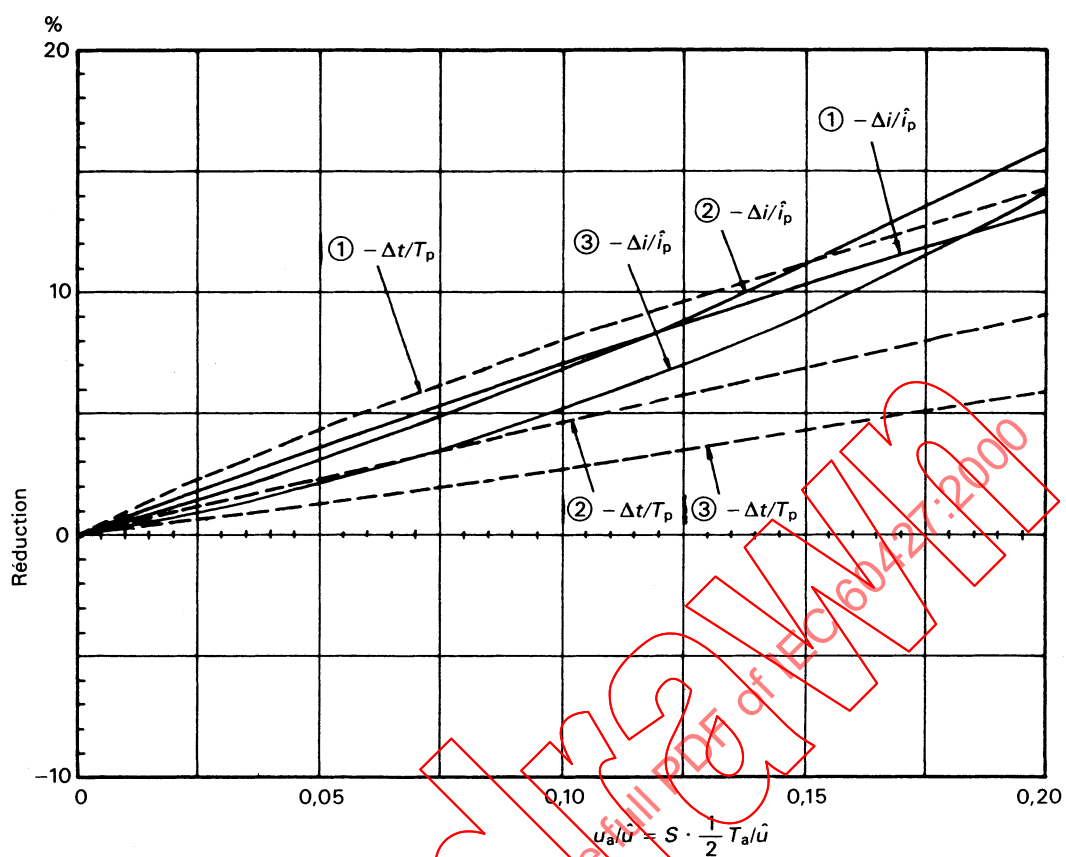


IEC 363/2000

- ① 1 loop of arcing
- ② 2 loops of arcing
- ③ 2,5 loops of arcing

See figure AA.2b

Figure AA.3a – Reduction of amplitude and duration of final current loop of arcing



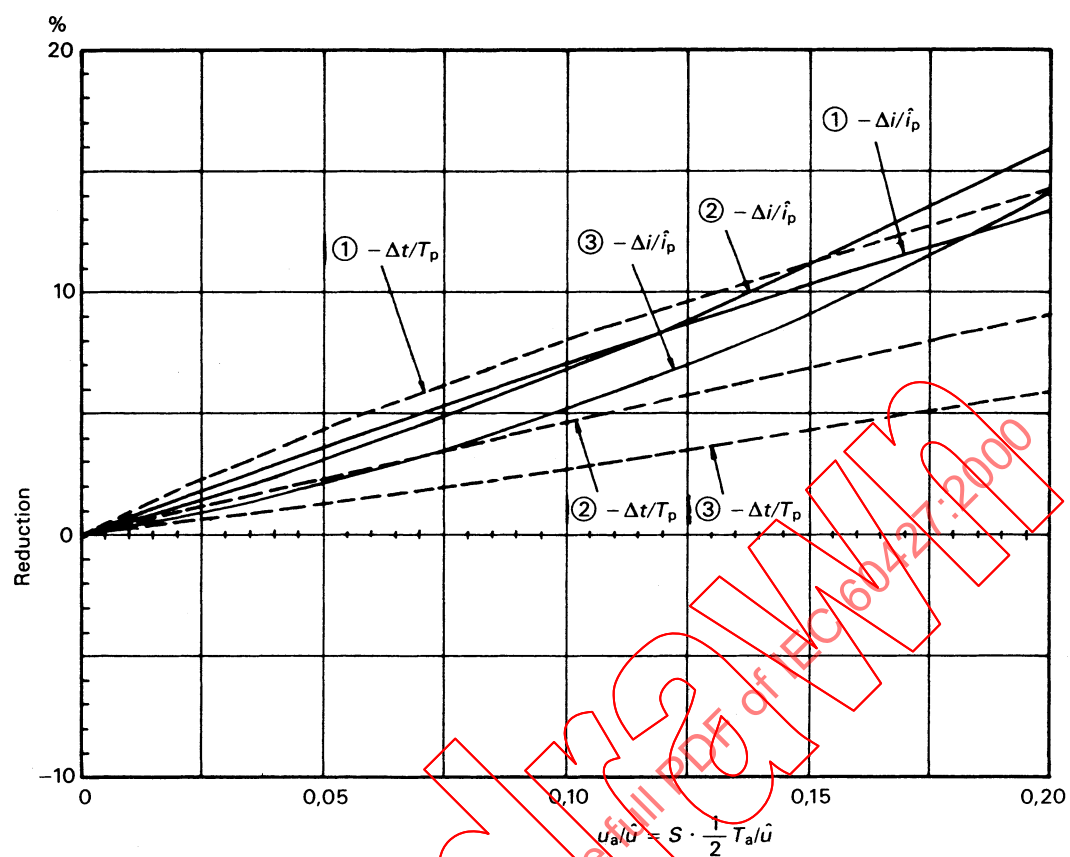
Pour courant symétrique et tension d'arc croissant linéairement

IEC 364/2000

- ① Arc durant 1 alternance
- ② Arc durant 2 alternances
- ③ Arc durant 2,5 alternances

Voir figure AA.2b

**Figure AA 3b – Réduction de l'amplitude et de la durée de la dernière alternance**



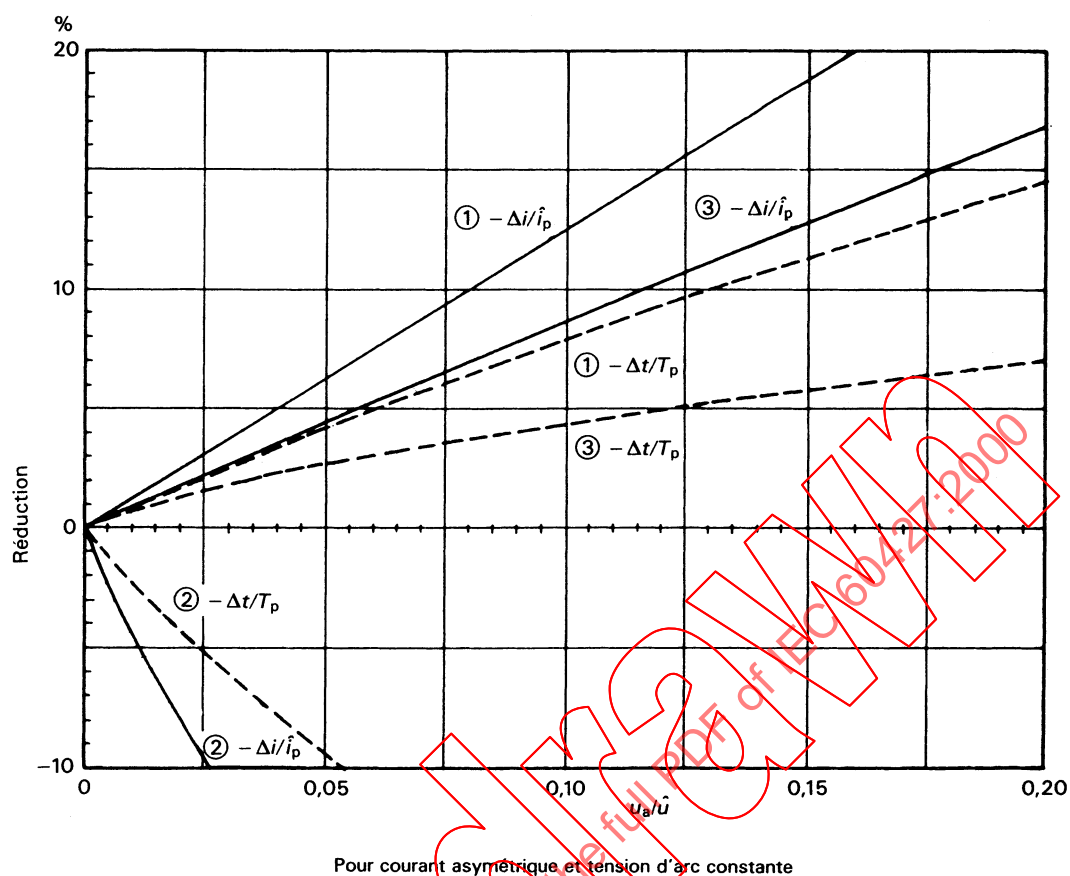
For symmetrical current and linearly rising arc-voltage

IEC 364/2000

- ① 1 loop of arcing
- ② 2 loops of arcing
- ③ 2,5 loops of arcing

See figure AA.2b

**Figure AA.3b – Reduction of amplitude and duration of final current loop of arcing**

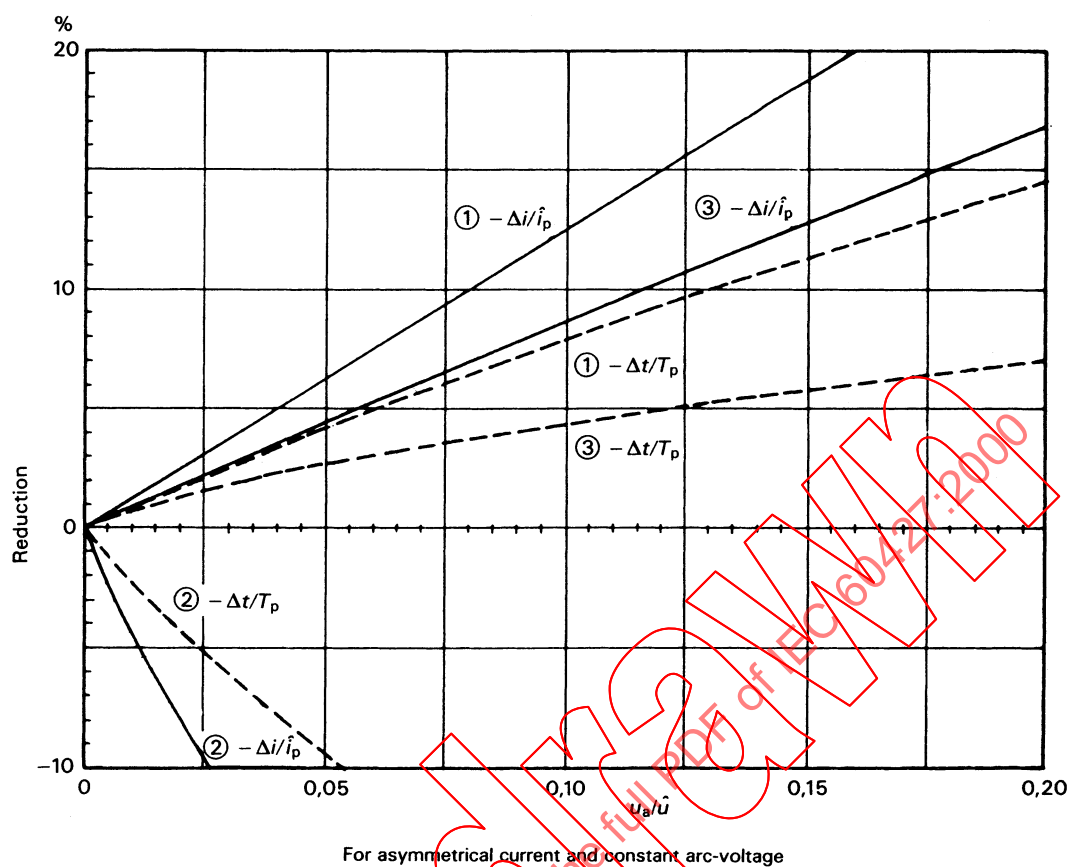


IEC 365/2000

- ① Arc durant 1 alternance
- ② Arc durant 2 alternances
- ③ Arc durant 2,5 alternances

