NORME INTERNATIONALE

INTERNATIONAL STANDARD

CEI
IEC
60664-4

Deuxième édition
Second edition
2005-09

PUBLICATION FONDAMENTALE DE SÉCURITÉ
BASIC SAFETY PUBLICATION

Coordination de l'isolement des matériels dans les systèmes (réseaux) à basse tension –

Partie 4: Considérations sur les contraintes de tension à haute fréquence

Insulation coordination for equipment within low-voltage systems –

Part 4: Consideration of high-frequency voltage stress

Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 60664-4:2005

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

Numérotation des publications

Depuis le 1er janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000. Ainsi, la CEI 34-1 devient la CEI 60034-1.

Editions 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.

Informations supplémentaires sur les publications de la CEI

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 cette publication, y compris sa validité, sont disponibles dans le Catalogue des publications de la CEI (voir ci-dessous) en plus des nouvelles éditions, amendements et corrigenda. Des informations sur les sujets à l'étude et l'avancement des travaux entrepris par le comité d'études qui a élaboré cette publication, ainsi que la liste des publications parues, sont également disponibles par l'intermédiaire de:

- **Site web de la CEI (www.iec.ch)**
- **Catalogue des publications de la CEI**

  Le catalogue en ligne sur le site web de la CEI (www.iec.ch/searchpub) vous permet de faire des recherches en utilisant de nombreux critères, comprenant des recherches textuelles, par comité d'études ou date de publication. Des informations en ligne sont également disponibles sur les nouvelles publications, les publications remplacées ou retirées, ainsi que sur les corrigenda.
- **IEC Just Published**

  Ce résumé des dernières publications parues (www.iec.ch/online_news/justpub) est aussi disponible par courrier électronique. Veuillez prendre contact avec le Service client (voir ci-dessous) pour plus d'informations.
- **Service clients**

  Si vous avez des questions au sujet de cette publication ou avez besoin de renseignements supplémentaires, prenez contact avec le Service clients:

  Email: custserv@iec.ch
  Tél: +41 22 919 02 11
  Fax: +41 22 919 03 00

Publication numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series. For example, IEC 34-1 is now referred to as IEC 60034-1.

Consolidated editions

The IEC is now publishing consolidated versions of its publications. 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.

Further information on IEC publications

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 this publication, including its validity, is available in the IEC Catalogue of publications (see below) in addition to new editions, amendments and corrigenda. 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 also available from the following:

- **IEC Web Site (www.iec.ch)**
- **Catalogue of IEC publications**

  The on-line catalogue on the IEC web site (www.iec.ch/searchpub) enables you to search by a variety of criteria including text searches, technical committees and date of publication. On-line information is also available on recently issued publications, withdrawn and replaced publications, as well as corrigenda.
- **IEC Just Published**

  This summary of recently issued publications (www.iec.ch/online_news/justpub) is also available by email. Please contact the Customer Service Centre (see below) for further information.
- **Customer Service Centre**

  If you have any questions regarding this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre:

  Email: custserv@iec.ch
  Tel: +41 22 919 02 11
  Fax: +41 22 919 03 00

.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

NORME INTERNATIONALE

INTERNATIONAL STANDARD

CEI
IEC
60664-4

Deuxième édition
Second edition
2005-09

PUBLICATION FONDAMENTALE DE SÉCURITÉ
BASIC SAFETY PUBLICATION

Coordination de l'isolement des matériels dans les systèmes (réseaux) à basse tension –

Partie 4: Considérations sur les contraintes de tension à haute fréquence

Insulation coordination for equipment within low-voltage systems –

Part 4: Consideration of high-frequency voltage stress

© IEC 2005 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, 3, rue de Varembé, PO Box 131, CH-1211 Geneva 20, Switzerland
Telephone: +41 22 919 02 11 Telefax: +41 22 919 03 00 E-mail: inmail@iec.ch Web: 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

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS

Not for Resale

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS 8
INTRODUCTION 12

1 Domaine d'application et objet 14
2 Références normatives 16
3 Termes et définitions 16
4 Distances d'isolement 18
4.1 Conditions générales 18
4.2 Informations de base 18
4.3 Champs homogène et approximativement homogène 18
4.4 Champs non homogènes 20
5 Lignes de fuite 26
5.1 Valeurs expérimentales 26
5.2 Dimensionnement des lignes de fuite 26
6 Isolation solide 32
6.1 Considération générale 32
6.2 Facteurs d'influence 32
6.3 Dimensionnement de l'isolation solide 34
7 Essais à haute fréquence 36
7.1 Exigences fondamentales 36
7.2 Source de tension d'essai 38
7.3 Conditionnement 38
7.4 Essai de claquage à haute fréquence 38
7.5 Essai de décharges partielles à haute fréquence 38
7.6 Exemples des résultats d'essai 44
8 Tensions non sinusoïdales 44
8.1 Considérations générales 44
8.2 Tension de chocs périodique 46
8.3 Analyse harmonique 46
8.4 Procédure de dimensionnement et essais 46

Annexe A (informative) Caractéristiques d'isolement des distances d'isolement sous des tensions à haute fréquence 50
Annexe B (informative) Caractéristiques d'isolement des lignes de fuite sous des tensions à haute fréquence 64
Annexe C (informative) Caractéristiques d'isolement de l'isolation solide sous des tensions à haute fréquence 70
Annexe D (normative) Essais de l'isolation sous des tensions à haute fréquence 90
Annexe E (informative) Isolation subissant des contraintes avec des tensions à haute fréquence non sinusoïdales 118
Annexe F (informative) Schémas de dimensionnement 128

Bibliographie 132

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

CONTENTS

FOREWORD 9
INTRODUCTION 13
1 Scope and object 15
2 Normative references 17
3 Terms and definitions 17
4 Clearances 19
4.1 General conditions 19
4.2 Basic information 19
4.3 Homogeneous and approximately homogeneous fields 19
4.4 Inhomogeneous fields 21
5 Creepage distances 27
5.1 Experimental data 27
5.2 Dimensioning of creepage distances 27
6 Solid insulation 33
6.1 General consideration 33
6.2 Influencing factors 33
6.3 Dimensioning of solid insulation 35
7 High-frequency testing 37
7.1 Basic requirements 37
7.2 Test voltage source 39
7.3 Conditioning 39
7.4 High-frequency breakdown test 39
7.5 High-frequency partial discharge test 39
7.6 Examples of test results 45
8 Non sinusoidal voltages 45
8.1 General considerations 45
8.2 Periodic impulse voltage 47
8.3 Harmonic analysis 47
8.4 Dimensioning procedure and testing 47

Annex A (informative) Insulation characteristics of clearances at high-frequency voltages 51
Annex B (informative) Insulation characteristics of creepage distances at high-frequency voltages 65
Annex C (informative) Insulation characteristics of solid insulation at high-frequency voltages 71
Annex D (normative) Testing of insulation at high-frequency voltages 91
Annex E (informative) Insulation stressed with non-sinusoidal high-frequency voltages 119
Annex F (informative) Dimensioning diagrams 129

Bibliography 133

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Figure 1 – Dimensionnement des distances d'isolement dans l'air non homogènes sous pression atmosphérique (électrodes pointe-plan, rayon de 5 µm), afin d'éviter les DP (distance d'isolement ≥ 1 mm) ou le claquage (distance d'isolement < 1 mm) 24

Figure 2 – Dimensionnement des lignes de fuite pour éviter les décharges partielles (ligne de fuite ≥ 1 mm) ou le claquage (ligne de fuite < 1 mm) 30

Figure 3 – Intensité de champ admissible pour le dimensionnement de l'isolation solide conformément à l'Equation (3) 36

Figure 4 – Tension de chocs périodique (voir Partie 1) 46

Figure A.1 – Claquage à haute fréquence dans l'air sous pression atmosphérique, champ homogène, gamme de fréquences 50 Hz – 25 MHz [3] 52

Figure A.2 – Claquage à haute fréquence dans l'air sous pression atmosphérique, champ homogène, gamme de fréquences 50 Hz – 2,5 MHz [4] 54

Figure A.3 – Pointe de l'aiguille après claquage (en haut) et avant claquage (en bas) 56

Figure A.4 – Tensions de seuil de DP dans l'air sous pression atmosphérique pour f = 100 kHz, électrodes pointe-plan avec un rayon de point différent [6] 58

Figure A.5 – Tensions d'extinction de DP et tensions de claquage dans l'air sous pression atmosphérique pour f = 460 kHz, électrodes pointe-plan avec des aiguilles BB [6] 60

Figure A.6 – Tensions d'extinction de DP et tensions de claquage dans l'air sous pression atmosphérique pour f = 1 MHz, électrodes pointe-plan avec des aiguilles BB [6] 62

Figure B.1 – Eprouvette pour la mesure des tensions de DP et des tensions de tenue des lignes de fuite jusqu'à 6,3 mm 64

Figure B.2 – Résultats d'essai de la tension d'extinction de DP U_e des lignes de fuite jusqu'à 6,3 mm [6] 68

Figure B.3 – Résultats d'essai de la tension de claquage U_b des lignes de fuite jusqu'à 6,3 mm [6] 68

Figure C.1 – Capacité de tenue aux DP des revêtements; tension d'essai constante U_t (f = 50 Hz) [12] 72

Figure C.2 – Capacité de tenue aux DP des revêtements; tension d'essai à augmentation linéaire U_t (f = 50 Hz) [12] 72

Figure C.3 – Claquage à haute fréquence, isolation solide; d = 0,75 mm [15] 78

Figure C.4 – Claquage à haute fréquence, isolation solide, influence de l'humidité; conditionnement à 50 °C; #1: résines phénoliques micacées, d = 0,75 mm; #2: stratifiés silicone-verre, d = 1,5 mm [19] 80

Figure C.5 – Claquage à haute fréquence, films isolants; #1: Cellulose-Acétobutyrate, #2: Polycarbonate; #3: Cellulose-Triacétate [20] 84

Figure C.6 – Claquage à haute fréquence, films isolants; #1: Polystyrène, d = 80 µm, #2: Polyéthylène, d = 50 µm [20] 88

Figure D.1 – Transformateur à résonance à haute fréquence; influence du nombre de spires de la bobine secondaire N_2 sur la tension de sortie U_2; N_1 = 20; N_2 = 210/280/350/420/560 [22] 90

Figure D.2 – Oscillateur à puissance élevée et à haute fréquence [5] et [6] 92

Figure D.3 – Circuit d'essai de DP pour les essais de tension à haute fréquence [22] 96

Figure D.4 – Schéma du circuit d'essai [5] et [6] 98

Figure D.5 – Réponse d'impulsion de DP pour une fréquence d'impulsion de DP considérée de 2 MHz pour différentes fréquences de coupure supérieures f_c du circuit d'essai; cela inclut un filtre coupe-bande de 3ème ordre avec f_{centre} = 1 MHz [5] et [6] 100

Figure D.6 – Circuit équivalent d'un circuit d'essai de DP avec des constantes discrètes [5] 104

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Figure 1 – Dimensioning of inhomogeneous clearances in air at atmospheric pressure (point-plane-electrodes, 5 µm radius) to avoid PD (clearance ≥ 1 mm) or breakdown (clearance < 1 mm) 25

Figure 2 – Dimensioning of creepage distances to avoid partial discharge (creepage distance ≥ 1 mm) or breakdown (creepage distance < 1 mm) 31

Figure 3 – Permissible field strength for dimensioning of solid insulation according to Equation (3) 37

Figure 4 – Periodic impulse voltage (see Part 1) 47

Figure A.1 – Breakdown at high frequency in air at atmospheric pressure, homogeneous field, frequency range 50 Hz – 25 MHz [3] 53

Figure A.2 – Breakdown at high frequency in air at atmospheric pressure, homogeneous field, frequency range 50 Hz – 2,5 MHz [4] 55

Figure A.3 – Needle tip after (upper) and before (lower) breakdown 57

Figure A.4 – PD inception voltages in air at atmospheric pressure for f = 100 kHz, point-plane electrodes with different point radius [6] 59

Figure A.5 – PD extinction voltages and breakdown voltages in air at atmospheric pressure for f = 460 kHz, point-plane electrodes with BB-needles [6] 61

Figure A.6 – PD extinction voltages and breakdown voltages in air at atmospheric pressure for f = 1 MHz, point-plane electrodes with BB-needles [6] 63

Figure B.1 – Test specimen for measuring the PD voltages and the withstand voltages of creepage distances up to 6,3 mm 65

Figure B.2 – Test results of the PD extinction voltage U_e of creepage distances up to 6,3 mm [6] 69