Voir figure AA.2c

**Figure AA.3c – Réduction de l'amplitude et de la durée de la dernière alternance**

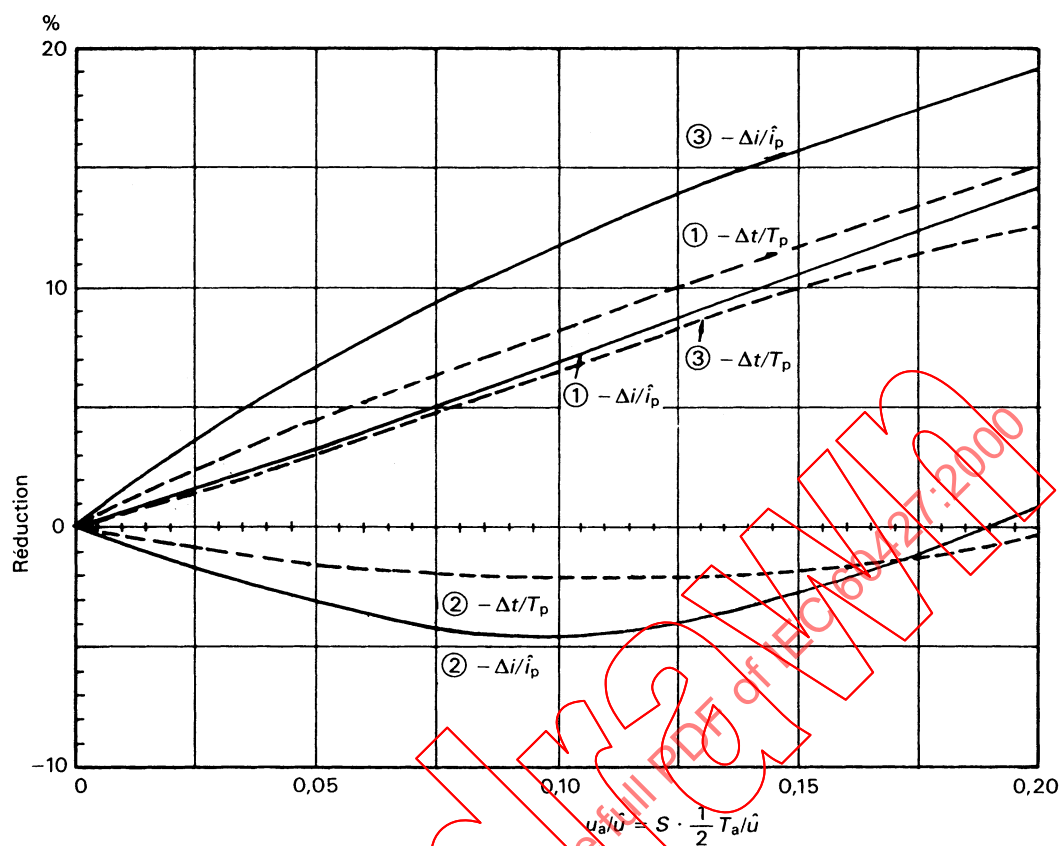


IEC 365/2000

- ① 1 loop of arcing
- ② 2 loops of arcing
- ③ 2,5 loops of arcing

See figure AA.2c

**Figure AA.3c – Reduction of amplitude and duration of final current loop of arcing**



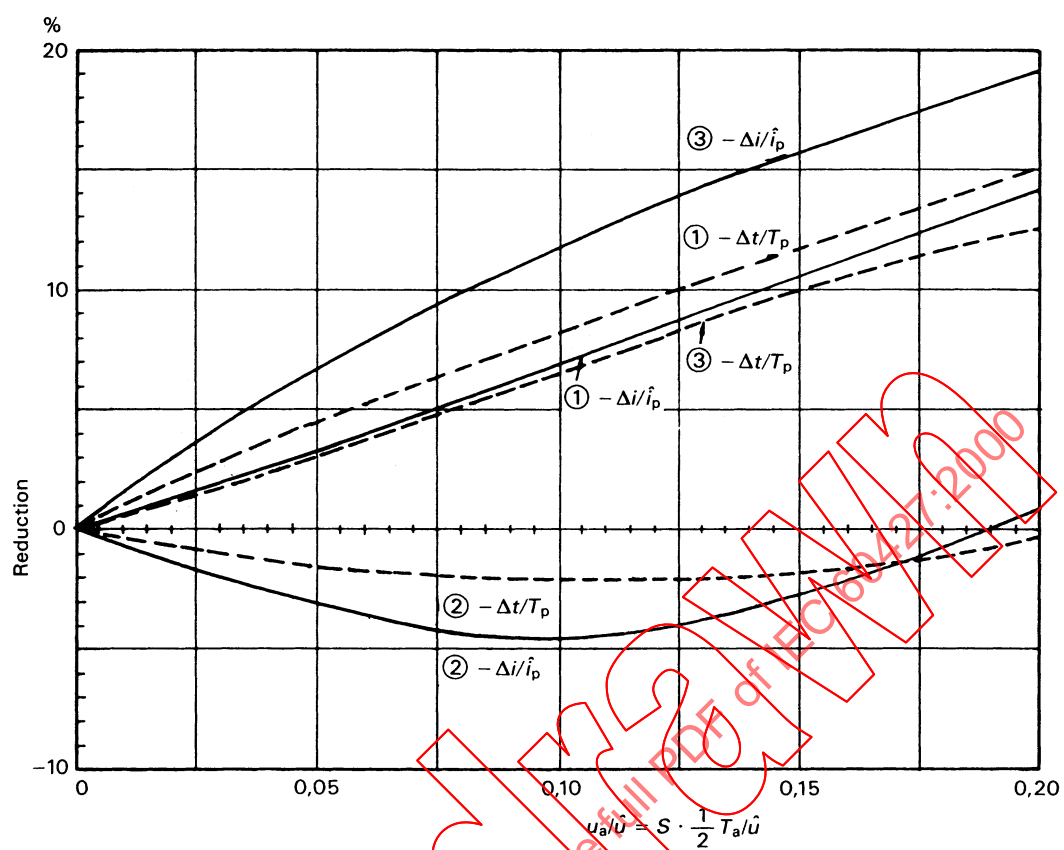
Pour courant asymétrique et tension d'arc croissant linéairement

IEC 366/2000

- ① Arc durant 1 alternance
- ② Arc durant 2 alternances
- ③ Arc durant 2,5 alternances

Voir figure AA.2c

**Figure AA.3d – Réduction de l'amplitude et de la durée de la dernière alternance**



For asymmetrical current and linearly rising arc-voltage

IEC 366/2000

- ① 1 loop of arcing
- ② 2 loops of arcing
- ③ 2,5 loops of arcing

See figure AA.2c

**Figure AA.3d – Reduction of amplitude and duration of final current loop of arcing**

## Annexe BB (informative)

### Méthodes d'injection de courant

#### BB.1 Injection de courant

Dans un circuit d'essai synthétique utilisant l'injection de courant, la superposition des courants a lieu légèrement avant le zéro du courant de court-circuit à fréquence industrielle. Un courant d'amplitude plus petite mais de fréquence plus élevée, obtenu à partir du circuit de tension, est superposé au courant existant dans le disjoncteur en essai ou dans le disjoncteur auxiliaire. L'instant de commutation de ce courant injecté est choisi au moyen d'un circuit de commande dépendant du courant. Il convient que cet instant soit tel que l'onde de courant résultant dans le disjoncteur en essai corresponde à celle du courant de coupure spécifié avant le zéro de courant pendant la période de changement significatif de tension d'arc.

De cette manière, le disjoncteur en essai est relié automatiquement au circuit de tension après l'interruption du courant par le disjoncteur auxiliaire de telle sorte qu'il n'y a aucun décalage entre la contrainte de courant et l'application de la contrainte de tension.

##### BB.1.1 Circuit d'injection de courant avec circuit de tension en parallèle avec le disjoncteur en essai (injection parallèle)

La figure BB.1 montre le schéma simplifié d'un circuit d'injection de courant dont la source de tension est connectée en parallèle avec le disjoncteur en essai.

Le circuit de tension est commuté un court instant avant le zéro du courant de court-circuit à fréquence industrielle, avant la période d'interaction. A cet instant, un courant oscillatoire à haute fréquence  $i_h$  est superposé au courant de court-circuit à fréquence industrielle  $i$  avec la même polarité pour obtenir le courant d'essai total dans le disjoncteur en essai.

Lorsque le disjoncteur auxiliaire coupe le courant de court-circuit à fréquence industrielle  $i$ , le disjoncteur en essai est seulement relié au circuit de tension et  $i_h$  est le seul courant restant. Le circuit de tension fournit aussi la tension de rétablissement aux bornes du disjoncteur en essai après la coupure de ce courant.

La figure BB.2 montre un exemple de séquence de l'injection. Les deux points d'inflexion indiquent de façon typique le début de l'injection de courant dans le disjoncteur en essai et la coupure du courant de court-circuit à fréquence industrielle par le disjoncteur auxiliaire. La forme d'onde de la tension transitoire de rétablissement peut être réglée en ajustant  $Z_h$  et  $C_{dh}$  (figure BB.1) pour satisfaire aux prescriptions de la CEI 60056 (voir 4.1.3).

##### BB.1.2 Circuit d'injection de courant avec circuit de tension en parallèle avec le disjoncteur auxiliaire (injection série)

La figure BB.3 montre le circuit simplifié du schéma d'injection de courant avec le circuit de tension en parallèle avec le disjoncteur auxiliaire.

Après commutation du circuit de tension, peu avant le zéro du courant de court-circuit à fréquence industrielle, le courant oscillatoire haute fréquence  $i_h$  est superposé, avec la polarité inverse au courant  $i$  à fréquence industrielle dans le disjoncteur auxiliaire.

## Annex BB (informative)

### Current injection methods

#### BB.1 Current injection

In a synthetic test circuit 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 to that of the specified breaking current prior to the current-zero during the interval 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.

##### BB.1.1 Current injection circuit with the voltage circuit in parallel with the test circuit-breaker (parallel circuit)

Figure BB.1 shows the simplified circuit diagram of a current injection circuit with the voltage circuit connected in parallel with the test circuit-breaker.

The voltage circuit is switched in shortly before the zero of the power-frequency short-circuit current, prior to the interaction interval. At this time 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 auxiliary circuit-breaker interrupts the power-frequency short-circuit current  $i$ , the test circuit breaker is connected only to the voltage circuit and  $i_h$  is the only remaining current. The voltage circuit also provides the recovery voltage across the test circuit-breaker after the current is interrupted.

Figure BB.2 shows an example of injection timing. The two points of inflection typically indicate the start of the current injection in the test circuit-breaker and the interruption of the power-frequency short-circuit current by the auxiliary circuit-breaker. The waveshape of the transient recovery voltage can be adjusted by varying  $Z_h$  and  $C_{dh}$  (figure BB.1), to obtain compliance with the requirements of IEC 60056 (see 4.1.3).

##### BB.1.2 Current injection circuit with the voltage circuit in parallel with the auxiliary circuit-breaker (series circuit)

Figure BB.3 shows the simplified circuit diagram. of a current injection circuit 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.

Dès que le courant résultant est interrompu dans le disjoncteur auxiliaire, le courant oscillatoire traverse le disjoncteur en essai et le circuit de courant. Le disjoncteur en essai fait maintenant partie d'un circuit qui comprend en série le circuit de courant et le circuit de tension. Après extinction du courant résultant par le disjoncteur en essai, la TTR est créée à la fois par le circuit de tension et le circuit de courant.