Figure B.3 – Test results of the breakdown voltage U_b of creepage distances up to 6,3 mm [6] 69

Figure C.1 – PD withstand capability of coatings; constant test voltage U_t (f = 50 Hz) [12] 73

Figure C.2 – PD withstand capability of coatings; linearly increasing test voltage U_t (f = 50 Hz) [12] 73

Figure C.3 – Breakdown at high frequency, solid insulation; d = 0,75 mm [15] 79

Figure C.4 – Breakdown at high frequency, solid insulation, influence of humidity; conditioning at 50 °C; #1: mica-filled phenolic, d = 0,75 mm; #2: glass-silicone laminate, d = 1,5 mm [19] 81

Figure C.5 – Breakdown at high frequency, insulating films; #1: Cellulose-Acetobutyrate, #2: Polycarbonate; #3: Cellulose-Triacetate [20] 85

Figure C.6 – Breakdown at high frequency, insulating films; #1: Polystyrene, d = 80 µm, #2: Polyethylene, d = 50 µm [20] 89

Figure D.1 – High-frequency resonance transformer; influence of the number of turns of the secondary coil N_2 on the output voltage U_2; N_1 = 20; N_2 = 210/280/350/420/560 [22] 91

Figure D.2 – High-frequency high power oscillator [5] and [6] 93

Figure D.3 – PD test circuit for high-frequency voltage tests [22] 97

Figure D.4 – Diagram of the test circuit [5] and [6] 99

Figure D.5 – PD impulse response for an assumed PD impulse frequency of 2 MHz for different upper cut-off frequencies f_c of the test circuit; this includes a 3rd order band-stop filter with f_{centre} = 1 MHz [5] and [6] 101

Figure D.6 – Equivalent circuit of a PD test circuit with lumped elements [5] 105

Figure D.7 – Transfer characteristics of PD test circuits when using a PD-impulse voltage source versus a PD impulse current source [5] 107

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Figure D.7 – Caractéristiques de transfert des circuits d'essai de DP en utilisant une source de tension de chocs de DP par rapport à une source de courant de choc de DP [5] 106

Figure D.8 – Signal d'entrée U_{in} et signal de mesurage U_m en fonction de la capacité du condensateur de couplage C_k (capacité de l'éprouvette C_3 = 10 pF) [5] 110

Figure D.9 – Essais de DP des optocoupleurs sous une tension à haute fréquence [30] 112

Figure D.10 – Essais de DP des transformateurs d'impulsion; influence de la fréquence de la tension [30] 114

Figure D.11 – Essais de DP des circuits imprimés revêtus; U_i, d = 0,2 mm [30] 114

Figure D.12 – Durée de vie t des fils émaillés (paire torsadée) sous une tension à haute fréquence; la contrainte est de 10 % au-dessus de la tension de seuil de DP [31] 116

Figure E.1 – Tension de chocs périodique, forme d'onde rectangulaire 120

Figure E.2 – Tension de chocs périodique, forme d'onde rectangulaire, spectre 120

Figure E.3 – Tension de chocs périodique, forme d'onde rectangulaire avec claquage (voir Figure 4) 122

Figure E.4 – Tension de chocs périodique, forme d'onde rectangulaire avec claquage, spectre 122

Figure E.5 – Tension de chocs périodique, forme d'onde rectangulaire avec oscillation (1 MHz) 124

Figure E.6 – Tension de chocs périodique, forme d'onde rectangulaire avec oscillation (1 MHz), spectre 124

Figure E.7 – Tension de chocs périodique, forme d'onde rectangulaire avec claquage élevé 126

Figure E.8 – Tension de chocs périodique, forme d'onde rectangulaire avec claquage élevé, spectre 126

Figure F.1 – Schéma pour le dimensionnement des distances d'isolement 128

Figure F.2 – Schéma pour le dimensionnement des lignes de fuite 130

Tableau 1 – Valeurs minimales des distances d'isolement dans l'air sous pression atmosphérique pour des conditions de champ non homogène 26

Tableau 2 – Valeurs minimales des lignes de fuite d pour différentes gammes de fréquences 32

Tableau B.1 – Matériaux inclus dans les recherches 66

Tableau D.1 – Données de la source de tension d'essai [5] et [6] 92

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Figure D.8 – Input signal U_{in} and measuring signal U_m depending upon the capacitance of the coupling capacitor C_k (capacitance of the test specimen C_3 = 10 pF) [5] 111
Figure D.9 – PD testing of optocouplers at high-frequency voltage [30] 113
Figure D.10 – PD testing of impulse transformers; influence of the frequency of the voltage [30] 115
Figure D.11 – PD testing of coated printed circuit boards; U_i, d = 0,2 mm [30] 115
Figure D.12 – Lifetime t of enamelled wires (twisted pair) at high-frequency voltage; stress is 10 % above the PD inception voltage [31] 117
Figure E.1 – Periodic impulse voltage, rectangular waveshape 121
Figure E.2 – Periodic impulse voltage, rectangular waveshape, spectrum 121
Figure E.3 – Periodic impulse voltage, rectangular waveshape with overshoot (see Figure 4) 123
Figure E.4 – Periodic impulse voltage, rectangular waveshape with overshoot, spectrum 123
Figure E.5 – Periodic impulse voltage, rectangular waveshape with ringing (1 MHz) 125
Figure E.6 – Periodic impulse voltage, rectangular waveshape with ringing (1 MHz), spectrum 125
Figure E.7 – Periodic impulse voltage, rectangular waveshape with high overshoot 127
Figure E.8 – Periodic impulse voltage, rectangular waveshape with high overshoot, spectrum 127
Figure F.1 – Diagram for dimensioning of clearances 129
Figure F.2 – Diagram for dimensioning of creepage distances 131

Table 1 – Minimum values of clearances in air at atmospheric pressure for inhomogeneous field conditions 27
Table 2 – Minimum values of creepage distances d for different frequency ranges 33
Table B.1 – Materials included in the investigations 67
Table D.1 – Data of the test voltage source [5] and [6] 93

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

COORDINATION DE L'ISOLEMENT DES MATÉRIELS DANS LES SYSTÈMES (RÉSEAUX) À BASSE TENSION –

Partie 4: Considérations sur les contraintes de tension à haute fréquence

AVANT-PROPOS

1) La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) 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, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de la CEI"). 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 Publications de la CEI se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de la CEI. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que la CEI s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; la CEI ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
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. Toutes divergences entre toutes Publications de la CEI et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
5) La CEI n'a prévu aucune procédure de marquage valant indication d'approbation et n'engage pas sa responsabilité pour les équipements déclarés conformes à une de ses Publications.
6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à la CEI, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de la CEI, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de la CEI ou de toute autre Publication de la CEI, ou au crédit qui lui est accordé.
8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de la CEI 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 60664-4 a été établie par le comité d'études 109 de la CEI: Coordination de l'isolement pour le matériel à basse tension.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition parue comme rapport technique en 1997. Elle constitue une révision technique qui conduit au statut de Norme internationale.

Les modifications majeures effectuées au cours de la révision de la CEI 60664-4 ont été les suivantes:

– inclusion d'informations plus récentes concernant les caractéristiques de tenue de l'isolation à des contraintes de tension à haute fréquence (voir Annexes A, B et C);

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

INSULATION COORDINATION FOR EQUIPMENT WITHIN LOW-VOLTAGE SYSTEMS –

Part 4: Consideration of high-frequency voltage stress

FOREWORD

1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of 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, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as "IEC Publication(s)"). 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. 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 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 IEC National Committees.
3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
5) IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with an IEC Publication.
6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 60664-4 has been prepared by IEC technical committee 109: Insulation co-ordination for low-voltage equipment.

This second edition cancels and replaces the first edition which was issued as a technical report in 1997. It constitutes a technical revision and now has the status of an International Standard.

The major changes made during the revision of IEC 60664-4 were the following:

– inclusion of more recent information about the withstand characteristics of insulation at high-frequency voltage stress (see Annexes A, B and C);

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

– inclusion d'exigences pour le dimensionnement des distances d'isolement à des contraintes de tension à haute fréquence (voir Article 4);
– inclusion d'exigences pour le dimensionnement des lignes de fuite à des contraintes de tension à haute fréquence (voir Article 5);
– inclusion d'exigences pour le dimensionnement de l'isolation solide à des contraintes de tension à haute fréquence (voir Article 6);
– inclusion de schémas pour fournir des lignes directrices sur le dimensionnement en tenant compte des contraintes de tension à haute fréquence (voir Annexe F);
– spécification d'essais en tenant compte des contraintes de tension à haute fréquence (voir Article 7) ;
– inclusion de circuits d'essai pour les essais de tension de tenue à haute fréquence et les essais de décharges partielles (voir Annexes D.1 et D.2.1);
– inclusion de critères de conception pour les circuits d'essai de décharges partielles sous des tensions à haute fréquence (voir Annexe D.2.2);
– inclusion de critères pour couvrir les contraintes de tension non sinusoïdale (voir Article 8 et Annexe E).

Elle a le statut de publication fondamentale de sécurité, conformément au Guide CEI 104.

La présente Norme internationale doit être utilisée conjointement avec la CEI 60664-1 ou la CEI 60664-5.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
109/51/FDIS	109/53/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 a été rédigée selon les Directives ISO/CEI, Partie 2.

La CEI 60664 comprend les parties suivantes, présentées sous le titre général *Coordination de l'isolement des matériels dans les systèmes (réseaux) à basse tension*:

Partie 1: Principes, prescriptions et essais

Partie 2: Guide d'application

Partie 3: Utilisation de revêtement, d'empotage ou de moulage pour la protection contre la pollution

Partie 4: Considérations sur les contraintes de tension à haute fréquence

Partie 5: Méthode détaillée de détermination des distances d'isolement dans l'air et des lignes de fuite inférieures ou égales à 2 mm

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant la date de maintenance indiquée sur le site web de la CEI sous «http://webstore.iec.ch» dans les données relatives à la publication recherchée. A cette date, la publication sera

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

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

– inclusion of requirements for the dimensioning of clearances at high-frequency voltage stress (see Clause 4);
– inclusion of requirements for the dimensioning of creepage distances at high-frequency voltage stress (see Clause 5);
– inclusion of requirements for the dimensioning of solid insulation at high-frequency voltage stress (see Clause 6);
– inclusion of diagrams to provide guidance on dimensioning with respect to high-frequency voltage stress (see Annex F);
– specification of tests with respect to high-frequency voltage stress (see Clause 7).
– inclusion of test circuits for high-frequency voltage withstand testing and partial discharge testing (see Annex D.1 and D.2.1);
– inclusion of design criteria for partial discharge test circuits at high-frequency voltage (see Annex D.2.2);
– Inclusion of criteria for dealing with non sinusoidal voltage stress (see Clause 8 and Annex E).

It has the status of a basic safety publication in accordance with IEC Guide 104.

This International Standard is to be used in conjunction with IEC 60664-1 or IEC 60664-5.

The text of this standard is based on the following documents:

FDIS	Report on voting
109/51/FDIS	109/53/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 been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 2.

IEC 60664 consists of the following parts under the general title *Insulation coordination for equipment within low-voltage systems*:

Part 1: Principles, requirements and tests

Part 2: Application guide

Part 3: Use of coating, potting or moulding for protection against pollution

Part 4: Consideration of high-frequency voltage stress

Part 5: A comprehensive method for determining clearances and creepage distances equal to or less than 2 mm

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until the maintenance result date indicated on the IEC web site under "http://webstore.iec.ch" in the data related to the specific publication. At this date, the publication will be

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

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

INTRODUCTION

Des contraintes électriques élevées apparaissent également dans les matériels à basse tension. La fréquence est généralement de 50/60 Hz mais, dans certaines applications, des fréquences légèrement plus élevées (400 Hz) ou plus basses (16 2/3 Hz,) ou continues peuvent apparaître. Une situation particulière apparaît dans les transmetteurs de radiofréquences de haute puissance. Le développement de tels matériels a été à l'origine de la motivation de recherches sur la capacité de tenue de l'isolation pour les radiofréquences. Depuis ce temps, l'aspect des contraintes de tension à haute fréquence n'a pas été étudié avec beaucoup d'efforts.

Actuellement, les tensions de fonctionnement à haute fréquence dépassant 30 kHz sont souvent utilisées dans des matériels à basse tension, et l'utilisation de fréquences dans le domaine du MHz est probable dans le futur. De nombreuses formes de tension sont non sinusoïdales. Des petites dimensions sont nécessaires pour la miniaturisation et pour une fiabilité élevée, par exemple pour les transformateurs HF. Par conséquent, des contraintes très élevées sont communes pour l'isolation solide.