La figure BB.4 montre un exemple de séquence de l'injection. Le seul point d'inflexion correspond à l'interruption du courant dans le disjoncteur auxiliaire.

La forme d'onde de la tension de rétablissement peut être réglée en ajustant  $Z_h$  et  $C_{dh}$  ou  $Z_1$  et  $C_{d1}$  (figure BB.3) pour satisfaire aux prescriptions de la CEI 60056 (voir 4.1.3).

## BB.2 Détermination de la période de changement significatif de la tension d'arc

Pour déterminer la période de changement significatif de la tension d'arc qui apparaît immédiatement avant le zéro de courant, la méthode suivante peut être appliquée, selon les caractéristiques de chaque tension d'arc.

Les tensions d'arc des disjoncteurs ont des formes générales très variées. Dans nombre de cas, la tension d'arc n'est pas stable mais fluctue autour d'une valeur moyenne. Dans le but d'évaluer le changement significatif, une valeur moyenne est obtenue en traçant une ligne entre les minimums et maximums de la courbe (figure BB.5). La forme des caractéristiques de tension d'arc moyenne peut aussi varier considérablement.

La plupart des disjoncteurs présentent une tension d'arc approximativement constante ou croissant régulièrement pendant l'alternance de courant avec une augmentation appréciable juste avant le zéro de courant. Dans de tels cas, il n'est pas difficile de déterminer à partir des oscillogrammes l'instant à partir duquel le changement significatif commence. Dans ce but, il est préférable d'utiliser un oscillographe donnant un tracé d'amplitude relativement grand pour la tension d'arc et ayant une échelle de temps suffisamment rapide pour permettre une mesure précise de la période de changement significatif de la tension d'arc.

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

- 1) la tension d'arc reste quasi constante ou croît régulièrement pendant l'alternance de courant presque jusqu'à l'instant du zéro de courant;
- 2) des changements de tension d'arc apparaissent très longtemps avant le zéro de courant.

Dans ces cas, la fréquence du courant d'injection doit être aussi basse que possible en tenant compte des exigences de 4.2.1.

After the resulting current in the auxiliary circuit-breaker has ceased to flow, the oscillatory current commutates into the test circuit-breaker and the current circuit. The test circuit-breaker is now part of a circuit which comprises the series-connected 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 current circuit.

Figure BB.4 shows an example of injection timing. The single point of inflection corresponds to the interruption of current in the auxiliary circuit-breaker.

The waveshape of the recovery voltage can be adjusted by varying  $Z_h$  and  $C_{dh}$  as well as  $Z_1$  and  $C_{d1}$  (figure BB.3) to obtain compliance with the requirements of IEC 60056 (see 4.1.3).

## BB.2 Determination of the interval of significant change of the arc-voltage

To determine the interval 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.

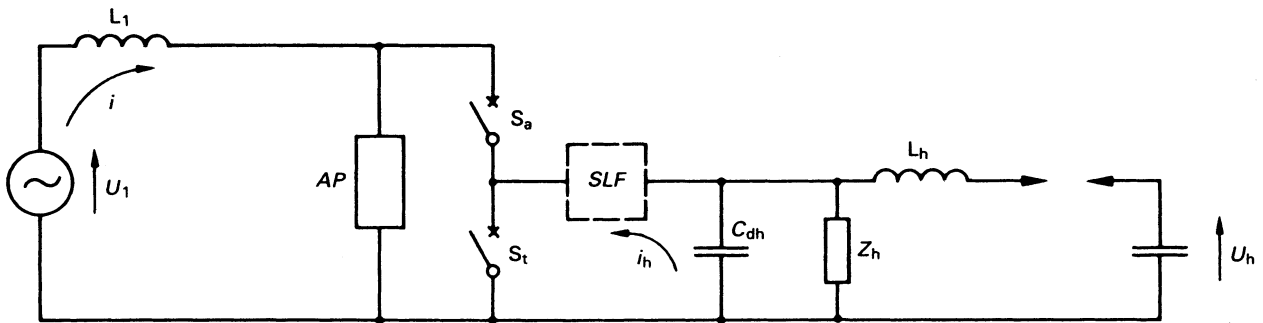
The arc-voltages of circuit-breakers vary considerably in general shape. In many cases, the arc-voltage is not steady but fluctuates about a mean value. For the purpose of identifying a significant change, a mean value is obtained by drawing a smooth curve between the maximums and minimums (figure BB.5). The shape of mean arc-voltage characteristics may also vary widely.

Most circuit-breakers show a nearly constant or steadily rising arc-voltage during the current loop, with an appreciable increase just prior to current-zero. 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 interval of significant change of arc-voltage to be measured accurately.

In some cases, it may be difficult to determine the interval 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.

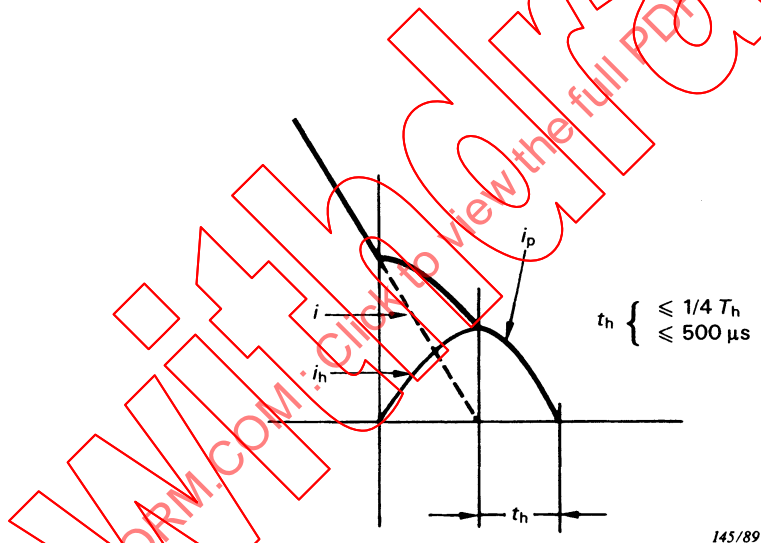
In these cases, an injection current frequency as low as possible shall be used, taking account also of the requirements in 4.2.1.



144/89

|                                                                 |                                                                                         |
|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| $U_1$ = tension du circuit de courant                           | $C_{dh}$ = capacité simulant le retard initial                                          |
| $L_1$ = bobine d'inductance du circuit de courant               | $L_h$ = bobine d'inductance du circuit de tension                                       |
| $AP$ = circuit de réallumage de l'arc                           | $U_h$ = tension de charge du circuit de tension                                         |
| $S_a$ = disjoncteur auxiliaire                                  | $i$ = courant du circuit de courant                                                     |
| $S_t$ = disjoncteur en essai                                    | $i_h$ = courant injecté                                                                 |
| $Z_h$ = impédance d'onde équivalente dans le circuit de tension | $SLF$ = circuit pour l'essai de défaut proche en ligne (pour les essais correspondants) |

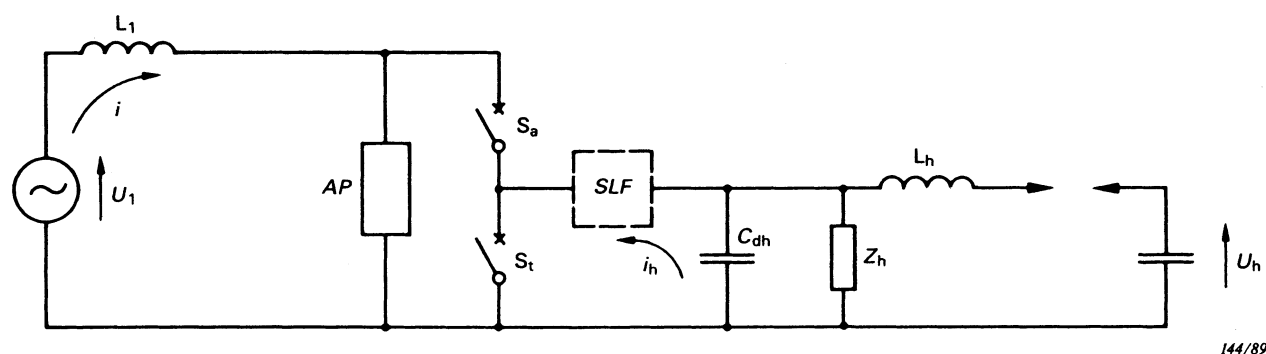
**Figure BB.1 – Circuit type à injection de courant où le circuit de tension est en parallèle avec le disjoncteur en essai**



145/89

|                                              |                                                                                |
|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| $i$ = courant dans le disjoncteur auxiliaire | $T_h$ = durée d'une période du courant injecté                                 |
| $i_h$ = courant injecté                      | $t_h$ = durée pendant laquelle l'arc n'est alimenté que par le courant injecté |
| $i_p$ = courant dans le disjoncteur en essai |                                                                                |

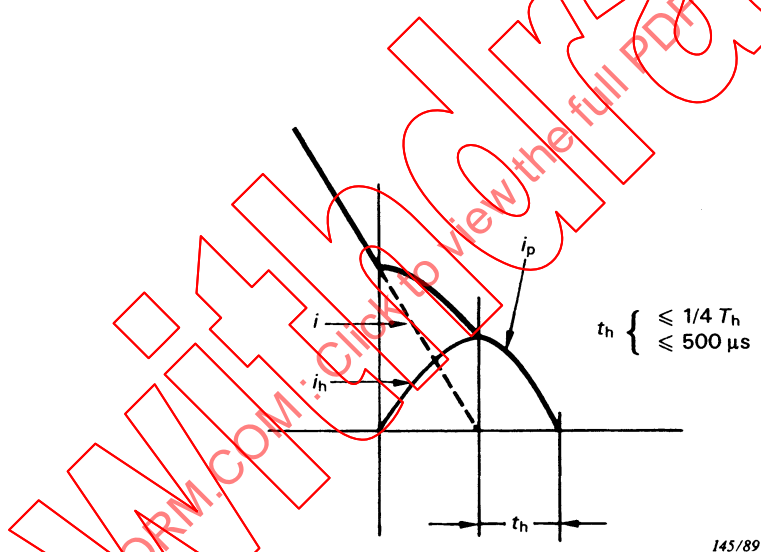
**Figure BB.2 – Séquence de l'injection du courant dans le circuit de la figure BB.1**



144/89

- |                                                       |                                                                |
|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| $U_1$ = voltage of current circuit                    | $C_{dh}$ = capacitance for time delay of voltage circuit       |
| $L_1$ = inductance of current circuit                 | $L_h$ = inductance of voltage circuit                          |
| $AP$ = arc prolonging circuit                         | $U_h$ = charging voltage of voltage circuit                    |
| $S_a$ = auxiliary circuit-breaker                     | $i$ = current of the current circuit                           |
| $S_t$ = test circuit-breaker                          | $i_h$ = injected current                                       |
| $Z_h$ = equivalent surge impedance of voltage circuit | $SLF$ = short-line-fault circuit (for the corresponding tests) |

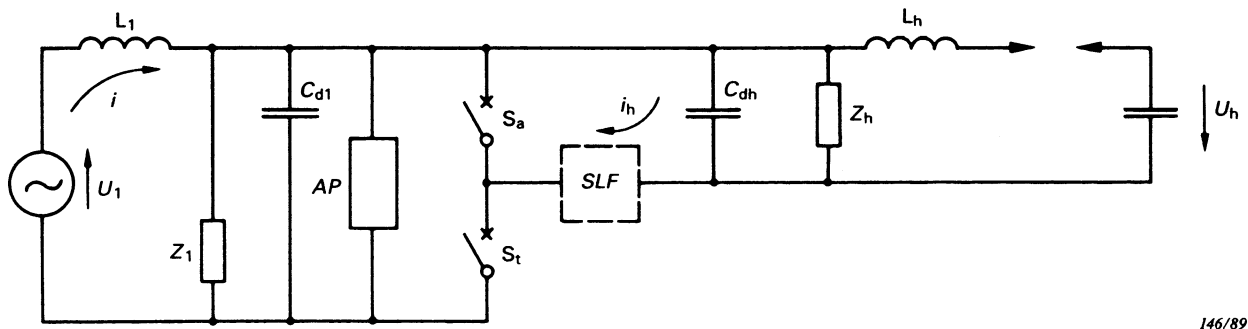
**Figure BB.1 – Typical current injection circuit with voltage circuit in parallel with the test circuit-breaker**



145/89

- |                                                |                                                                       |
|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| $i$ = current in the auxiliary circuit-breaker | $T_h$ = duration of one period of the injected current                |
| $i_h$ = injected current                       | $t_h$ = time during which the arc is fed only by the injected current |
| $i_p$ = current in the test circuit-breaker    |                                                                       |

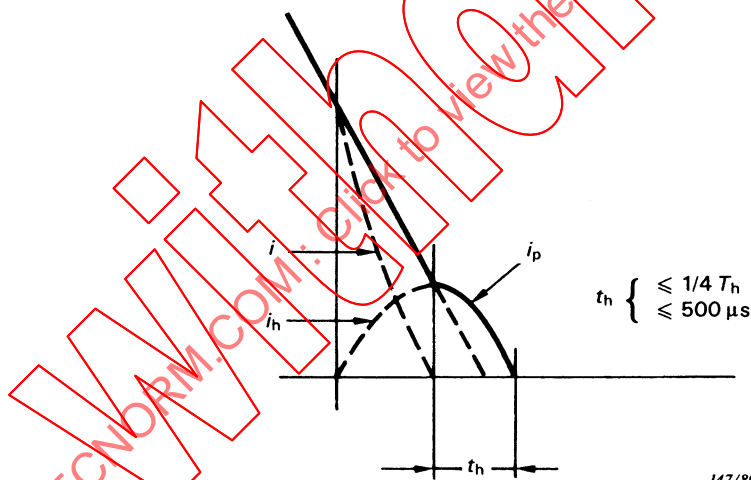
**Figure BB.2 – Injection timing for current injection scheme with circuit BB.1**



146/89

|                                                                 |                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| $U_1$ = tension du circuit de courant                           | $U_h$ = tension de charge du circuit de tension                                       |
| $L_1$ = bobine d'inductance du circuit de courant               | $i$ = courant du circuit de courant                                                   |
| AP = circuit de réallumage de l'arc                             | $i_h$ = courant injecté                                                               |
| $S_1$ = disjoncteur auxiliaire                                  | $Z_1$ = impédance d'onde équivalente dans le circuit de courant                       |
| $S_a$ = disjoncteur en essai                                    | $C_{d1}$ = capacité simulant le retard dans le circuit de courant                     |
| $Z_h$ = impédance d'onde équivalente dans le circuit de tension | SLF = circuit pour l'essai de défaut proche en ligne (pour les essais correspondants) |
| $C_{dh}$ = capacité représentant le retard initial              | $L_h$ = bobine d'inductance du circuit de tension                                     |

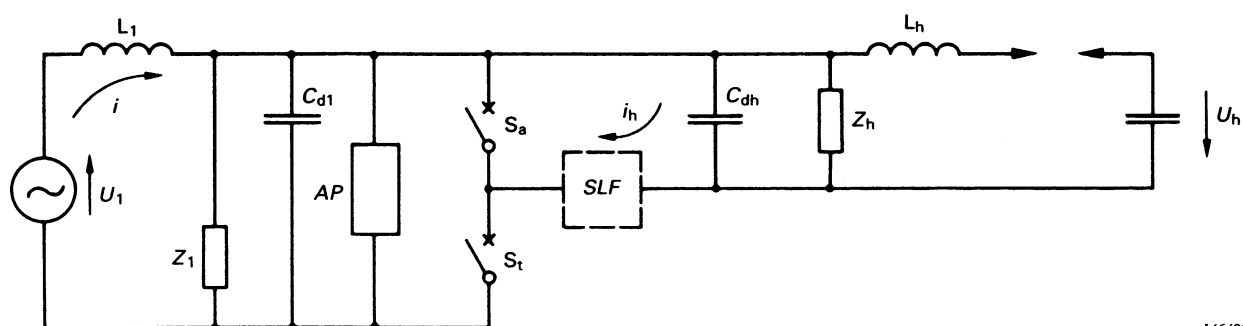
**Figure BB.3 – Circuit type à injection de courant où le circuit de tension est en parallèle avec le disjoncteur auxiliaire.**



147/89

|                                                    |                                                                                |
|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| $i$ = courant traversant le disjoncteur auxiliaire | $t_h$ = durée pendant laquelle l'arc n'est alimenté que par le courant injecté |
| $i_h$ = courant injecté                            | $i_p$ = courant dans le disjoncteur en essai                                   |

**Figure BB.4 – Séquence de l'injection dans le circuit de la figure BB.3**

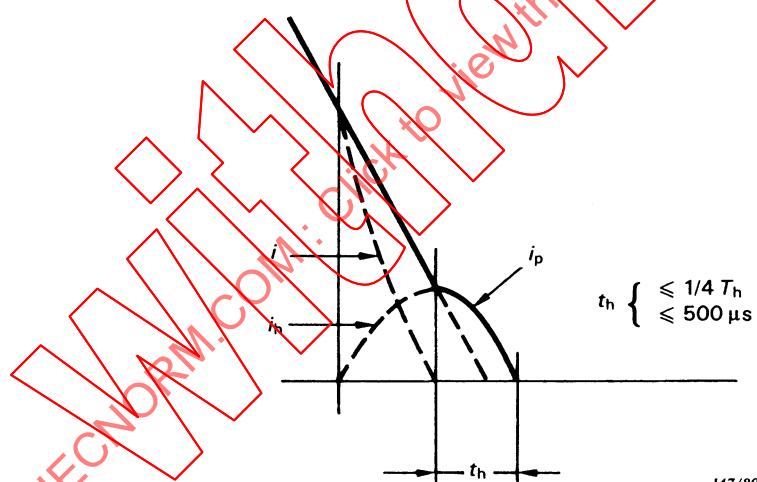


146/89

$U_1$  = voltage of current circuit  
 $L_1$  = inductance of current circuit  
 $AP$  = arc prolonging circuit  
 $S_1$  = auxiliary circuit-breaker  
 $S_a$  = test circuit-breaker  
 $Z_h$  = equivalent surge impedance of voltage circuit  
 $C_{dh}$  = capacitance for time delay of voltage circuit

$U_h$  = charging voltage of voltage circuit  
 $i$  = current of the current circuit  
 $i_h$  = injected current  
 $Z_1$  = equivalent surge impedance of current circuit  
 $C_{d1}$  = capacitance for time delay of current circuit  
 $SLF$  = short-line-fault circuit (for the corresponding tests)  
 $L_h$  = inductance of voltage circuit

**Figure BB.3 – Typical current injection circuit with voltage circuit in parallel with the auxiliary circuit-breaker**



147/89

$i$  = current in the auxiliary circuit-breaker

$t_h$  = time during which the arc is fed only by the injected current

$i_h$  = injected current

$i_p$  = current in the test circuit-breaker

**Figure BB.4 – Injection timing for current injection scheme with circuit BB.3**

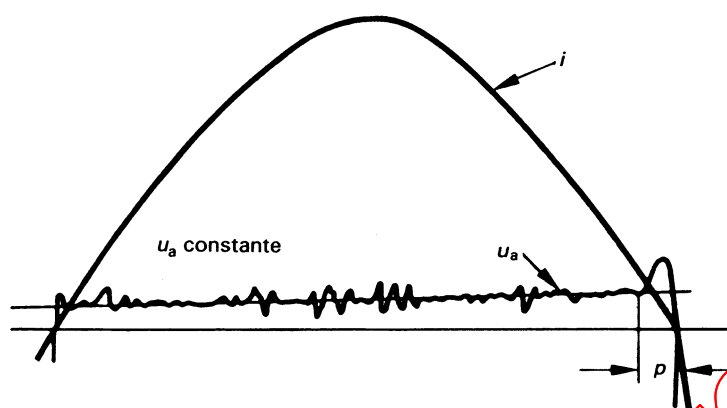


Figure BB.5a

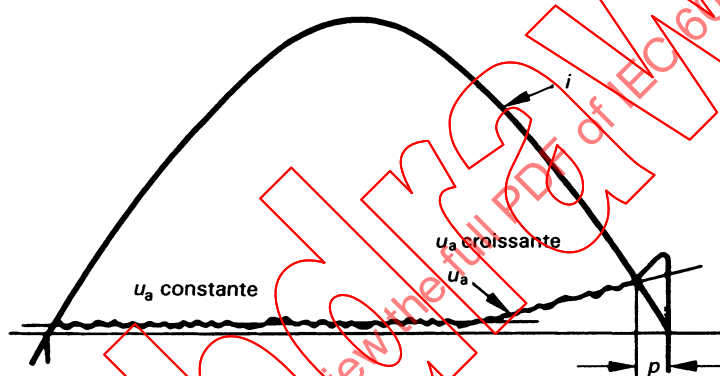


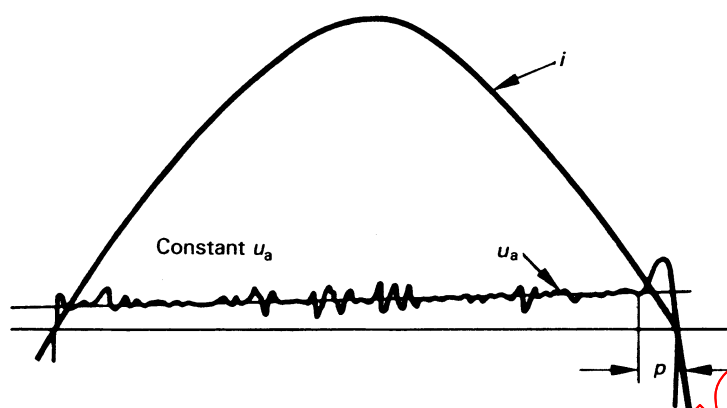
Figure BB.5b

$i$  = courant

$u_a$  = tension d'arc

$p$  = période du changement significatif de la tension d'arc

**Figure BB.5 – Exemples de détermination de la période de changement significatif de la tension d'arc à partir d'oscillogrammes**



IEC 367/2000

Figure BB.5a



IEC 367/2000

Figure BB.5b

$i$  = current  
 $u_a$  = arc-voltage

$p$  = interval of significant change of arc-voltage

**Figure BB.5 – Examples of the determination of the interval of significant change of arc-voltage from the oscillograms**

## **Annexe CC** (informative)

### **Méthodes d'injection de tension**

Dans un circuit d'essai synthétique utilisant l'injection de tension, le circuit de courant fournit la totalité du courant de court-circuit au disjoncteur en essai et aussi, après le zéro de courant, la première partie de la tension transitoire de rétablissement.

Les valeurs correctes du facteur de puissance, du courant et de la première partie de la TTR peuvent être obtenues par le choix judicieux de la tension et de la fréquence propre du circuit de courant à fréquence industrielle.

Le circuit de tension est commuté à un temps voisin de celui de la première crête de la tension transitoire de rétablissement du circuit de courant au moyen d'un circuit de commande dépendant de la tension et de manière telle que la tension transitoire de rétablissement spécifiée soit poursuivie sans qu'il y ait de retard entre les contraintes de courant et les contraintes de tension.

#### **CC.1 Circuit d'injection de tension ou le circuit de tension est en parallèle avec le disjoncteur auxiliaire (circuit série)**

La figure CC.1 montre que le schéma simplifié du circuit d'injection de tension dans lequel le circuit de tension est connecté en parallèle avec le disjoncteur auxiliaire. Le circuit de courant fournit la contrainte totale du courant de court-circuit. Un condensateur de valeur appropriée est connecté en parallèle avec le disjoncteur auxiliaire. Après le zéro du courant de court-circuit à fréquence industrielle, ce condensateur transmet la tension de rétablissement transitoire totale du circuit de courant au disjoncteur en essai, transmettant l'énergie nécessaire au courant post-arc.

A un temps voisin de celui où la tension transitoire atteint sa première crête, le circuit de tension est commuté et, à partir de ce moment, les tensions transitoires de rétablissement des deux circuits s'ajoutent pour constituer la contrainte de tension transitoire de rétablissement entre les bornes du disjoncteur en essai.