En augmentant la fréquence, l'effet de détérioration des décharges partielles est également augmenté de façon approximativement proportionnelle à la fréquence, de telle sorte que l'impact des décharges partielles sur le dimensionnement est bien supérieur à la fréquence industrielle.

Comme les distances sont appelées à diminuer et les fréquences à augmenter dans la même période, la situation s'aggravera dans le futur. C'est pourquoi, en tenant compte de la sécurité du personnel et de la fiabilité du matériel, les contraintes dues aux hautes fréquences jusqu'à 100 MHz sont à considérer dans la coordination de l'isolement des matériels à basse tension (voir la note 2 du Domaine d'application de la Partie 1).

La présente norme résume les données disponibles les plus importantes concernant les contraintes à haute fréquence sur l'isolement et précise comment les matériaux et leurs dimensions sont influencés. Les données pour le dimensionnement des distances d'isolement, des lignes de fuite et de l'isolation solide sont spécifiées. La présente norme décrit aussi la manière dont les essais peuvent être réalisés en tenant compte de ces contraintes.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

INTRODUCTION

High electrical stress also occurs in low-voltage equipment. The frequency is usually 50/60 Hz, but in some applications a higher frequency (400 Hz) or a lower frequency (16 2/3 Hz) or d.c. can occur. A particular situation exists in high-power RF transmitters. The development of such equipment had motivated earlier research on the withstand capability of insulation at radio frequencies. Since that time, the aspect of high-frequency voltage stress had not been pursued with much effort.

At present, high-frequency working voltages exceeding 30 kHz are often used in low-voltage equipment, and the use of frequencies in the MHz range is likely in the future. Many of the voltage shapes are non sinusoidal. Small dimensions are necessary for miniaturization and for high efficiency, for instance in high-frequency transformers. Consequently, very high stresses are common in solid insulation.

By increasing the frequency the deteriorating effect of partial discharges is also increased roughly proportionally to the frequency, so that the impact of partial discharges on dimensioning is much higher compared to power frequency.

As dimensions are likely to decrease further and frequencies increase, this situation will be aggravated in the future. Therefore, with respect to safety of personnel and reliability of equipment, the stress due to high frequencies up to 100 MHz has to be considered for insulation coordination of low-voltage equipment, (see note 2 in the Scope of Part 1).

This standard summarizes the most important available data concerning high-frequency stress of insulation, and identifies how materials and their dimensioning are influenced. Data for dimensioning of clearances, creepage distances and solid insulation are specified. This standard also describes how tests can be performed with respect to this stress.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

COORDINATION DE L'ISOLEMENT DES MATÉRIELS DANS LES SYSTÈMES (RÉSEAUX) À BASSE TENSION –

Partie 4: Considérations sur les contraintes de tension à haute fréquence

1 Domaine d'application et objet

La présente partie de la CEI 60664 traite de l'isolation principale, de l'isolation supplémentaire et de l'isolation renforcée soumises à des contraintes de tension à haute fréquence dans les matériels à basse tension. Les valeurs de dimensionnement s'appliquent directement à l'isolation principale; pour l'isolation renforcée, des exigences supplémentaires s'appliquent, conformément à la Partie 1. Elle est applicable pour le dimensionnement des distances d'isolement, des lignes de fuite et de l'isolation solide subissant des contraintes par tout type de tensions périodiques avec une fréquence fondamentale supérieure à 30 kHz et pouvant atteindre 10 MHz.

La présente partie de la CEI 60664 ne peut être utilisée que conjointement à la CEI 60664-1 ou à la CEI 60664-5 (intitulées Partie 1 ou Partie 5 dans la présente norme). En utilisant la Partie 1 ou la Partie 5 conjointement à la présente partie, la limite de fréquence de la Partie 1 ou de la Partie 5 est étendue à des fréquences supérieures à 30 kHz.

La présente partie s'applique également à la Partie 3 pour les fréquences supérieures à 30 kHz et la protection de type 1. Pour la protection de type 2, cette question est à l'étude.

NOTE 1 Les valeurs de dimensionnement pour les fréquences supérieures à 10 MHz sont à l'étude.

NOTE 2 La présente norme ne prend pas en considération les émissions à haute fréquence vers le réseau. En utilisation normale du matériel, on estime que l'interférence des tensions à haute fréquence émises vers le réseau est négligeable, en considérant les contraintes d'isolement. Par conséquent, il n'est pas nécessaire de prendre cela en compte.

Elle s'applique aux matériels utilisés jusqu'à 2 000 m au-dessus du niveau de la mer, ayant une tension assignée ne dépassant pas 1 000 V en courant alternatif.

Elle définit les exigences pour des distances d'isolement, des lignes de fuite et de l'isolation solide des matériels, basées sur leurs critères de performance. Elle comprend les méthodes d'essais diélectriques en tenant compte de la coordination de l'isolement.

Les distances d'isolement minimales spécifiées dans la présente partie ne s'appliquent pas en présence de gaz ionisés. Les exigences particulières dans de telles conditions peuvent être spécifiées par les comités d'études appropriés, comme ils l'entendent.

La présente partie ne traite pas des distances

– à travers l'isolation liquide,
– à travers les gaz autres que l'air,
– à travers l'air comprimé.

NOTE 3 Des tensions plus élevées peuvent exister dans les circuits internes des matériels.

NOTE 4 Les exigences pour les altitudes dépassant 2 000 m peuvent être déduites du Tableau A.2 de l'Annexe A de la Partie 1.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

INSULATION COORDINATION FOR EQUIPMENT WITHIN LOW-VOLTAGE SYSTEMS –

Part 4: Consideration of high-frequency voltage stress

1 Scope and object

This part of IEC 60664 deals with basic, supplementary and reinforced insulation subjected to high-frequency voltage stress within low-voltage equipment. The dimensioning values directly apply for basic insulation; for reinforced insulation additional requirements apply according to Part 1. It is applicable for the dimensioning of clearances, creepage distances and solid insulation stressed by any type of periodic voltages with a fundamental frequency above 30 kHz and up to 10 MHz.

This part of IEC 60664 can only be used together with IEC 60664-1 or with IEC 60664-5 (in this standard called Part 1 or Part 5). By using Part 1 or Part 5 together with this part the frequency limit of Part 1 or Part 5 is extended to frequencies higher than 30 kHz.

This part also applies to Part 3 for frequencies greater than 30 kHz and protection of type 1. For type 2 protection this question is under consideration.

NOTE 1 Dimensioning values for frequencies above 10 MHz are under consideration.

NOTE 2 This standard does not consider the high-frequency emission to the mains. In normal use of equipment, it is assumed that the interference of high-frequency voltages emitted to the mains is negligible with respect to insulation stress. Therefore it is not necessary to take it into account.

It applies to equipment for use up to 2 000 m above sea level having a rated voltage up to a.c. 1 000 V.

It specifies the requirements for clearances, creepage distances and solid insulation for equipment based upon their performance criteria. It includes methods of electric testing with respect to insulation coordination.

The minimum clearances specified in this part do not apply where ionized gases occur. Special requirements for such situations may be specified at the discretion of the relevant technical committee.

This part does not deal with distances

- through liquid insulation,
- through gases other than air,
- through compressed air.

NOTE 3 Higher voltages may exist in internal circuits of the equipment.

NOTE 4 Requirements for altitudes exceeding 2 000 m can be derived from Table A.2 of Annex A of Part 1.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

L'objet de la présente norme est de guider les comités d'études responsables de matériels différents, de manière à rationaliser leurs spécifications, afin de réaliser la coordination de l'isolement lorsque les distances d'isolement dans l'air, les lignes de fuite et l'isolation solide des matériels sont spécifiées.

2 Références normatives

Les documents référencés ci-après sont indispensables pour l'application du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, c'est l'édition la plus récente du document référencé (y compris tous ses amendements) qui s'applique.

CEI 60112:2003, *Méthode de détermination des indices de résistance et de tenue au cheminement des matériaux isolants solides dans des conditions humides*

CEI 60664-1:1992, *Coordination de l'isolement des matériels dans les systèmes (réseaux) à basse tension: Partie 1: Principes, prescriptions et essais*
Amendement 1 (2000)
Amendement 2 (2002)

CEI 60664-5:2003, *Coordination de l'isolement des matériels dans les systèmes (réseaux) à basse tension: Méthode détaillée de détermination des distances d'isolement dans l'air et des lignes de fuite inférieures ou égales à 2 mm*

Guide CEI 104:1997, *Elaboration des publications de sécurité et utilisation des publications fondamentales de sécurité et publications groupées de sécurité*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions fournis dans la Partie 1, ainsi que les termes et définitions suivants, s'appliquent.

3.1
champ approximativement homogène
pour les fréquences dépassant 30 kHz, le champ est considéré comme étant approximativement homogène, lorsque le rayon de courbure des parties conductrices est supérieur ou égal à 20 % de la distance d'isolement

3.2
champ non homogène
pour les fréquences dépassant 30 kHz, le champ est considéré comme étant non homogène, lorsque le rayon de courbure des parties conductrices est inférieur à 20 % de la distance d'isolement

3.3
$U_{\text{crête}}$
valeur de crête de tout type de tension de crête périodique à travers l'isolation

3.4
f_{crit}
fréquence critique à laquelle la réduction de la tension de claquage d'une distance d'isolement apparaît

3.5
f_{min}
fréquence à laquelle la réduction maximale de la tension de claquage d'une distance d'isolement apparaît

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

The object of this standard is to guide technical committees responsible for different equipment in order to rationalise their requirements so that insulation coordination is achieved when specifying clearances in air, creepage distances and solid insulation for equipment.

2 Normative references

The following referenced documents are indispensable for the application of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60112:2003, *Method for determining the comparative and the proof tracking indices of solid insulating materials under moist conditions*

IEC 60664-1:1992, *Insulation coordination for equipment within low-voltage systems: Part 1: Principles, requirements and tests*

Amendment 1 (2000)

Amendment 2 (2002)

IEC 60664-5:2003, *Insulation coordination for equipment within low-voltage systems: A comprehensive method for determining clearances and creepage distances equal to or less than 2 mm*

IEC Guide 104:1997, *The preparation of safety publications and the use of basic safety publications and group safety publications*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in Part 1, as well as the following terms and definitions, apply.

3.1
approximately homogeneous field
for frequencies exceeding 30 kHz, the field is considered to be approximately homogeneous when the radius of curvature of the conductive parts is equal or greater than 20 % of the clearance

3.2
inhomogeneous field
for frequencies exceeding 30 kHz the field is considered to be inhomogeneous when the radius of curvature of the conductive parts is less than 20 % of the clearance

3.3
$U_{\mathbf{peak}}$
peak value of any type of periodic peak voltage across the insulation

3.4
$f_{\mathbf{crit}}$
critical frequency at which the reduction of the breakdown voltage of a clearance occurs

3.5
$f_{\mathbf{min}}$
frequency at which the maximum reduction of the breakdown voltage of a clearance occurs

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

3.6
tension de DP (décharges partielles)
terme générique désignant à la fois la tension de seuil de décharges partielles U_i et la tension d'extinction de décharges partielles U_e

3.7
intensité du champ électrique E
gradient de tension par unité de longueur, généralement exprimé en kV/mm

4 Distances d'isolement

4.1 Conditions générales

Le présent article est applicable aux distances d'isolement dans l'air. Les données de dimensionnement sont valables pour une altitude maximale de 2 000 m au-dessus du niveau de la mer. Pour des altitudes plus élevées, les facteurs de correction d'altitude du Tableau A.2 de la Partie 1 sont applicables.

4.2 Informations de base

Conformément aux informations de base données à l'Article A.1, la capacité de tenue des distances d'isolement ne peut être influencée que par la fréquence de la tension, si les tensions périodiques sont appropriées (voir 3.1.1.2 de la Partie 1 ou de la Partie 5). Pour les surtensions transitoires, le dimensionnement conformément à 3.1.1.1 de la Partie 1 ou de la Partie 5 est suffisant.

4.3 Champs homogène et approximativement homogène

4.3.1 Conditions pour un champ approximativement homogène

Pour les fréquences dépassant 30 kHz, un champ est considéré comme étant approximativement homogène, lorsque le rayon de courbure des parties conductrices est supérieur ou égal à 20 % de la distance d'isolement.

4.3.2 Valeurs expérimentales des caractéristiques de claquage

En conclusion de A.2.1, la fréquence critique f_{crit}, à laquelle la réduction de la tension de claquage se produit, dépend de la valeur de la distance d'isolement, comme suit:

$$f_{crit} \approx \frac{0{,}2}{d \,/\, \text{mm}} \quad \text{MHz} \tag{1}$$

où
d est la distance d'isolement.