La figure CC.2 présente le courant dans le disjoncteur en essai et les formes d'onde de tension aux bornes du disjoncteur auxiliaire et du disjoncteur en essai. Le disjoncteur auxiliaire est seulement soumis aux contraintes de tension du circuit de tension. Les deux composantes de la tension entre les bornes du disjoncteur en essai sont superposées pour produire la tension transitoire de rétablissement dont la forme d'onde peut être réglée en ajustant  $C_h$  et  $C_1$  avec éventuellement d'autres composantes additionnelles non indiquées dans la figure CC.1 afin de satisfaire aux prescriptions de la CEI 60056 (voir 4.1.3).

#### **CC.2 Circuit d'injection de tension avec circuit de tension en parallèle avec le disjoncteur en essai**

Ce circuit d'injection de tension est semblable à celui décrit ci-dessus, sauf que le circuit de tension est en parallèle avec le disjoncteur en essai au lieu de l'être avec le disjoncteur auxiliaire. Ce circuit n'est pas d'usage courant.

## **Annex CC** (informative)

### **Voltage injection methods**

In a synthetic test circuit using voltage injection, the 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 correct values of the power factor, current and first part of the TRV can be obtained.

About the time of the first peak of the transient recovery voltage of the 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.

#### **CC.1 Voltage injection circuit with the voltage circuit in parallel with the auxiliary circuit-breaker (series circuit)**

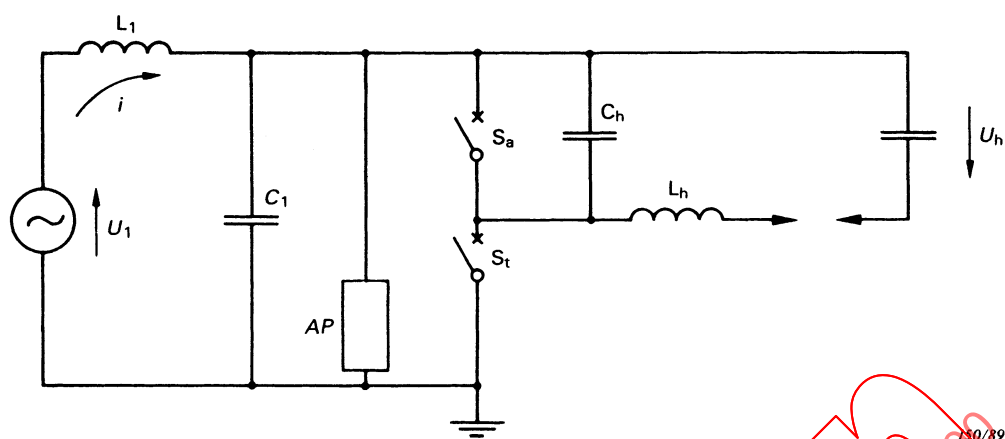
Figure CC.1 shows the simplified circuit diagram of a voltage injection circuit with the voltage circuit connected in parallel with the auxiliary circuit-breaker. The current circuit supplies the entire short-circuit current stress. A capacitor of suitable value is connected in parallel with the auxiliary circuit-breaker. After the current-zero of the power-frequency short-circuit current, this capacitor transmits the entire transient recovery voltage of the 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 CC.2 shows the current in the test circuit-breaker and the waveshape of the voltage across the auxiliary circuit-breaker and test circuit-breaker. The auxiliary circuit-breaker is stressed only by the voltage of the voltage circuit. Both components of the voltage across the test circuit-breaker are superimposed to produce the transient recovery voltage, the waveshape of which can be adjusted by varying  $C_h$  and  $C_1$  in conjunction with additional components – not shown in figure CC.1 – to obtain compliance with the requirements of IEC 60056 (see 4.1.3).

#### **CC.2 Voltage injection circuit with the voltage circuit in parallel with the test circuit-breaker**

This voltage injection circuit is similar to the one described above except that the voltage circuit is in parallel with the test circuit-breaker instead of the auxiliary circuit-breaker. It is not in common usage.



$U_1$  = tension du circuit de courant

$L_1$  = bobine d'inductance du circuit de courant

$C_1$  = condensateur du circuit de courant qui réagit avec  $L_1$  la première partie de la TTR

AP = circuit de réallumage

$S_a$  = disjoncteur auxiliaire

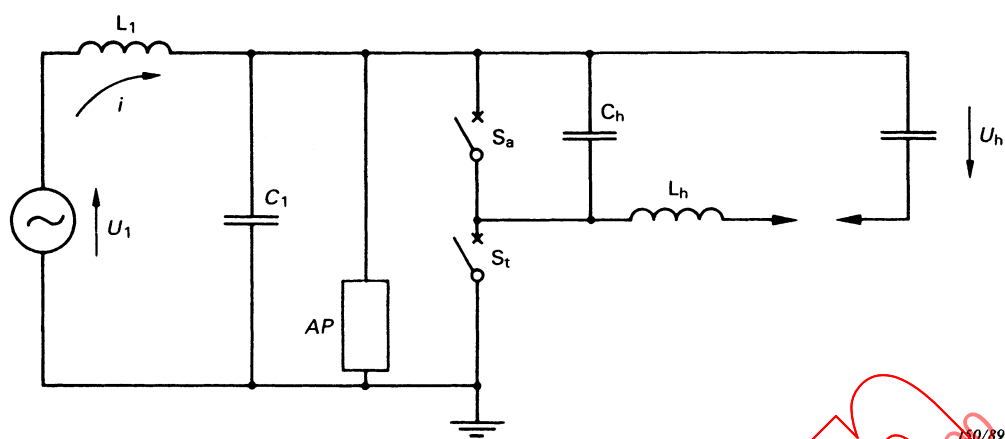
$S_t$  = disjoncteur en essai

$C_h$  = condensateur du circuit de tension qui régit avec  $L_h$  la plus grande partie de la TTR

$L_h$  = inductance du circuit de tension

$U_h$  = tension de charge du circuit de tension

**Figure CC.1 – Schéma caractéristique de l'injection de tension avec le circuit de tension en parallèle avec le disjoncteur auxiliaire (schéma simplifié)**



$U_1$  = voltage of current circuit  
 $L_1$  = inductance of current circuit

$C_1$  = capacitance of current circuit which together with  $L_1$  controls the first part of the TRV

AP = arc prolonging circuit

$S_a$  = auxiliary circuit-breaker

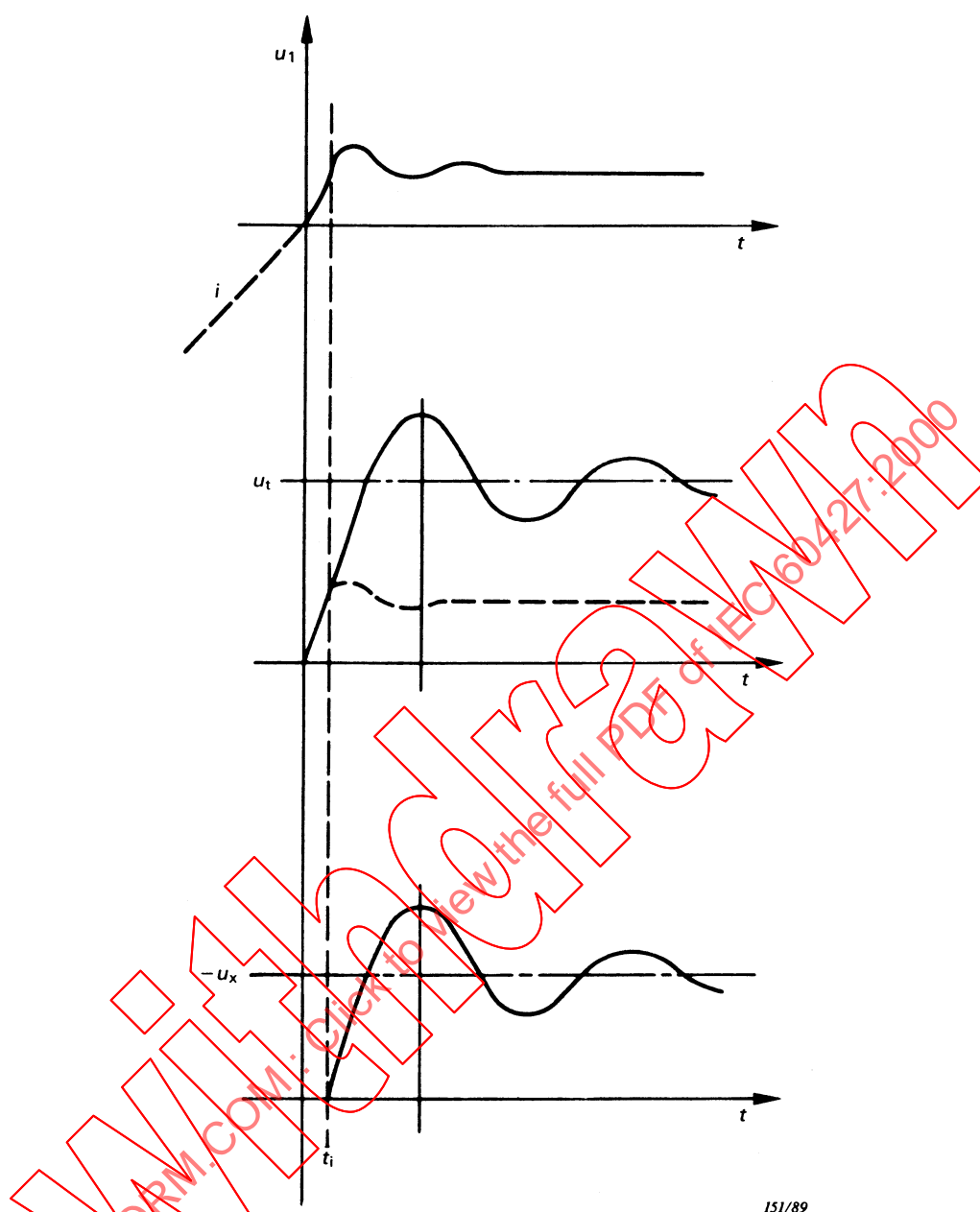
$S_t$  = test circuit-breaker

$C_h$  = capacitance of voltage circuit which together with  $L_h$  controls the major part of the TRV

$L_h$  = inductance of voltage circuit

$U_h$  = charging voltage of voltage circuit

**Figure CC.1 – Typical voltage injection circuit diagram with voltage circuit in parallel with the auxiliary circuit-breaker (simplified diagram)**



151/89

$i$  = courant à fréquence industrielle dans les disjoncteurs en essai et auxiliaire