Les valeurs expérimentales, présentées en A.2.1 pour des conditions de champ homogène, montrent une réduction maximale de la tension de claquage avec une fréquence de 20 % par rapport aux valeurs de 50/60 Hz. La fréquence, à laquelle la réduction maximale se produit, est appelée f_{min}.

NOTE Pour les besoins de la présente norme, f_{min}, illustrée à la Figure A.1, est acceptée comme ayant une valeur de 3 MHz.

4.3.3 Dimensionnement des distances d'isolement pour des conditions de champs homogène et approximativement homogène

Les caractéristiques d'isolation des distances d'isolement de champ homogène dans l'air sous pression atmosphérique en tenant compte de la fréquence peuvent être synthétisées par les indications suivantes.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

3.6
PD-voltage
generic term for both partial discharge inception voltage U_i and partial discharge extinction voltage U_e

3.7
electrical field strength E
voltage gradient per unit length usually expressed in kV/mm

4 Clearances

4.1 General conditions

This clause is applicable to clearances in air. The dimensioning data are valid for a maximum altitude of 2 000 m above sea level. For higher altitudes, the altitude correction factors of Table A.2 of Part 1 are applicable.

4.2 Basic information

According to the basic information given in Clause A.1 the withstand capability of clearances can only be influenced by the frequency of the voltage if periodic voltages are relevant (see 3.1.1.2 of Part 1 or Part 5). For transient overvoltages dimensioning according to 3.1.1.1 of Part 1 or Part 5 is sufficient.

4.3 Homogeneous and approximately homogeneous fields

4.3.1 Conditions for approximately homogeneous field

For frequencies exceeding 30 kHz, an approximately homogeneous field is considered to exist when the radius of curvature of the conductive parts is equal or greater than 20 % of the clearance.

4.3.2 Experimental data of breakdown characteristics

As a conclusion from A.2.1, the critical frequency f_{crit}, at which the reduction of the breakdown voltage occurs, depends upon the value of the clearance as follows:

$$f_{crit} \approx \frac{0{,}2}{d \,/\, \text{mm}} \quad \text{MHz} \tag{1}$$

where
d is the clearance.

The experimental data, presented in A.2.1 for homogeneous field conditions, shows a maximum reduction of the breakdown voltage with frequency of 20 % compared to the 50/60 Hz-values. The frequency, at which the maximum reduction occurs, is called f_{min}.

NOTE For the purposes of this standard, f_{min} as illustrated in Figure A.1 is accepted as 3 MHz.

4.3.3 Dimensioning of clearances for homogeneous and approximately homogeneous field conditions

The insulating characteristics of homogeneous field clearances in air at atmospheric pressure with respect to frequency can be summarized by the following statements.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

– Au-dessus de f_{crit}, la tension de claquage est réduite avec l'augmentation de la fréquence. La réduction maximale de la tension de claquage est d'environ 20 %.

– La tension de claquage atteint un minimum à une fréquence f_{min}. A des fréquences plus élevées, la tension de claquage est augmentée et peut dépasser la valeur mesurée à la fréquence industrielle.

On suppose que ces caractéristiques sont également applicables pour des conditions de champ approximativement homogène.

Le dimensionnement pour les champs homogènes est basé sur les valeurs du Cas B du Tableau 7 de la Partie 1 ou du Tableau 3 de la Partie 5. L'utilisation de ces valeurs nécessite un essai de tenue, conformément à 4.1.1 de la Partie 1 ou de la Partie 5.

Le dimensionnement pour les champs approximativement homogènes est basé sur les valeurs du Cas A du Tableau 7 de la Partie 1 ou du Tableau 3 de la Partie 5. Aucun essai de tenue n'est nécessaire. Cependant, le rayon de courbure des parties conductrices doit être supérieur ou égal à 20 % de la distance d'isolement.

Il existe deux méthodes de dimensionnement:

1. Si aucune évaluation détaillée n'est prévue, la distance d'isolement doit être conçue dans le domaine de fréquence de la présente norme, pour 125 % de la tension de tenue requise, conformément au Tableau 7 de la Partie 1 ou au Tableau 3 de la Partie 5.
2. Si une évaluation détaillée est prévue, les éléments suivants s'appliquent:
   a) Pour les fréquences inférieures à f_{crit} (voir Equation (1)), la distance d'isolement doit être conçue pour 100 % de la tension de tenue requise, conformément au Tableau 7 de la Partie 1 ou au Tableau 3 de la Partie 5.
   b) Pour les fréquences supérieures à f_{min}, la distance d'isolement doit être conçue pour 125 % de la tension de tenue requise, conformément au Tableau 7 de la Partie 1 ou au Tableau 3 de la Partie 5.
   c) Pour les fréquences comprises entre f_{crit} et f_{min}, la distance d'isolement doit être conçue pour

$$100\ \% + \frac{f - f_{crit}}{f_{min} - f_{crit}} \times 25\ \% \qquad (2)$$

de la tension de tenue requise, conformément au Tableau 7 de la Partie 1 ou au Tableau 3 de la Partie 5.

Afin d'obtenir la fréquence critique, dans un premier temps, on estime la distance d'isolement pour 100 % de la tension de tenue requise, conformément au Tableau 7 de la Partie 1 ou au Tableau 3 de la Partie 5. On doit ensuite décider si la condition 2a, 2b ou 2c est applicable. Dans la mesure où cette évaluation peut être influencée par le résultat obtenu (distance d'isolement), une deuxième itération peut être requise.

NOTE D'autres informations concernant le dimensionnement sont données à l'Annexe F.

4.4 Champs non homogènes

4.4.1 Conditions pour un champ non homogène

Pour les fréquences dépassant 30 kHz, un champ est considéré comme étant non homogène, lorsque le rayon de courbure des parties conductrices est inférieur à 20 % de la distance d'isolement.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

– Above f_{crit} the breakdown voltage is reduced with increasing frequency. The maximum reduction of the breakdown voltage is about 20 %.
– The breakdown voltage reaches a minimum at a frequency f_{min}. For higher frequencies, the breakdown voltage is increased and can exceed the value at power frequency.

It is assumed that these characteristics are also applicable for approximately homogeneous field conditions.

Dimensioning for homogeneous fields is based upon Case B values of Table 7 of Part 1 or Table 3 of Part 5. The use of these values requires a withstand test according to 4.1.1 of Part 1 or Part 5.

Dimensioning for approximately homogeneous fields is based on Case A values of Table 7 of Part 1 or Table 3 of Part 5. No withstand test is required. However the radius of curvature of the conductive parts shall be equal or greater than 20 % of the clearance.

There are two methods for dimensioning:

1. If no detailed evaluation is intended, the clearance shall be designed within the frequency-scope of this standard for 125 % of the required withstand voltage according to Table 7 of Part 1 or Table 3 of Part 5.
2. If a detailed evaluation is intended, the following applies:
   a) For frequencies below f_{crit} (see Equation (1)) the clearance shall be designed for 100 % of the required withstand voltage according to Table 7 of Part 1 or Table 3 of Part 5.
   b) For frequencies above f_{min} the clearance shall be designed for 125 % of the required withstand voltage according to Table 7 of Part 1 or Table 3 of Part 5.
   c) For frequencies between f_{crit} and f_{min} the clearance shall be designed for

$$100\ \% + \frac{f - f_{crit}}{f_{min} - f_{crit}} \times 25\ \% \qquad (2)$$

   of the required withstand voltage according to Table 7 of Part 1 or Table 3 of Part 5.

In order to obtain the critical frequency, in a first step the clearance is assumed for 100 % of the required withstand voltage according to Table 7 of Part 1 or Table 3 of Part 5. Then it has to be decided, if condition 2a, 2b or 2c is applicable. As this evaluation can be influenced by the result obtained (clearance), a second iteration can be required.

NOTE Further information about dimensioning is given in Annex F.

4.4 Inhomogeneous fields

4.4.1 Conditions for inhomogeneous field

For frequencies exceeding 30 kHz, an inhomogeneous field is considered to exist when the radius of curvature of the conductive parts is less than 20 % of the clearance.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

4.4.2 Valeurs expérimentales de décharges partielles et caractéristiques de claquage

Pour des conditions de champ non homogène, f_{crit} peut toujours être approchée à partir de l'Equation (1). Au-dessus de f_{crit}, l'influence de la fréquence sur la tension de claquage est bien plus significative, par rapport aux conditions de champ homogène. La réduction de la tension de claquage par rapport à celle à la fréquence industrielle peut être supérieure à 50 %.

Pour des conditions de champ non homogène, il faut que les décharges partielles (couronne) soient attendues à des tensions inférieures à la tension de claquage. En raison du risque élevé de détériorations provoquées par ces décharges avec une fréquence de répétition élevée, le dimensionnement doit être suffisant afin d'éviter l'apparition de décharges partielles (DP).

Ces valeurs expérimentales sont présentées en A.2.2.

4.4.3 Dimensionnement des distances d'isolement pour des conditions de champ non homogène

Pour les fréquences inférieures à f_{crit} (voir Equation (1)), la distance d'isolement doit être conçue pour 100 % de la tension de tenue requise, conformément au Tableau 7 de la Partie 1 ou au Tableau 3 de la Partie 5.

La fréquence de la tension doit être prise en compte pour le dimensionnement pour des fréquences supérieures ou égales à f_{crit}. Dans la mesure où les DP peuvent être débutées par des surtensions transitoires et ne doivent pas être maintenues par toute tension en régime permanent (voir 4.1.2.4 de la Partie 1), la tension d'extinction de DP doit être utilisée pour le dimensionnement. Les données appropriées (voir la note) sont représentées à la Figure 1 (mesure), avec une courbe de limitation (dimensionnement).

NOTE 1 Pour le dimensionnement, les données de A.2.2 sont applicables, et sont obtenues pour des distances d'isolement inférieures ou égales à 0,75 mm à partir des tensions de claquage, et supérieures à 0,75 mm à partir des tensions d'extinction de DP à 1 MHz.

Les données de dimensionnement pour les champs non homogènes sont synthétisées au Tableau 1. Ces valeurs sont applicables, si un petit rayon de courbure des parties conductrices apparaît. En pratique, cette condition est satisfaite si le rayon de courbure des parties conductrices est inférieur à 20 % de la distance d'isolement.

NOTE 2 D'autres informations concernant le dimensionnement sont données à l'Annexe F.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

4.4.2 Experimental data of partial discharge and breakdown characteristics

For inhomogeneous field conditions, f_{crit} can still be approximated from Equation (1). Above f_{crit}, the influence of frequency on the breakdown voltage is much more significant compared to homogeneous field conditions. The reduction of the breakdown voltage with respect to that at power frequency can be more than 50 %.

For inhomogeneous field conditions partial discharges (corona) must be expected at voltages below the breakdown voltage. Due to the high risk of deterioration caused by these discharges with high repetition frequency dimensioning shall be sufficient to avoid the occurrence of partial discharges (PD).

The experimental data are presented in A.2.2.

4.4.3 Dimensioning of clearances for inhomogeneous field conditions

For frequencies below f_{crit} (see Equation (1)) the clearance shall be designed for 100 % of the required withstand voltage according to Table 7 of Part 1 or Table 3 of Part 5.

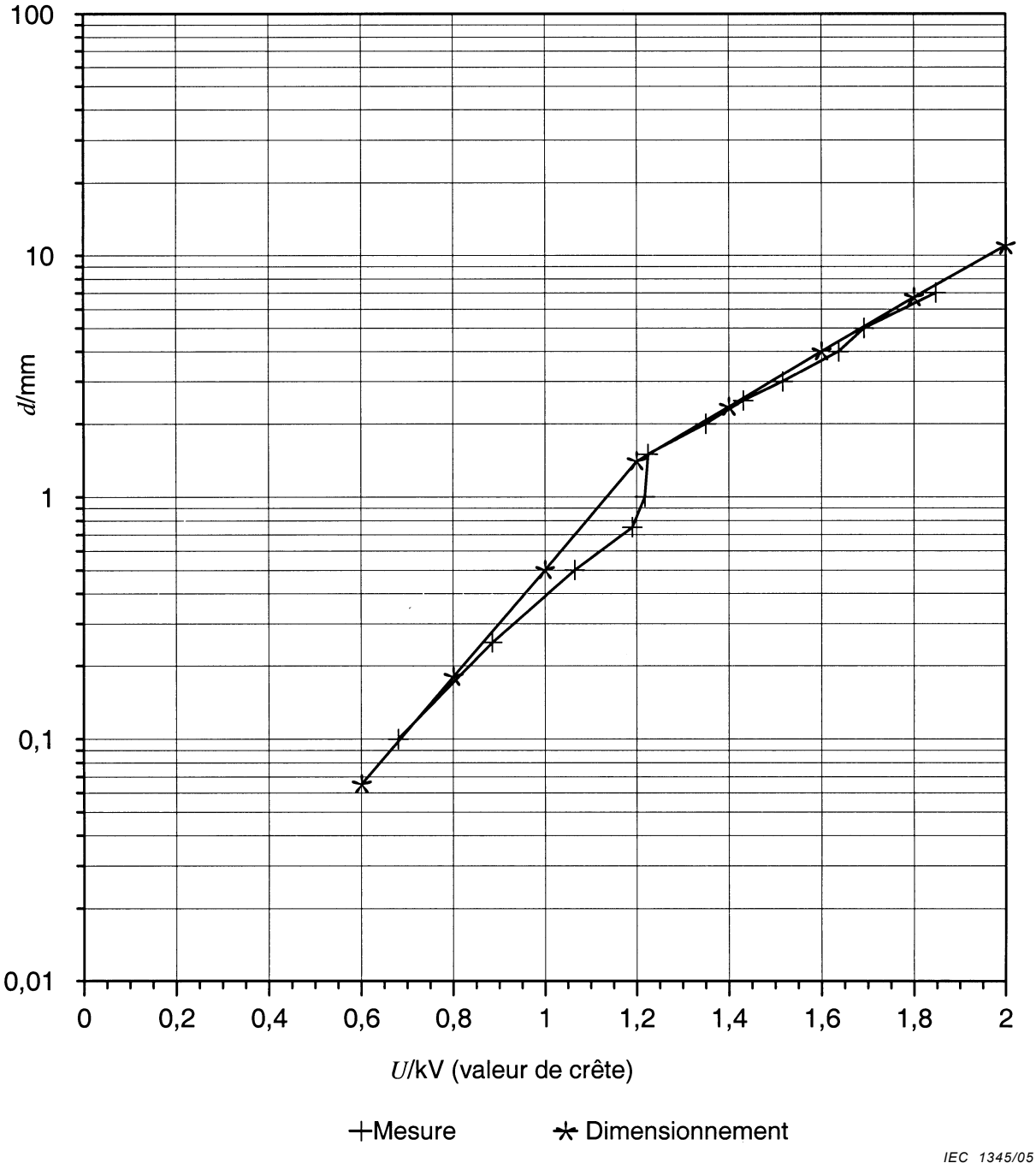
The frequency of the voltage shall be taken into account for dimensioning for frequencies equal to or greater than f_{crit}. As PD can be started by transient overvoltages and shall not be maintained by any steady state voltage (see 4.1.2.4 of Part 1), the PD-extinction voltage shall be used for dimensioning. The relevant data (see the note) is shown in Figure 1 (measurement) together with a limiting curve (dimensioning).

NOTE 1 For dimensioning, data from A.2.2 are applicable, obtained for clearances up to 0,75 mm from the breakdown voltages and above from the PD-extinction voltages at 1 MHz.

The dimensioning data for inhomogeneous fields are summarized in Table 1. These values are applicable if a small radius of curvature of the conductive parts occurs. In practice this condition is fulfilled if the radius of curvature of the conductive parts is smaller than 20 % of the clearance.

NOTE 2 Further information about dimensioning is given in Annex F.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

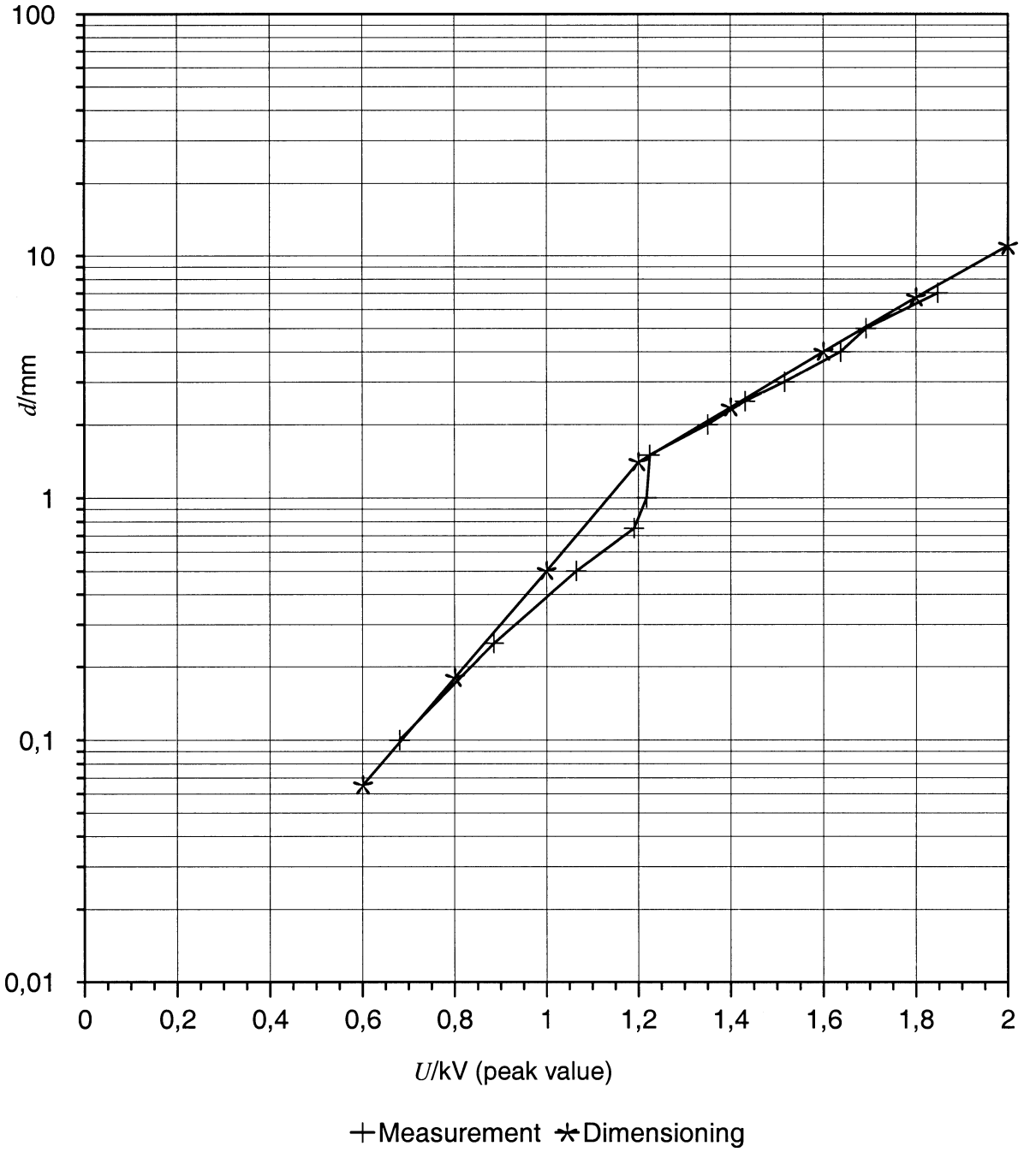


Légende
d distance d'isolement

Figure 1 – Dimensionnement des distances d'isolement dans l'air non homogènes sous pression atmosphérique (électrodes pointe-plan, rayon de 5 µm), afin d'éviter les DP (distance d'isolement ≥ 1 mm) ou le claquage (distance d'isolement < 1 mm)

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale



Key

d clearance

Figure 1 – Dimensioning of inhomogeneous clearances in air at atmospheric pressure (point-plane-electrodes, 5 µm radius) to avoid PD (clearance ≥ 1 mm) or breakdown (clearance < 1 mm)

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Tableau 1 – Valeurs minimales des distances d'isolement dans l'air sous pression atmosphérique pour des conditions de champ non homogène

Tension $U_{\text{crête}}$ kV	Distance d'isolement mm
Inférieure ou égale à 0,6 a) b)	0,065
0,8 a)	0,18
1,0 a)	0,5
1,2 a)	1,4
1,4 a)	2,35
1,6 a)	4,0
1,8 a)	6,7
2,0 a)	11,0

a) Pour des tensions comprises entre les valeurs indiquées dans ce tableau, l'interpolation est autorisée.

b) Aucune donnée n'est disponible pour des tensions $U_{\text{crête}}$ inférieures à 0,6 kV.

5 Lignes de fuite

5.1 Valeurs expérimentales

L'influence de la fréquence sur les tensions de claquage des lignes de fuite est prise en compte, conformément aux données présentées à l'Annexe B.

Les conditions expérimentales pour les investigations réalisées et les matériaux inclus dans les expériences sont décrites à l'Article B.2.

Ces valeurs expérimentales sont présentées à l'Article B.3. Les tensions de DP et les tensions de claquage sont significativement influencées par la fréquence de la tension.

5.2 Dimensionnement des lignes de fuite

Ces données de mesurage pour trois gammes de fréquences différentes jusqu'à 100 kHz, jusqu'à 1 MHz et jusqu'à 3 MHz sont représentées à la Figure 2 (mesure) avec les courbes de limitation (dimensionnement). Les données de dimensionnement pour les lignes de fuite sont synthétisées au Tableau 2. Les données pour les gammes de fréquences supplémentaires ont été obtenues par interpolation linéaire. Ces données sont valables pour le degré de pollution 1.

NOTE 1 Pour le dimensionnement des lignes de fuite, les données de l'Article B.3 pour la tension d'extinction de DP sont applicables, dans la mesure où les DP sous une tension à haute fréquence auront un effet destructeur sur le matériau de base, si cela se produit pendant une durée plus longue.

Les expériences [5][1] ont montré que les lignes de fuite pour les degrés de pollution 2 et 3 peuvent être dérivées des distances déterminées pour le degré de pollution 1 par application d'un facteur de multiplication. Pour le degré de pollution 2, le facteur de multiplication 1,2 est applicable, et pour le degré de pollution 3, le facteur de multiplication 1,4 est applicable.

1 Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Table 1 – Minimum values of clearances in air at atmospheric pressure for inhomogeneous field conditions

Voltage U_{peak} kV	Clearance mm
Up to 0,6 a) b)	0,065
0,8 a)	0,18
1,0 a)	0,5
1,2 a)	1,4
1,4 a)	2,35
1,6 a)	4,0
1,8 a)	6,7
2,0 a)	11,0

a) For voltages between the values stated in this table, interpolation is permitted.

b) No data is available for voltages U_{peak} of less than 0,6 kV.

5 Creepage distances

5.1 Experimental data

The influence of frequency on the breakdown voltages of creepage distances is taken into account according to the data given in Annex B.

The experimental conditions for the investigations being performed and the materials being included in the experiments are described in Clause B.2.

The experimental data are shown in Clause B.3. Both the PD-voltages and the breakdown voltages are significantly influenced by the frequency of the voltage.

5.2 Dimensioning of creepage distances

Measuring data for three different frequency ranges up to 100 kHz, up to 1 MHz and up to 3 MHz are shown in Figure 2 (measurement) together with limiting curves (dimensioning). The dimensioning data for creepage distances are summarized in Table 2. The data for the additional frequency ranges have been obtained by linear interpolation. These data are valid for pollution degree 1.

NOTE 1 For dimensioning of creepage distances the data from Clause B.3 for the PD-extinction voltage are applicable as PD at high-frequency voltage will have a destructive effect on the base material, if it occurs during a longer period of time.

Experiments [5][1] have shown that creepage distances for pollution degree 2 and 3 can be derived from the distances determined for pollution degree 1 by application of a multiplication factor. For pollution degree 2, the multiplication factor 1,2 and for pollution degree 3 the multiplication factor 1,4 are applicable.

[1] Figures in square brackets refer to the bibliography.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Les données présentées au Tableau 2 ne prennent pas en compte l'influence des phénomènes de cheminement. A ce titre, la Partie 1 ou la Partie 5 de la CEI 60664 doit être prise en compte. Par conséquent, si les valeurs du Tableau 2 de la présente norme sont inférieures aux valeurs correspondantes du Tableau 4 de la Partie 1 ou de la Partie 5, ces dernières sont applicables.

Ces données de dimensionnement sont applicables pour tous les matériaux qui peuvent être détériorés par des effets thermiques. Concernant les matériaux pour lesquels une telle détérioration n'est pas susceptible de se produire (par exemple, la céramique), le dimensionnement pour les distances d'isolement conformément à l'Article 4 de la présente norme est suffisant.