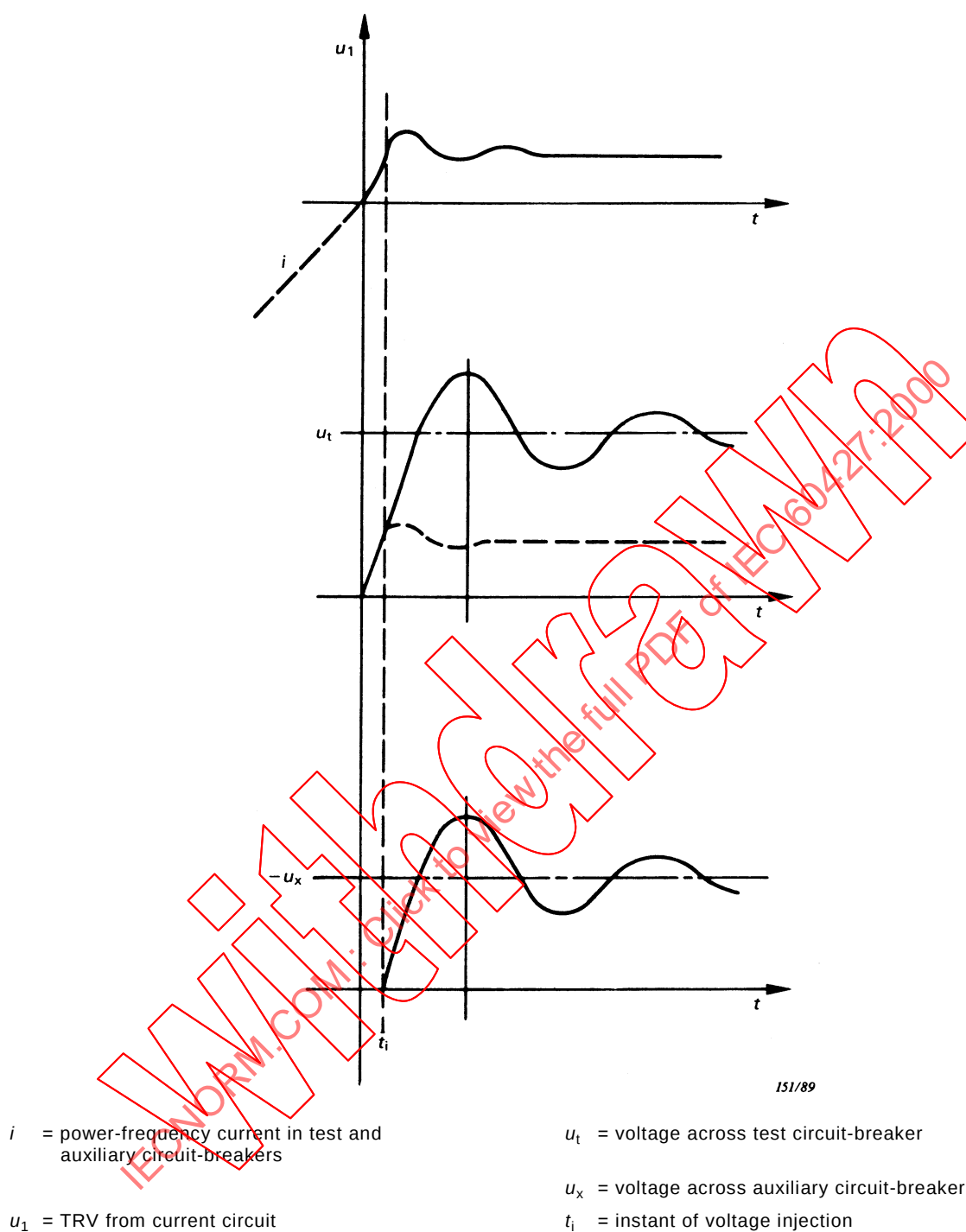
$u_1$  = TTR fournie par le circuit de courant

$u_t$  = tension aux bornes du disjoncteur en essai

$u_x$  = tension aux bornes du disjoncteur auxiliaire

$t_i$  = instant de l'injection de tension

**Figure CC.2 – Formes d'onde (TTR) obtenues dans un circuit d'injection de tension avec la source de tension en parallèle avec le disjoncteur auxiliaire**



**Figure CC.2 – TRV waveshapes in a voltage injection circuit with the voltage circuit in parallel with the auxiliary circuit-breaker**

## Annexe DD (informative)

### Circuit de Skeats (ou par transformateur)

#### DD.1 Principe de la méthode

Dans ce circuit d'essai, le courant est fourni par un circuit de courant au disjoncteur auxiliaire et au disjoncteur en essai disposés en série. La haute tension est appliquée au disjoncteur en essai à travers une résistance, à partir d'un transformateur (ou un autotransformateur) dont le primaire est connecté au circuit de courant aux bornes du disjoncteur en essai et du disjoncteur auxiliaire. La figure DD.1 montre la disposition générale du circuit.

Pendant la période de fort courant, les tensions d'arc du disjoncteur en essai et du disjoncteur auxiliaire imposent dans le circuit haute tension un courant  $i_p$  qui s'ajoute au courant aux bornes du disjoncteur en essai,  $i_2 = i_1 + i_p$ . Ainsi, dans le disjoncteur auxiliaire, le courant atteint zéro et s'interrompt avant celui du disjoncteur en essai. Si l'on suppose que les tensions d'arc sont quasi constantes, le courant du disjoncteur en essai passe par zéro au temps  $\Delta t$  après l'interruption du disjoncteur auxiliaire, approximativement donné par la formule:

$$\Delta t = \frac{n(u_{al} + u_{at}) - u_{at}}{n \cdot \hat{u}_1} \cdot \frac{L_2}{R}$$

où

$n$  = rapport du transformateur

$u_{al}, u_{at}$  = tensions d'arc dans  $S_1$  et  $S_2$  respectivement

$\hat{u}_1$  = tension du circuit de courant

$L_2 = n^2 \cdot L_1 + L_T$  (inductance effective dans le circuit haute tension)

$L_T$  = inductance de fuite de  $T$ .

Pendant la période  $\Delta t$ , la vitesse de variation du courant  $di_2/dt$  aux bornes du disjoncteur en essai atteint une valeur voisine de:

$$\frac{di_2}{dt} = - \frac{n \cdot \hat{u}_1}{L_2} = - \frac{n \hat{u}_1}{n^2 L_1 + L_T}$$

c'est-à-dire que  $di_2/dt$  aura une valeur plus faible que la valeur présumée qui serait obtenue sans influence. Cette valeur est réduite d'un facteur équivalent au rapport  $n$  du transformateur.

Si l'on choisit une résistance  $R$  de valeur suffisante, l'intervalle  $\Delta t$  peut être court. D'autre part, une valeur élevée augmente l'amortissement de la TTR. Pour les disjoncteurs avec courant post-arc des valeurs plus restreintes peuvent être nécessaires. On utilise généralement pour  $R$  des valeurs de l'ordre de quelques kilohms, ce qui donne  $\Delta t \leq 10 \mu s$ .

Le circuit d'essai n'est donc pas valable pour les essais de défaillance en mode thermique d'un disjoncteur, pour les raisons suivantes:

- l'impédance côté source ne correspond pas aux conditions en réseau (ou en circuit d'essais directs) pendant la période d'interaction;
- le  $di/dt$  s'écarte de la valeur présumée pendant un intervalle de temps (court) immédiatement avant le zéro de courant.

## Annex DD (informative)

### Duplicate circuit (transformer or Skeats circuit)

#### DD.1 Principle of the method

In the duplicate test circuit the current is supplied from a current circuit to the series combination of the auxiliary and the test circuit-breaker. The high voltage is applied to the test circuit-breaker via a resistance from a transformer (or auto-transformer) the primary of which is connected to the current circuit across the auxiliary and test circuit-breakers. Figure DD.1 shows the principal lay-out of the circuit.

During the high current interval the arc-voltages of the test and auxiliary circuit-breakers induce a current,  $i_R$  in the high-voltage circuit which adds to the current through the test circuit-breaker,  $i_2 = i_t + i_R$ . The current in the auxiliary breaker will thus reach zero and interrupt before the test circuit-breaker. If the arc-voltages are assumed nearly constant the test circuit-breaker current will go through zero a time  $\Delta t$  after the interruption of the auxiliary breaker approximately given by:

$$\Delta t = \frac{n(u_{at} + u_{at}) - u_{at}}{n \hat{u}_1} \frac{L_2}{R}$$

where:

$n$  = transformer ratio

$u_{at}, u_{at}$  = arc-voltages in  $S_1$  and  $S_t$  respectively

$\hat{u}_1$  = voltage of current circuit

$L_2$  =  $n^2 \cdot L_1 + L_T$  (effective inductance in the high-voltage circuit)

$L_T$  = leakage inductance of  $T$

During the interval  $\Delta t$ , the rate of change of the current through the test circuit-breaker  $di_2/dt$  will approximately attain the value:

$$\frac{di_2}{dt} = - \frac{n \cdot \hat{u}_1}{L_2} = - \frac{n \hat{u}_1}{n^2 L_1 + L_T}$$

i.e.  $di_2/dt$  will be lower than the prospective uninfluenced value. This value is reduced by a factor of the same magnitude as the transformer ratio  $n$ .

By choosing the resistance,  $R$ , sufficiently large, the time interval  $\Delta t$  could be kept small. On the other hand a high value will increase the damping of the TRV. For circuit-breakers with post-arc current the value may be further restricted. Values of  $R$  in the range some kilohms are normally used giving  $\Delta t \leq 10 \mu s$ .

The test circuit is thus not valid for tests where attention is paid to the thermal failure mode of a circuit-breaker, because:

- the source-side impedance does not correspond to network (or direct test circuit) conditions during the interaction interval;
- the  $di/dt$  deviates from the prospective value during a (short) time interval just before current-zero.

Le circuit d'essai peut être utilisé pour les essais de tenue diélectrique de rétablissement d'un disjoncteur. Il peut aussi être utilisé pour les essais de fermeture et peut être adapté pour fonctionner avec plusieurs applications à pleine tension.

## DD.2 Disposition pratique du circuit

On peut voir une disposition pratique du circuit à la figure DD.2. Il peut être utilisé pour l'application de la pleine tension de rétablissement sur trois zéros de courant consécutifs dans une manoeuvre d'ouverture en ouvrant les disjoncteurs auxiliaires  $S_1$ ,  $S_2$  et  $S_3$  l'un après l'autre. Les éclateurs  $G_1$  et  $G_2$  sont déclenchés pour rétablir le courant au cas où le disjoncteur en essai ne coupe pas aux premier et second zéros de courant respectivement.

Il permet aussi d'appliquer les contraintes de pleine tension à l'enclenchement et à l'ouverture d'un cycle CO. Le disjoncteur en essai  $S_t$  est fermé sous haute tension ( $S_1$  est ouvert) et, au moment où il pré-amorce, un des éclateurs, par exemple  $G_2$  est déclenché pour fermer le circuit de courant ( $S_3$  est fermé).  $S_1$  est fermé avant l'ouverture du disjoncteur en essai et sert de disjoncteur auxiliaire au premier zéro de courant. On peut, si nécessaire, tester un deuxième zéro de courant au moyen de  $G_1$  et  $S_2$ .

Les deux manoeuvres d'ouverture d'une opération de réenclenchement automatique peuvent être entièrement essayées de cette manière.

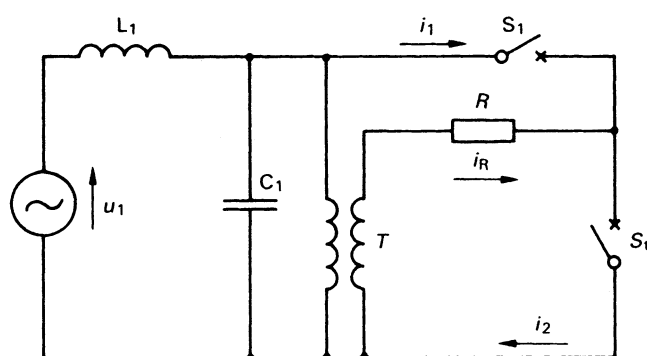
The test circuit could be used when testing the dielectric recovery of a circuit-breaker. It could further be used for closing tests and could be extended to work with several full voltage applications.

## DD.2 Practical arrangement of the circuit

A practical circuit arrangement is shown in figure DD.2. It could be used to apply full recovery voltage in three consecutive current-zeros in an opening operation by opening the auxiliary circuit-breakers  $S_1$ ,  $S_2$  and  $S_3$  in turn. The spark gaps  $G_1$  and  $G_2$  are triggered to restore the current if the test circuit-breaker fails to interrupt in the first and second current-zero respectively.

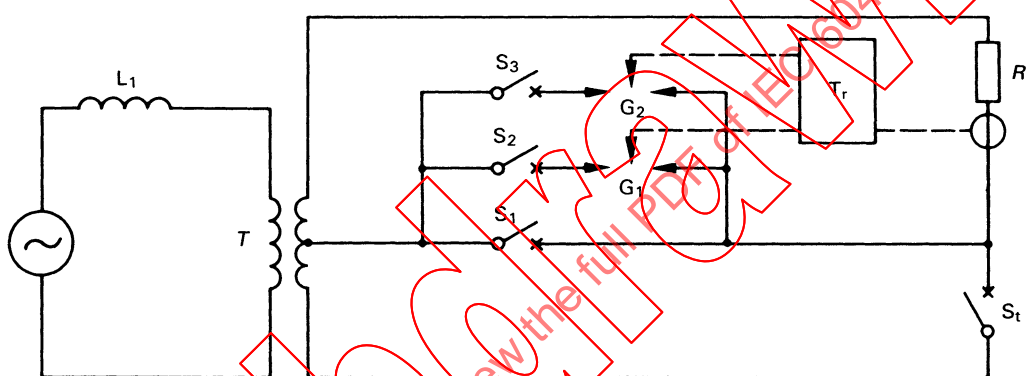
It can also apply full voltage stresses at both closing and opening in a CO operation. The test circuit-breaker,  $S_t$ , closes against full voltage ( $S_1$  is open) and, when it pre-strikes, one of the spark gaps, e.g.  $G_2$ , is triggered to make the current circuit ( $S_3$  is closed).  $S_1$  is closed before the opening of the test circuit-breaker and used as auxiliary circuit-breaker at the first current-zero. If necessary a second current-zero could be tested by means of  $G_1$  and  $S_2$ .