NOTE 2 D'autres informations concernant le dimensionnement sont données à l'Annexe F.

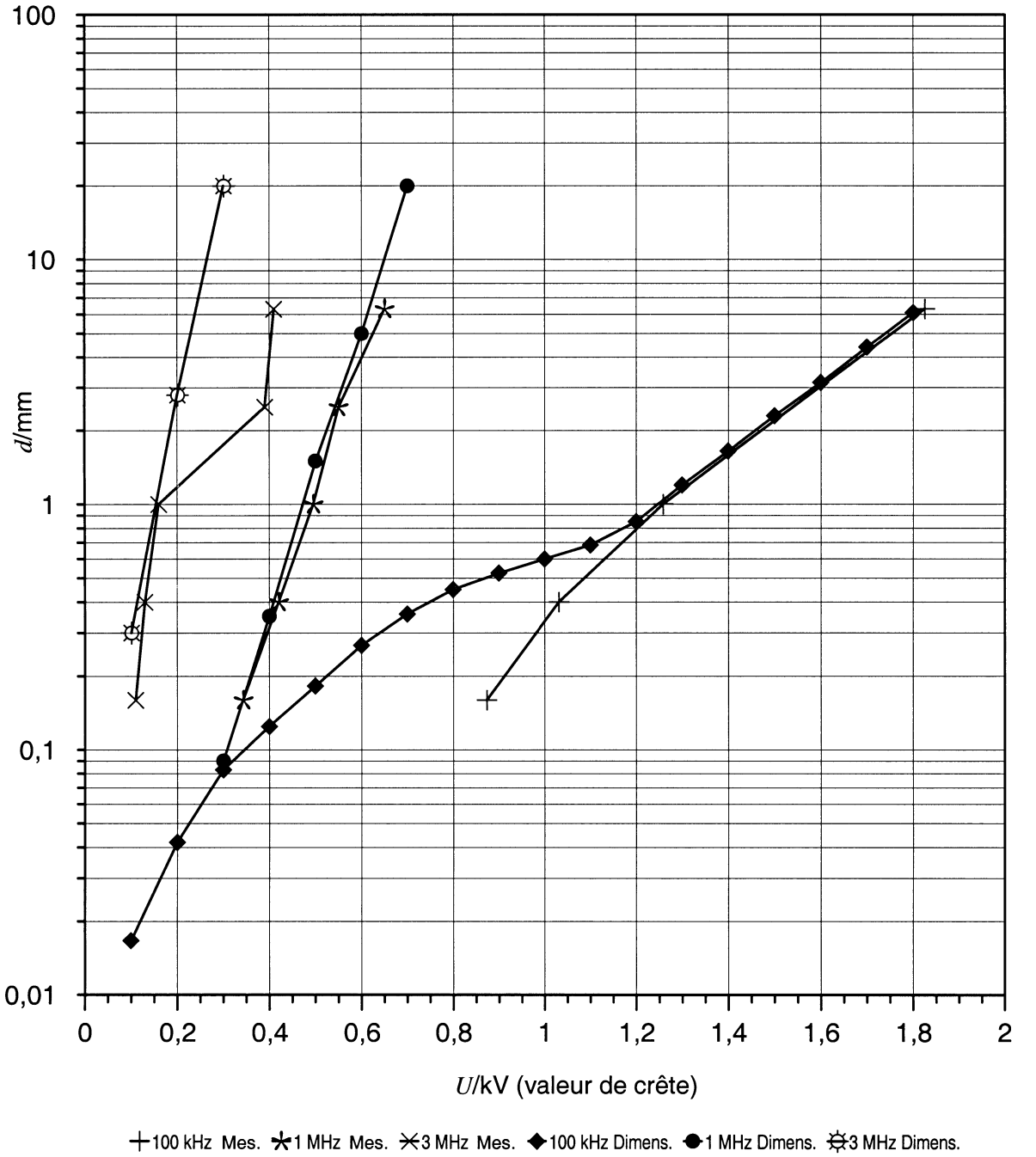
Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

The data given in Table 2 do not take into account the influence of tracking phenomena. For that purpose Part 1 or Part 5 of IEC 60664 have to be taken into account. Therefore if the values from Table 2 of this standard are smaller than the relevant values from Table 4 of Part 1 or Part 5, the latter are applicable.

These dimensioning data are applicable for all materials that can be deteriorated by thermal effects. For materials where such deterioration is not likely to occur (for example ceramics) dimensioning for clearances according to Clause 4 of this standard is sufficient.

NOTE 2 Further information about dimensioning is given in Annex F.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

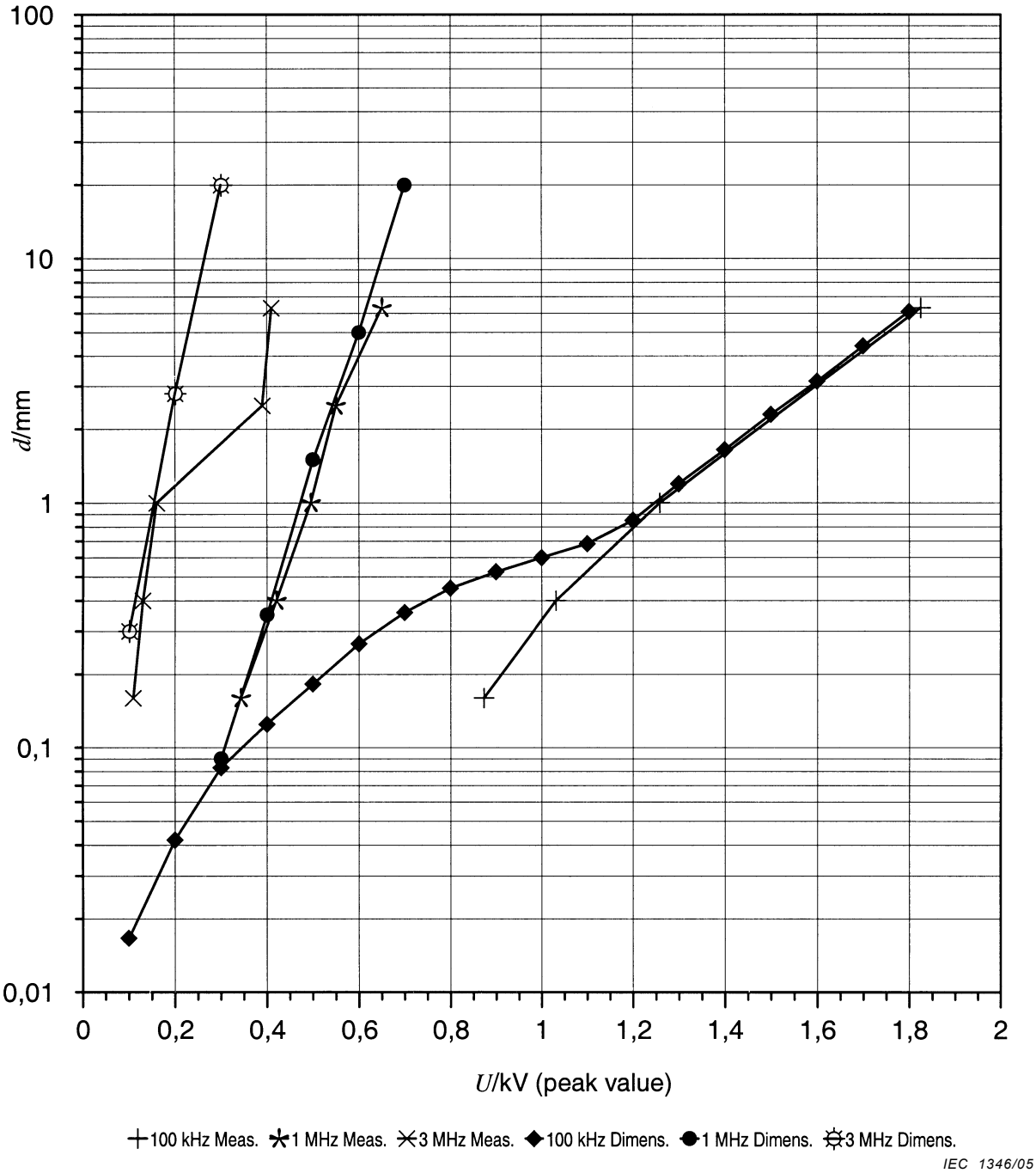


Légende

d ligne de fuite

Figure 2 – Dimensionnement des lignes de fuite pour éviter les décharges partielles (ligne de fuite ≥ 1 mm) ou le claquage (ligne de fuite < 1 mm)

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale



Key
d creepage distance

Figure 2 – Dimensioning of creepage distances to avoid partial discharge (creepage distance ≥ 1 mm) or breakdown (creepage distance < 1 mm)

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Tableau 2 – Valeurs minimales des lignes de fuite pour différentes gammes de fréquences

Tension $U_{crête}$ kV	Ligne de fuite [a] mm						
	pour 30 kHz < f ≤ 100 kHz	pour f ≤ 0,2 MHz[b]	pour f ≤ 0,4 MHz[b]	pour f ≤ 0,7 MHz[b]	pour f ≤ 1 MHz[b]	pour f ≤ 2 MHz[b]	pour f ≤ 3 MHz[b]
0,1	0,0167						0,3
0,2	0,042					0,15	2,8
0,3	0,083	0,09	0,09	0,09	0,09	0,8	20
0,4	0,125	0,13	0,15	0,19	0,35	4,5	
0,5	0,183	0,19	0,25	0,4	1,5	20	
0,6	0,267	0,27	0,4	0,85	5		
0,7	0,358	0,38	0,68	1,9	20		
0,8	0,45	0,55	1,1	3,8			
0,9	0,525	0,82	1,9	8,7			
1	0,6	1,15	3	18			
1,1	0,683	1,7	5				
1,2	0,85	2,4	8,2				
1,3	1,2	3,5					
1,4	1,65	5					
1,5	2,3	7,3					
1,6	3,15						
1,7	4,4						
1,8	6,1						

a) Les valeurs pour les lignes de fuite du tableau s'appliquent pour le degré de pollution 1. Pour le degré de pollution 2, un facteur de multiplication de 1,2 doit être utilisé, et pour le degré de pollution 3, un facteur de multiplication de 1,4 doit être utilisé.

b) L'interpolation entre les colonnes est autorisée.

6 Isolation solide

6.1 Considération générale

Par rapport aux distances d'isolement dans l'air, l'isolation solide peut fournir une intensité du champ électrique au claquage qui est au moins à un niveau de grandeur supérieur. Cependant, en pratique, l'intensité du champ électrique au claquage élevée de l'isolation solide est peu utilisée.

NOTE Les mécanismes responsables de la dégradation puis du claquage à des intensités de champ nettement plus faibles que prévu sont décrits en détail à l'Article C.1.

6.2 Facteurs d'influence

Pour une fréquence de 1 MHz, l'intensité du champ électrique au claquage à court terme peut descendre jusqu'à 10 % de la fréquence industrielle. L'intensité du champ électrique au claquage ne semble pas atteindre une limite plus faible, même à des fréquences aussi élevées que 100 MHz.

NOTE Les caractéristiques de claquage à haute fréquence sont présentées à l'Article C.2.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Table 2 – Minimum values of creepage distances for different frequency ranges

Voltage	Creepage distance [a] mm						
U_{peak} kV	for 30 kHz < f ≤ 100 kHz	for f ≤ 0,2 MHz[b]	for f ≤ 0,4 MHz[b]	for f ≤ 0,7 MHz[b]	for f ≤ 1 MHz[b]	for f ≤ 2 MHz[b]	for f ≤ 3 MHz[b]
0,1	0,0167						0,3
0,2	0,042					0,15	2,8
0,3	0,083	0,09	0,09	0,09	0,09	0,8	20
0,4	0,125	0,13	0,15	0,19	0,35	4,5	
0,5	0,183	0,19	0,25	0,4	1,5	20	
0,6	0,267	0,27	0,4	0,85	5		
0,7	0,358	0,38	0,68	1,9	20		
0,8	0,45	0,55	1,1	3,8			
0,9	0,525	0,82	1,9	8,7			
1	0,6	1,15	3	18			
1,1	0,683	1,7	5				
1,2	0,85	2,4	8,2				
1,3	1,2	3,5					
1,4	1,65	5					
1,5	2,3	7,3					
1,6	3,15						
1,7	4,4						
1,8	6,1						

[a] The values for the creepage distances in the table apply for pollution degree 1. For pollution degree 2 a multiplication factor of 1,2 and for pollution degree 3 a multiplication factor 1,4 shall be used.

[b] Interpolation between columns is allowed.

6 Solid insulation

6.1 General consideration

Compared to clearances in air, solid insulation can provide a breakdown field strength that is at least one order of magnitude higher. However in practical use the high breakdown field strength of solid insulation is of little use.

NOTE The mechanisms that are responsible for degradation and finally breakdown at much lower field strengths than expected are described in detail in Clause C.1.

6.2 Influencing factors

For a frequency of 1 MHz, the short-time breakdown field strength can be as low as 10 % of the power-frequency value. The breakdown field strength does not seem to reach a lower limit even at frequencies as high as 100 MHz.

NOTE High-frequency breakdown characteristics are shown in Clause C.2.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

En général, et particulièrement pour les tensions à haute fréquence, la rigidité diélectrique de l'isolation solide peut être davantage réduite par l'influence de l'humidité et de la température. Cette influence est prise en compte par conditionnement avant les essais, conformément à 7.3.

Conformément à ces caractéristiques, l'isolation solide, qui est destinée à être utilisée dans des applications à haute fréquence, ne doit pas être exposée pour une longue durée à des conditions d'humidité supérieures à 92 % d'humidité relative. Certains matériaux, par exemple le verre et certaines céramiques, ne sont pas influencés par l'humidité, et ne sont par conséquent pas restreints par cette limite de 92 %.

L'intensité du champ électrique au claquage de l'isolation solide est fonction de l'épaisseur du matériau. Les films de très faible épaisseur peuvent présenter des intensités du champ électrique au claquage qui peuvent atteindre un niveau de grandeur supérieur à celles des éprouvettes de 0,75 mm d'épaisseur. Ainsi, tout dimensionnement conformément à l'épaisseur de l'isolation solide doit prendre en compte cette dépendance de l'intensité du champ électrique au claquage sur l'épaisseur de l'isolation.

L'influence de la température sur la tension de claquage peut être vue à l'Article C.2. Par conséquent, la température est un facteur d'influence important, qui doit être pris en compte pour le dimensionnement et les essais.

Les décharges partielles sous des tensions à haute fréquence auront une fréquence de répétition des impulsions de DP élevée, correspondant à la fréquence de la tension. C'est pourquoi aucune durée de vie raisonnable d'isolation solide ne peut être définie quand apparaissent des décharges partielles.

6.3 Dimensionnement de l'isolation solide

La méthode suivante de dimensionnement peut être utilisée au lieu des essais à haute fréquence, conformément à l'Article 7. Elle s'applique pour une fréquence maximale de la tension de 10 MHz, si l'intensité de champ est approximativement uniforme, ne dépassant pas les valeurs spécifiées conformément à l'Equation (3) ou à la Figure 3 respectivement, et s'il n'y a pas de soufflures ni d'entrefers entre l'isolation solide. Si ces conditions ne peuvent pas être satisfaites, des essais à haute fréquence conformément à l'Article 7 sont nécessaires.

Le dimensionnement peut être utilisé si le champ électrique est approximativement uniforme (voir la note). Pour des couches épaisses d'isolation solide de $d_1 \geq 0{,}75$ mm, la valeur de crête de l'intensité de champ E doit être inférieure ou égale à 2 kV/mm. Pour des couches fines d'isolation solide de $d_2 \leq 30$ µm, la valeur de crête de l'intensité de champ doit être inférieure ou égale à 10 kV/mm. Pour $d_1 > d > d_2$, l'Equation (3) doit être utilisée pour l'interpolation pour une certaine épaisseur d (voir également la Figure 3):

$$E = \left(\frac{0{,}25}{d} + 1{,}667 \right) \frac{\text{kV}}{\text{mm}} \qquad (3)$$

NOTE Dans ce contexte, le champ électrique est considéré comme étant approximativement uniforme, si les écarts sont inférieurs à ±20 % par rapport à la valeur moyenne de l'intensité de champ.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

The dielectric strength of solid insulation in general, and especially at high-frequency voltage, can be further reduced by the influence of humidity and temperature. This influence is taken into account by conditioning before testing according to 7.3.

According to these characteristics solid insulation, which is intended for use in high-frequency applications, shall not be exposed for long period of time to humidity conditions higher than 92 % of relative humidity. Some materials e. g. glass and some ceramics are not influenced by humidity and therefore are not restricted by this limit of 92 %.

The breakdown field strength of solid insulation is a function of the thickness of the material. Very thin films can have a breakdown field strength that can be up to one order of magnitude higher than that of the test specimen with 0,75 mm thickness. So any dimensioning according to thickness of solid insulation shall take into account this dependency of the breakdown field strength upon the thickness of the insulation.

The influence of the temperature on the breakdown voltage can be seen in Clause C.2. Therefore the temperature is an important influencing factor, which shall be taken into account for dimensioning and testing.

Partial discharges at high-frequency voltages will have a high PD-impulse repetition frequency corresponding to the frequency of the voltage. Therefore no reasonable lifetime of solid insulation can be expected when partial discharges occur.

6.3 Dimensioning of solid insulation

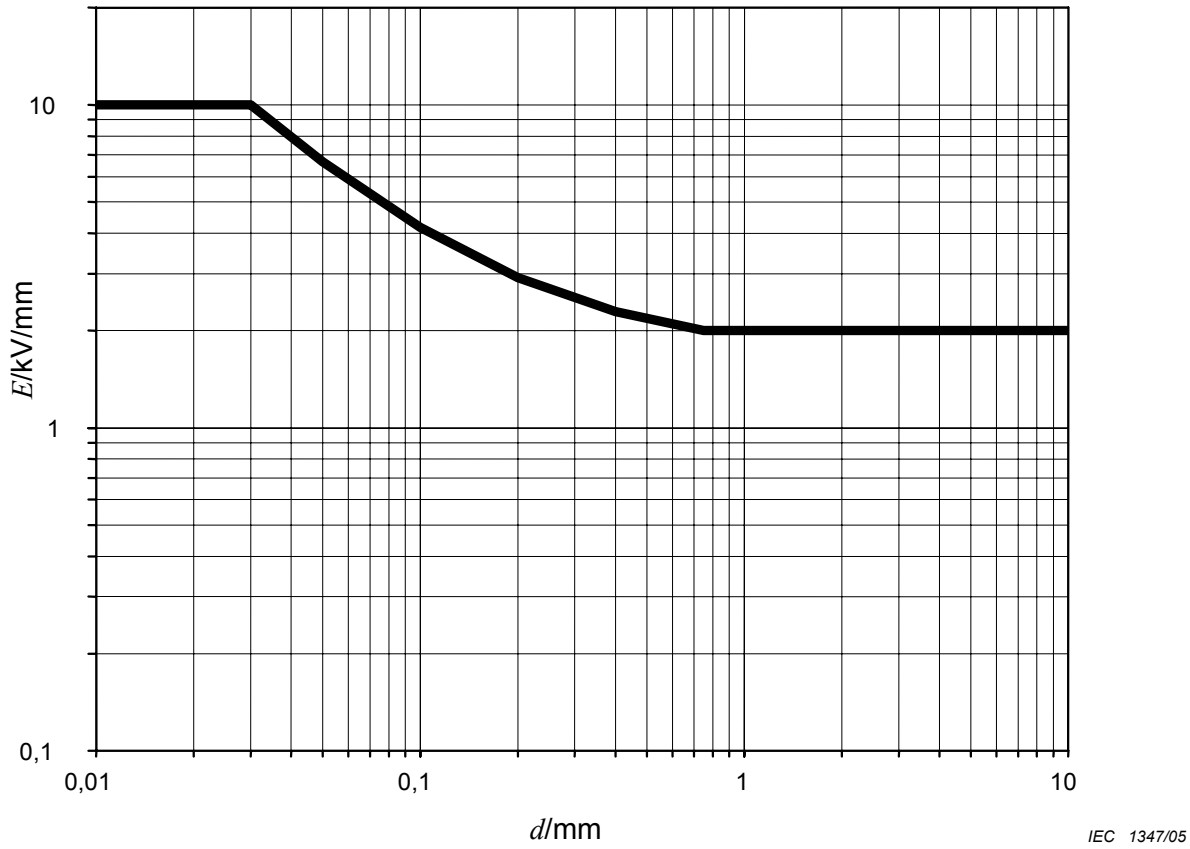
The following method of dimensioning can be used instead of high-frequency testing according to Clause 7. It applies for a maximum frequency of the voltage 10 MHz, if the field strength is approximately uniform, not exceeding the specified values according to Equation (3) or Figure 3 respectively and no voids or air gaps are present in between the solid insulation. If these conditions cannot be fulfilled, high-frequency testing according to Clause 7 is required.

Dimensioning can be used if the electric field is approximately uniform (see the note). For thick layers of solid insulation of $d_1 \geq 0{,}75$ mm the peak value of the field strength E shall be equal or less than 2 kV/mm. For thin layers of solid insulation of $d_2 \leq 30$ µm the peak value of the field strength shall be equal or less than 10 kV/mm. For $d_1 > d > d_2$ Equation (3) shall be used for interpolation for a certain thickness d (see also Figure 3):

$$E = \left(\frac{0{,}25}{d} + 1{,}667 \right) \frac{\text{kV}}{\text{mm}} \qquad (3)$$

NOTE In this context, the electric field is considered to be approximately uniform if the deviations are less than ±20 % from the average value of the field strength.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale



Légende
E intensité de champ

Figure 3 – Intensité de champ admissible pour le dimensionnement de l'isolation solide conformément à l'Equation (3)

L'utilisation de l'intensité de champ pour le dimensionnement de l'isolation solide nécessite une distribution de champ approximativement uniforme avec aucune soufflure ni aucun entrefer entre. Si l'intensité de champ ne peut pas être calculée (parce que le champ n'est pas uniforme), ou si la valeur de crête est supérieure à celle donnée à partir de l'Equation (3) ou de la Figure 3 respectivement, ou si la présence de soufflures ou d'entrefers ne peut pas être exclue, ou pour des fréquences supérieures à 10 MHz, un essai de tenue ou un essai de DP avec une tension à haute fréquence est nécessaire. La première condition s'applique à des contraintes à court terme, la deuxième à des contraintes à long terme, conformément à 3.3.3.2.2 de la Partie 1.

7 Essais à haute fréquence

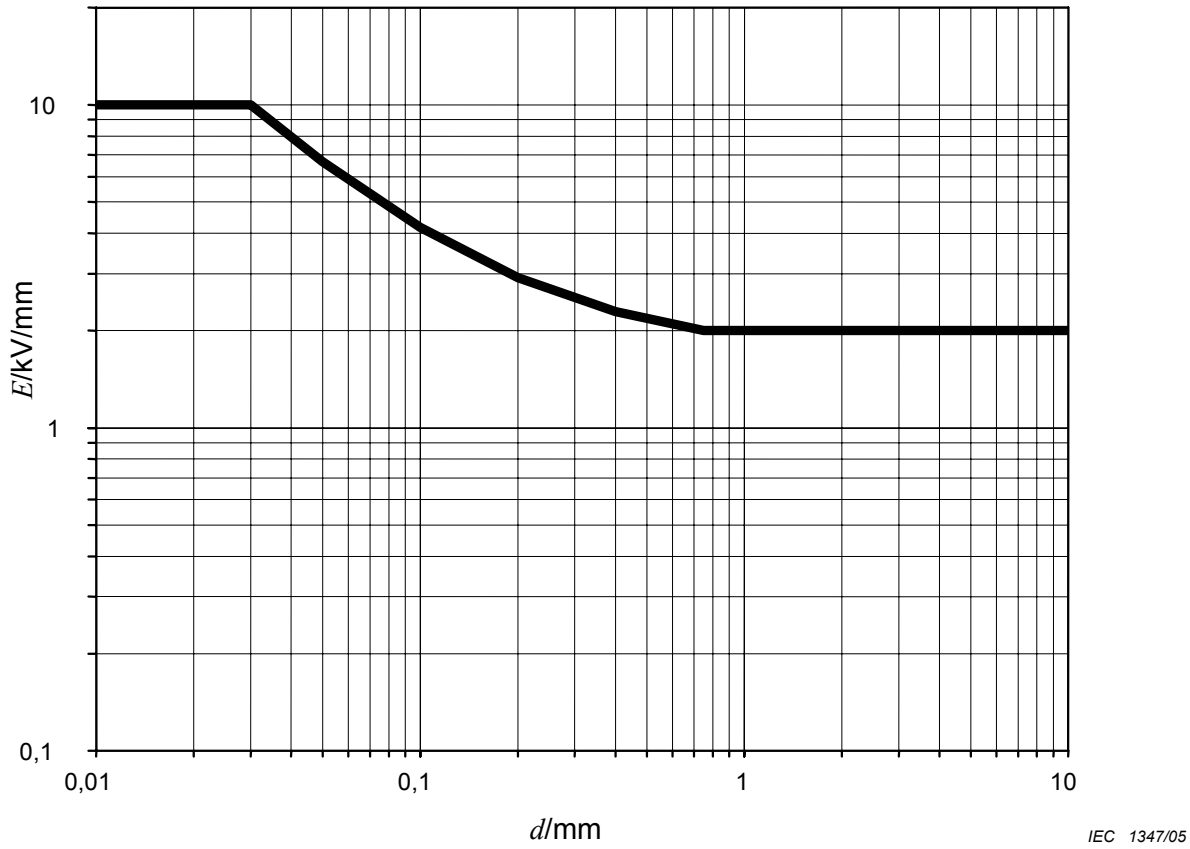
7.1 Exigences fondamentales

Les essais suivants sont effectués à la fréquence de la tension appliquée:

– vérification de la rigidité diélectrique à court terme pour les distances d'isolement et pour l'isolation solide par un essai sous tension alternative à haute fréquence;

– vérification qu'aucune décharge partielle ne se produise dans des conditions normales de service d'application de tension à haute fréquence.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale



Key
E field strength

Figure 3 – Permissible field strength for dimensioning of solid insulation according to Equation (3)

The use of the field strength for dimensioning of solid insulation requires an approximately uniform field distribution with no voids or air gaps in between. If the field strength cannot be calculated (because the field is not uniform) or if the peak value is higher than given from Equation (3) or Figure 3 respectively or if the presence of voids or air gaps cannot be excluded or for higher frequencies than 10 MHz, a withstand test or a PD-test with high-frequency voltage is required. The first applies to short time stresses the second applies to long time stresses according to 3.3.3.2.2 of Part 1.