In the same way the two opening operations in an auto-reclosing operation could be fully tested.



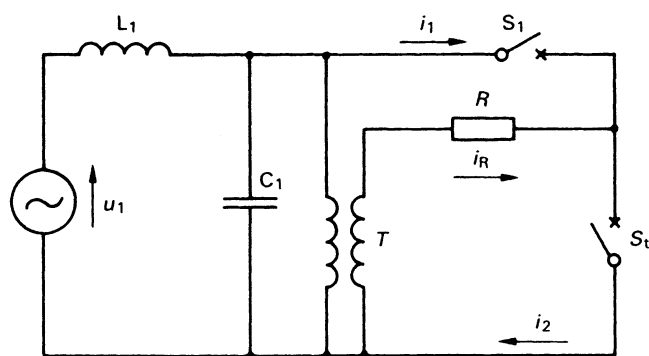
152/89

Figure DD.1 – Circuit de Skeats ou par transformateur



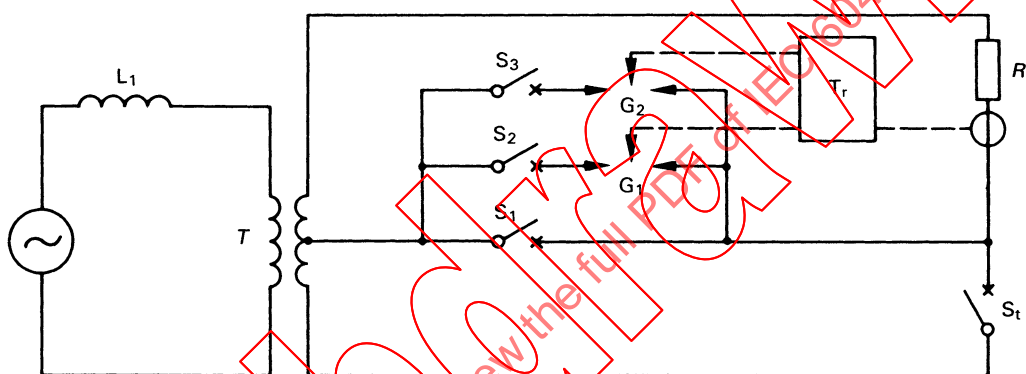
153/89

Figure DD.2 – Circuit de Skeats ou par transformateur avec déclenchement



152/89

Figure DD.1 – Transformer or Skeats circuit



153/89

Figure DD.2 – Triggered transformer or Skeats circuit

## **Annexe EE** (normative)

### **Indications à donner et résultat à enregistrer lors d'essais synthétiques**

En plus des prescriptions de l'annexe CC de la CEI 60056, les informations suivantes doivent être fournies dans les rapports d'essais synthétiques:

#### **EE.1 Disjoncteur auxiliaire**

- a) Identification.
- b) Description, incluant le nombre d'éléments par pôle, le fluide utilisé pour l'extinction et, éventuellement, les condensateurs de répartition.

#### **EE.2 Conditions d'essai**

- a) Paramètres du circuit de tension.
- b) Ajustement du temps d'arc recherché pour le disjoncteur en essai, y compris l'utilisation de circuit(s) de réallumage.

#### **EE.3 Enregistrement des quantités**

Les enregistrements de la déviation et de l'échelle de temps doivent être tels que les informations recherchées puissent être évaluées avec suffisamment de précision.

##### **EE.3.1 Tensions**

- a) Tension du circuit de courant.
- b) Tension aux bornes du disjoncteur en essai.
- c) Tension aux bornes du disjoncteur auxiliaire.
- d) Tension d'arc du disjoncteur en essai.

##### **EE.3.2 Courants**

- a) Courant dans le disjoncteur en essai.
- b) Courant du circuit de tension.

NOTE 1 Pour certaines grandeurs, il sera peut être nécessaire d'effectuer plusieurs enregistrements avec des déviations et/ou des échelles de temps différentes. Ce sera normalement le cas pour les informations décrites en EE.3.1b) et EE.3.2a).

NOTE 2 D'autres informations peuvent être ajoutées pour décrire des données de type ou d'essais.

## **Annex EE** (normative)

### **Information to be given and results to be recorded for synthetic tests**

In addition to the requirements as specified in annex CC of IEC 60056, the following information shall be given in reports on synthetic tests:

#### **EE.1 Auxiliary circuit-breaker**

- a) Identification.
- b) Description, including the number of units per pole, extinguishing medium and grading capacitors, if any.

#### **EE.2 Test conditions**

- a) Circuit parameters of the voltage circuit.
- b) Setting of the intended arcing time of the test circuit-breaker including application of reignition circuit(s).

#### **EE.3 Quantities to be recorded**

The resolution of the records with respect to the deflection and the time scale shall be such, that the information to be obtained can be evaluated with sufficient accuracy.

##### **EE.3.1 Voltages**

- a) Voltage of the current circuit.
- b) Voltage across the test circuit-breaker.
- c) Voltage across the auxiliary circuit-breaker.
- d) Arc-voltage of the test circuit-breaker.

##### **EE.3.2 Currents**

- a) Current through the test circuit-breaker.
- b) Current from the voltage circuit.

NOTE 1 For some quantities it may be necessary to have several records with different deflections and/or time scales. Normally it will be the case for the measurements EE.3.1b) and EE.3.2a).

NOTE 2 Other information and records may be added to obtain test or design data.

## **Annexe FF** (informative)

### **Procédures d'essais particulières pour les disjoncteurs équipés de résistances de coupure parallèles**

#### **FF.1 Introduction**

Quand on utilise des méthodes d'essais synthétiques pour des disjoncteurs équipés de résistances de coupure parallèles, il convient d'envisager chaque circuit en fonction de ses qualités, le principe essentiel étant que le circuit d'essais synthétiques devra avoir une tension transitoire de rétablissement présumée conforme aux prescriptions de la CEI 60056, et d'appliquer sur le disjoncteur une tension de rétablissement comme il est spécifié en 4.1.3 de la présente norme.

Pour ce type de disjoncteur où des résistances parallèles sont employées pour modifier la forme de la tension transitoire de rétablissement, un circuit d'essais synthétiques devra être tel que la forme de la tension transitoire de rétablissement soit, dans la mesure du possible, égale à la tension transitoire de rétablissement spécifiée une fois modifiée par la résistance du disjoncteur. Si la valeur ohmique de la résistance shunt est très basse, la valeur crête de la TTR réelle dans un essai synthétique peut ne pas atteindre cette valeur à cause de la limitation de l'énergie disponible dans la source de tension. Dans ce cas, on doit choisir une méthode d'essais modifiée dans laquelle la réduction relative de la TTR réelle est maintenue à un minimum négligeable (moins de 5 %). Cela n'exclut cependant pas la possibilité de ne pas satisfaire aux prescriptions du 4.1.3 concernant la tension de rétablissement.

En prenant certaines précautions, des essais valables peuvent être réalisés, par exemple en suivant une des méthodes suivantes.

- l'ajustement des paramètres du circuit de tension pour fournir l'énergie supplémentaire nécessaire absorbée par la résistance;
- la commutation d'une source de tension périodique supplémentaire suffisante pour maintenir la tension aux bornes de la résistance;
- la déconnexion de la résistance shunt du disjoncteur en essai et la connexion d'une résistance à d'autres points appropriés du circuit d'essai (par exemple aux bornes de l'inductance du circuit de tension) pour donner une forme d'onde de tension transitoire de rétablissement équivalente aux bornes du disjoncteur en essai. Cette méthode exige que l'on s'assure que l'influence de la résistance pendant la période de zéro de courant est suffisamment proche de celle qui se produit dans un essai où la résistance est connectée aux bornes du disjoncteur.

De telles méthodes doivent être choisies et acceptées après mûre réflexion par la station d'essai, le constructeur et l'utilisateur.

Si la méthode d'essais appliquée ne soumet pas la résistance à la pleine contrainte thermique, ou l'interrupteur du courant de résistance à la pleine contrainte de coupure, alors des essais supplémentaires devront être réalisés (voir FF.3.3 et FF.3.4).

## **Annex FF** (informative)

### **Special procedures for testing circuit-breakers having parallel breaking resistors**

#### **FF.1 Introduction**

When using synthetic test methods on circuit-breakers fitted with parallel breaking resistors, 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 IEC 60056 and a recovery voltage as specified in 4.1.3 of this standard should be applied to the circuit-breaker.

For those circuit-breakers where parallel resistors are employed to modify the shape of the transient recovery voltage, a synthetic test circuit should be such that the shape of the transient recovery voltage will be, as far as possible, the same as the specified transient recovery voltage as modified by the circuit-breaker resistor. 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 this value 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 (less than 5 %). However, it may then still not be possible to meet the recovery voltage requirements of 4.1.3.

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 circuit 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 waveform across the terminals of the test circuit-breaker. When using this method, care shall be taken to ensure that the influence of the resistor 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.

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 (see FF.3.3 and FF.3.4).

## FF.2 Conditions

Les prescriptions concernant le circuit principal d'essais synthétiques doivent être satisfaites (voir 4.1). Des prescriptions supplémentaires pendant la période de contrainte diélectrique doivent être satisfaites lors des essais concernant les disjoncteurs équipés de résistances à faible valeur ohmique et dont l'impédance est si faible qu'elle exclut l'utilisation d'une source de tension provenant de condensateurs uniquement.

### FF.2.1 Période de tension transitoire de rétablissement

La tension transitoire de rétablissement correcte devra apparaître aux bornes du disjoncteur, l'influence de la résistance shunt incorporée dans le disjoncteur et la tension d'arc étant prises en compte. Il convient qu'il n'y ait pas de discontinuité dans la forme d'onde de tension transitoire de rétablissement.

NOTE La tension transitoire de rétablissement, influencée seulement par la résistance shunt, peut être calculée en supposant un disjoncteur idéal et en évaluant l'influence de la résistance shunt incorporée dans le disjoncteur sur la tension transitoire de rétablissement spécifiée.

### FF.2.2 Période de tension de rétablissement à fréquence industrielle

Une tension de rétablissement à fréquence industrielle, égale à la valeur spécifiée dans la CEI 60056 doit être appliquée.

NOTE Il est permis d'utiliser une tension de rétablissement à fréquence industrielle d'amplitude correcte ayant un déphasage différent de celui qui peut être obtenu en réseau. Le sens de ce déphasage devra être tel que la tension de rétablissement dans l'essai synthétique soit retardée par rapport à celle obtenue en réseau. Il en résulte une extension de la première alternance de la tension de rétablissement, ce qui est acceptable à condition que le déphasage ne dépasse pas 20° environ.

## FF.3 Procédure d'essai en plusieurs étapes

Une autre approche consiste à effectuer une série de quatre procédures d'essais séparées afin de démontrer que le comportement du disjoncteur en essai est globalement satisfaisant. Pour cela, il doit être possible de déconnecter la ou les résistances dans le disjoncteur.

NOTE Pour que ces procédures d'essais séparées soient recevables, il est essentiel que le fonctionnement et le comportement de l'interrupteur de la résistance ne soient pas affectés par le fonctionnement de l'interrupteur principal.

### FF.3.1 Essais de réallumages thermiques sur l'interrupteur principal

Le but de ces essais est de démontrer que les réallumages ne se produisent pas dans l'interrupteur principal lors de la période d'interaction.

Un essai synthétique est effectué, dans lequel la résistance est montée en position normale sur le disjoncteur. Cet essai est soumis aux exigences normales pendant une période dont la durée est grande par rapport à celle de la période d'interaction.

Lors de l'utilisation de la méthode par injection de courant avec circuit de tension en parallèle sur le disjoncteur en essai, l'énergie de la source de tension est en général suffisante si la constante de temps de décharge de la source de tension branchée en parallèle avec la résistance de coupure du disjoncteur est au moins cinq fois plus grande que la durée de l'intervalle d'interaction.

## FF.2 Conditions

The requirements which relate to the basic synthetic test circuit, see 4.1, shall be met. Additional requirements during the high-voltage interval which must be met when the circuit-breaker resistance is so low as to preclude the use of a voltage source derived only from capacitors are given below.

### FF.2.1 Transient recovery voltage interval

The correct transient recovery voltage should appear across the circuit-breaker taking into account the influence of the shunt resistor incorporated in the circuit-breaker and the arc-voltage. There should be no discontinuity in the transient recovery voltage waveform.

NOTE The transient recovery voltage influenced only by the shunt resistor can be calculated by assuming an ideal circuit-breaker and evaluating the influence of the shunt resistor incorporated in the circuit-breaker on the specified transient recovery voltage.

### FF.2.2 Power-frequency recovery voltage interval

A power-frequency recovery voltage shall be provided which is the same as the value specified in IEC 60056.

NOTE It is acceptable to use a power-frequency recovery voltage of the correct amplitude which has a phase shift different from that which would be obtained in a network. The direction of this phase shift should be such that the recovery voltage in the synthetic test lags behind that of the network. The result is to extend the first loop of the recovery voltage, which is acceptable provided that the phase shift does not exceed about 20°.

## FF.3 Multiple step test procedure

An alternative approach is to use a set of four separate test procedures to establish that the overall testing of the test circuit-breaker is satisfactory. For this to be achieved it must be possible to disconnect the resistor(s) in the circuit-breaker.

NOTE It is essential that the operation and performance of the resistor interrupter is not affected by the operation of the main interrupter for these separate test procedures to be allowable.

### FF.3.1 Thermal reignition mode tests on the main interrupter

The object of these tests is to establish that reignitions do not occur in the main interrupter during the interaction interval.

A synthetic test is made with the resistor mounted in its normal position in the circuit-breaker. This test is subject to the normal requirements during an interval large with respect to the interaction interval.

When the current injection method with the voltage circuit in parallel with the test circuit-breaker is used, energy from the voltage source is usually sufficient if the discharge time constant of the voltage source with parallel breaking resistor of the circuit-breaker is at least five times higher than the duration of the interaction interval.

### **FF.3.2 Essais de réamorçages diélectriques sur l'interrupteur principal**

Dans un premier temps, la résistance du disjoncteur est déconnectée. Puis, un essai synthétique est réalisé avec la valeur correcte de la tension transitoire de rétablissement présumée une fois modifiée par la résistance seulement. Cet essai permet de vérifier le comportement pendant la période diélectrique qui ne l'a pas été lors de l'essai de réallumages thermiques décrit en FF.3.1.

NOTE 1 Pour plus de facilité, il est permis, si on le souhaite, de connecter la résistance au circuit externe immédiatement avant la période d'interaction. Cette mesure peut modifier les conditions déterminant les critères de réallumages thermiques mais ces conditions ont déjà été remplies dans l'essai décrit au FF.3.1.

NOTE 2 Des problèmes peuvent être rencontrés lors de la réalisation de l'essai diélectrique décrit au FF.3.2 sur un certain nombre d'interrupteurs montés en série. La déconnexion des résistances shunt implique qu'il n'y a plus distribution de tension en dehors de celle qui est déterminée par les capacités. Ces dernières risquent de ne pas pouvoir assurer une répartition suffisamment uniforme et on risque de soumettre un interrupteur à une trop grande contrainte. Un moyen de résoudre ce problème pour les disjoncteurs de type ouvert est de fixer à l'extérieur une chaîne de résistances de valeur plus élevée pour obtenir une distribution presque uniforme. Cela doit bien sûr être pris en compte pour obtenir la forme de l'onde de tension transitoire de rétablissement correcte.

### **FF.3.3 Essais sur la résistance**

Des essais à fréquence industrielle sont nécessaires pour démontrer que la résistance peut satisfaire aux conditions thermiques et de tension imposées par la séquence de manoeuvres du disjoncteur.

### **FF.3.4 Essais sur le ou les interrupteurs de résistance**

Des essais sont effectués pour démontrer que le ou les interrupteurs de résistance ont le comportement exigé.

### **FF.4 Autres remarques**

Il convient de noter que, dans un circuit utilisant la tension de rétablissement à fréquence industrielle, le moment de la fermeture du circuit de tension est critique et que la validité de la procédure d'essais exige que ce moment soit maintenu dans des tolérances bien définies. Ne pas respecter cette précaution peut entraîner des erreurs importantes dans la forme d'onde de la tension transitoire de rétablissement présumée.

Si la procédure d'essai en plusieurs étapes est adoptée, il convient de tenir compte des problèmes qui peuvent apparaître pendant les essais de réallumages diélectriques décrits au FF.3.2. L'utilisation d'une résistance externe au disjoncteur peut introduire des inductances et capacités parasites dans le circuit contenant l'interrupteur principal. Cela peut conduire à la défaillance en mode thermique pendant l'essai diélectrique. De telles défaillances ne constitueraient pas une raison suffisante de non-acceptation du disjoncteur mais nécessiteraient d'autres essais diélectriques après modification du circuit.

### **FF.3.2 Dielectric reignition mode tests on the main interrupter**

The resistor is first disconnected in the circuit-breaker. A synthetic test is then made with the correct prospective transient recovery voltage, as modified by the effect of the resistor only. This test covers the dielectric interval not already covered in the thermal reignition test described in FF.3.1.

NOTE 1 One easement is allowed, namely that the substituting resistor in the external circuit can be switched into the circuit just prior to the beginning of the interaction interval if so desired. This may change the conditions determining the thermal reignition criteria but these have already been met in the test of FF.3.1.

NOTE 2 Problems can arise when carrying out the dielectric test of FF.3.2 on a number of series interrupters. The disconnection of the shunt resistors means that there is no longer any voltage grading apart from that provided by capacitance. This in itself may not provide a sufficiently uniform distribution and there is a danger of overstressing one interrupter. One way of overcoming this problem on open-type circuit-breakers is to attach an external string of higher value resistors to achieve near uniform grading. The effect of these shall of course be taken into account in providing the correct transient recovery voltage waveform.

### **FF.3.3 Tests on resistor**

Power frequency tests are required to demonstrate that the resistor can meet the thermal and voltage conditions imposed by the duty cycle of the circuit-breaker.

### **FF.3.4 Tests on resistor interrupter(s)**

Tests shall be made to demonstrate that the resistor interrupter(s) has (have) the required performance.

## **FF.4 Additional remarks**

It should be noted that with a circuit using power-frequency recovery voltage the timing of the make switch in the voltage circuit is critical and that correct operation of the testing procedure depends on this timing being maintained within close tolerances. Failure to observe this precaution can result in significant errors in the prospective transient recovery voltage waveform.

If the alternative multiple step procedure is adopted it should be noted that problems can arise during the dielectric reignition mode tests of FF.3.2. The use of a substitute resistor external to the circuit-breaker can introduce parasitic inductance and capacitance into the circuit containing the main interrupter. This could lead to a thermal mode failure during the dielectric mode test. Such failures would not constitute a reason for rejection of the circuit-breaker but would require further dielectric mode tests following circuit modification.

## Annexe GG (normative)

### Méthodes synthétiques pour l'établissement et la coupure de courant capacitif <sup>1)</sup>

#### GG.1 Introduction

Les essais synthétiques d'établissement et de coupure de courant capacitif sont généralement effectués en monophasé.

Pendant les manoeuvres de fermeture de courant capacitif, le disjoncteur est soumis à une contrainte faible (à l'exception de la manoeuvre des batteries de condensateurs dos-à-dos) et ces manoeuvres peuvent être effectuées séparément.

Les phénomènes de réallumages et de réamorçages provoquent des interactions entre la source et la charge capacitive, qui sont, pour le moment, difficiles à simuler valablement par des circuits d'essais synthétiques. En conséquence, la méthode synthétique ne peut valider qu'une manoeuvre sans réamorçage. Après réallumage ou réamorçage, les conditions du circuit ne seraient pas significatives et des essais directs seraient nécessaires.

Le phénomène de pré-amorçage permet d'interrompre ou non le courant haute fréquence pendant la manoeuvre de fermeture. Une interruption de ce type provoque le réallumage et indique que le disjoncteur peut requérir des essais directs.

Pour la manoeuvre des lignes longues à vide, des phénomènes d'ondes progressives peuvent apparaître, que l'on peut simuler par des circuits synthétiques en utilisant l'enveloppe. Cependant, une simulation plus fidèle est possible en introduisant des circuits supplémentaires actuellement à l'étude. Les disjoncteurs équipés de résistances d'ouverture peuvent être essayés par des circuits d'essais synthétiques en deux parties dans lesquelles les paramètres de circuit sont ajustés pour obtenir des tensions de rétablissement équivalent à la contrainte d'un circuit d'essais directs.

#### GG.2 Prescriptions concernant les essais synthétiques de coupure

Pour prendre en compte les phénomènes liés à l'interruption des courants capacitifs, les points suivants doivent satisfaire aux spécifications existantes:

- 1) la forme et l'amplitude du courant d'essai à fréquence industrielle, en particulier dans la première alternance avant l'interruption;
- 2) la forme et l'amplitude de la tension d'alimentation à fréquence industrielle;
- 3) la tension côté charge après l'interruption;
- 4) l'amplitude, la fréquence et l'amortissement de la tension transitoire pendant le saut de tension lors des essais effectués en conditions de simulation d'impédance de source élevée;
- 5) la configuration du champ électrique aux bornes du disjoncteur et par rapport à la terre.

<sup>1)</sup> Les figures et équations de cette annexe sont basées sur le rapport: «Spécifications concernant les essais de manoeuvres sur courant capacitif des disjoncteurs sans résistance shunt à l'aide de circuits d'essais synthétiques» paru dans *Electra* no 87 de mars 1983. Elles ont été reproduites, avec de légères modifications, avec l'autorisation de la CIGRÉ.

## **Annex GG** (normative)

### **Synthetic methods for capacitive-current switching <sup>1)</sup>**

#### **GG.1 Introduction**

Synthetic making and breaking capacitive current tests are generally made single phase.

As the stress of the breaker during capacitive current making operations is small – with the exception of back-to-back capacitor bank switching – they may be performed separately.

The phenomena of reigniting and restriking cause interactions between the source and the capacitive load which are, at present, difficult to simulate reliably by synthetic testing circuits. Therefore, the synthetic method may only validate a restrike-free operation. After a reignition or restrike the circuit conditions would not be meaningful and direct testing would be required.

The phenomenon of pre-striking allows for the possibility of interruption of high frequency current during the closing operation. Such an interruption will be followed by reignition and would indicate that the circuit-breaker may require direct testing.

When switching long unloaded lines, travelling wave phenomena may arise, the simulation of which by synthetic circuits is possible using the envelope. However, a closer simulation is possible by introducing additional circuits which are under consideration. Circuit-breakers equipped with opening resistors may be tested in two part synthetic test circuits, where the circuit parameters are adjusted to give recovery voltages equivalent to the stress of a direct test circuit.

#### **GG.2 Requirements concerning synthetic break-tests**

In order to take into account the phenomena relating to interrupting capacitive currents, the following items shall comply with the existing specifications:

- 1) the shape and amplitude of the power-frequency test current, particularly in the final loop before interruption;
- 2) the shape and amplitude of the power-frequency supply voltage;
- 3) the voltage on the load side after interruption;
- 4) the magnitude, frequency and damping of the transient voltage during the voltage jump, when testing under conditions simulating a high source impedance;
- 5) the electrical field configuration across the gap and to earth.

---

<sup>1)</sup> The figures and equations given in this annex are based on the paper: "Requirements for capacitive current switching tests employing synthetic test circuits for circuit-breakers without shunt resistors", published in *Electra* No. 87, March 1983. They are reproduced, with a few amendments, with the kind permission of the CIGRÉ.