7 High-frequency testing

7.1 Basic requirements

The following tests are conducted at the frequency of the applied voltage:

– verification of the short-time dielectric strength for clearances and for solid insulation through use of a high-frequency a.c. voltage test;

– verification that no partial discharges occur under steady-state conditions of high-frequency voltage application.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

En raison de la charge capacitive élevée à haute fréquence, les essais à haute fréquence sont principalement applicables aux composants et aux sous-ensembles. Si un essai à haute tension supplémentaire sur des matériels complets est nécessaire, cet essai peut être effectué conformément à 4.1.2 de la Partie 1 sous la tension à fréquence industrielle.

7.2 Source de tension d'essai

Les sources de tension d'essai sont données à l'Article D.1.

7.3 Conditionnement

Sauf spécification contraire par les comités d'études, les essais doivent être effectués avec une nouvelle éprouvette. Le conditionnement de l'éprouvette à température et humidité élevées est destiné à

– reproduire les conditions les plus sévères en fonctionnement normal,
– mettre en évidence les faiblesses éventuelles qui ne sont pas présentes dans les nouvelles conditions.

Les méthodes de conditionnement décrites en 4.1.2.1 de la Partie 1 s'appliquent également pour les essais à haute fréquence.

7.4 Essai de claquage à haute fréquence

Cet essai est semblable à l'essai à haute tension à fréquence industrielle (voir 4.1.2.3 de la Partie 1).

7.4.1 Méthode d'essai

La capacité de tenue à haute fréquence est largement influencée par la température des matériels et les conditions d'environnement. L'essai doit par conséquent être réalisé dans les conditions les plus difficiles telles qu'elles peuvent exister en service, comprenant l'élévation de la température due au fonctionnement normal du matériel. La durée de l'essai est de 1 min.

7.4.2 Résultat d'essai

Il ne doit se produire aucun claquage au cours de l'essai. Après l'essai, aucun dommage visible (combustion, fusion, etc.) ne doit se produire.

7.5 Essai de décharges partielles à haute fréquence

7.5.1 Considérations générales

Les méthodes générales pour les essais de décharges partielles sont décrites dans la CEI 60270. Pour les essais de DP des matériels à basse tension, 4.1.2.4 de la Partie 1 et l'Annexe C de la Partie 1 sont applicables, mais pour un essai avec une tension à haute fréquence, des modifications sont requises dans le matériel d'essai et dans les méthodes qui sont spécifiées dans la présente norme.

Afin de minimiser le risque de dégradation de l'échantillon d'essai, il convient de réaliser un essai de DP avec des procédures et des mesures précises et avec des tensions d'essai comprises dans la gamme de la tension de seuil de DP. Pour le critère de défaillance, de faibles niveaux de DP doivent être spécifiés, normalement en dessous de 10 pC. Dans la mesure où la tension d'extinction de DP spécifiée peut être déterminée avec une précision limitée et est influencée par des paramètres supplémentaires tels que la température et l'humidité, qui ne sont habituellement pas pris en compte au cours des essais, la tension

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Due to the large capacitive load at high-frequency, high-frequency testing is primarily applicable to components and subassemblies. If an additional high-voltage test on complete equipment is required, this test can be performed according to 4.1.2 of Part 1 with power-frequency voltage.

7.2 Test voltage source

Test voltage sources are given in Clause D.1.

7.3 Conditioning

If not otherwise specified by technical committees, the test shall be performed with a new test specimen. Conditioning of the specimen by temperature and humidity treatment is intended to

– represent the most severe normal service conditions,
– expose possible weaknesses that are not present in the new condition.

The conditioning methods described in 4.1.2.1 of Part 1 also apply for high-frequency testing.

7.4 High-frequency breakdown test

This test is similar to the high-voltage test at power-frequency (see 4.1.2.3 of Part 1).

7.4.1 Test method

High-frequency withstand capability is influenced by equipment temperature and environmental conditions. Therefore the test shall be performed under the most severe conditions that can be encountered in service, including the temperature rise caused by normal operation of the equipment. The test duration is 1 min.

7.4.2 Test result

No breakdown shall occur during the test duration. After the test, no visible damage (burning, melting etc.) shall occur.

7.5 High-frequency partial discharge test

7.5.1 General considerations

The general methods for partial discharge testing are described in IEC 60270. For PD-testing of low-voltage equipment 4.1.2.4 of Part 1 and Annex C of Part 1 are applicable, but for a test with high-frequency voltage changes are required in the test equipment and methods that are specified in this standard.

In order to minimize the risk of test sample degradation, a PD-testing should be performed with precise procedures and measurements and with test voltages in the range of the PD-inception voltage. For the failure criterion, low PD-levels have to be specified, normally below 10 pC. As the specified PD-extinction voltage can be determined with limited accuracy and is influenced by additional parameters such as temperature and humidity which are not usually

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

d'extinction de DP doit comprendre un facteur de sécurité de F_1 = 1,2 fois les tensions de crête périodiques les plus élevées (voir 4.1.2.4 de la Partie 1). Pour ce qui concerne l'isolation renforcée, il est nécessaire de déterminer un facteur de risque plus rigoureux, et un facteur supplémentaire de sécurité de F_3 = 1,25 est nécessaire pour la tension d'extinction de DP (voir 4.1.2.4 de la Partie 1).

L'essai de DP est essentiellement un essai de composant, mais les essais du matériel sont également possibles. Dans ce cas, la localisation de la source de DP peut être difficile, et l'amplitude de DP mesurée sera fonction de la position dans l'appareil. Au cours des essais de type, l'essai de DP vérifiera la bonne conception du système d'isolation, la sélection appropriée des matériaux d'isolation, et les processus de fabrication corrects. De tels essais sont également très utiles pendant la conception du matériel. En réalisant des essais d'échantillonnage et des essais individuels de série, l'ensemble du processus de fabrication peut être vérifié, celui-ci étant d'une importance capitale pour l'assurance de la qualité.

En raison de la tension d'essai à haute fréquence, une protection de bonne qualité du système d'essai par des enveloppes conductrices est nécessaire afin d'éviter les interférences avec d'autres systèmes électroniques situés à proximité. De telles mesures de protection sont généralement suffisantes pour satisfaire au niveau d'interférences requis au cours des mesures de DP.

7.5.2 Méthode d'essai

En raison du risque élevé de détérioration de l'éprouvette sous des tensions à haute fréquence, il convient que le taux d'augmentation de la tension soit aussi élevé que possible, sans provoquer de claquage de la tension d'essai. En général, le niveau de bruit pendant les essais de décharges partielles à haute fréquence sera significativement plus élevé que celui apparaissant pendant les essais à la fréquence industrielle.

7.5.3 Matériel d'essai

La mesure des décharges partielles sous des tensions à haute fréquence est plus difficile, parce que la tension d'essai et le signal de décharges partielles peuvent avoir des spectres de fréquence de recouvrement qui nécessitent des méthodes appropriées de séparation (filtrage). Dans la mesure où la fréquence de la tension d'essai peut varier sur une large gamme, des filtres coupe-bande à bande étroite accordés seront nécessaires. La fréquence centrale de ces filtres doit être accordée par rapport à la fréquence de la tension d'essai. Il est bien plus difficile de séparer le signal des sources de tension d'essai non sinusoïdales du signal de DP; par conséquent, de tels essais ne sont pas recommandés dans le domaine d'application de la présente norme. Pour mesurer l'intensité de DP, un oscilloscope à mémoire numérique est utilisé en combinaison avec un filtre coupe-bande, afin de supprimer la tension d'essai à haute fréquence.

Des exemples de circuits d'essai de décharges partielles avec une tension à haute fréquence sont présentés à l'Article D.2. La détection de décharges partielles est réalisée par intégration numérique avec un oscilloscope à mémoire numérique à haut taux d'échantillonnage.

7.5.4 Circuit d'essai

La mesure des DP est réalisée par la détection du courant de DP. A cet effet, une impédance de mesurage R_m est connectée en série avec l'éprouvette. La chute de tension à travers cette impédance est appliquée avec un filtre coupe-bande à un canal d'un oscilloscope à mémoire numérique avec une bande passante élevée (au moins 100 MHz), de telle sorte qu'avec le circuit d'essai se composant de constantes discrètes, une bande passante totale de 60 MHz puisse être obtenue. Le filtre coupe-bande élimine la chute de tension provoquée par le courant capacitif alimentant l'éprouvette. Par l'intermédiaire de cette technique, une sensibilité de DP de 5 pC peut être obtenue.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

taken into account during testing, the PD-extinction voltage must include a safety factor of F_1 = 1,2 times the highest periodic peak voltages (see 4.1.2.4 of Part 1). For reinforced insulation a more stringent risk assessment is necessary and an additional safety factor of F_3 = 1,25 is required for the PD-extinction voltage (see 4.1.2.4 of Part 1).

The PD-test is primarily a component test, but testing of equipment is also possible. In that case localizing the PD-source can be difficult and the measured PD-magnitude will be a function of position within the apparatus. During type testing, the PD-test will verify the proper design of the insulation system, the appropriate selection of the insulation materials, and proper manufacturing processes. Such tests are also very useful during equipment design. By performing sampling and routine testing, the entire manufacturing process can be verified, which is of fundamental importance for quality insurance.

Due to the high-frequency test voltage, careful screening of the test system by conductive enclosures is required to avoid interfering with other electronics in the vicinity. Such screening measures are generally sufficient to meet the required interference level during PD-measurements.

7.5.2 Test method

Due to the high risk of deterioration of the test specimen at high-frequency voltage, the rate of voltage rise should be as high as possible without causing overshoot of the test voltage. In general, the noise level during high-frequency partial discharge testing will be significantly higher than during power frequency testing.

7.5.3 Test equipment

The measurement of partial discharges at high-frequency voltage is more difficult because the test voltage and the partial discharge signal can have overlapping frequency spectra which require appropriate methods of separation (filtering). As the frequency of the test voltage can vary over a wide range, tuned notch filters will be necessary. The centre frequency of these filters shall be tuned to the frequency of the test voltage. It is much more difficult to separate the signal of non-sinusoidal test voltage sources from the PD-signal; therefore such tests are not recommended within the scope of this standard. For measuring the PD-intensity, a digital storage oscilloscope is used in combination with a band-stop filter in order to suppress the high-frequency test voltage.

Examples of partial discharge test circuits with high-frequency voltage are shown in Clause D.2. The partial discharge detection is performed by digital integration with a digital storage oscilloscope of high sampling rate.

7.5.4 Test circuit

The PD-measurement is performed through detection of the PD-current. For this purpose, a measuring impedance R_m is connected in series with the test specimen. The voltage drop across this impedance is applied across a band-stop filter to one channel of a digital storage oscilloscope with high bandwidth (at least 100 MHz) so that together with the test circuit consisting of lumped elements, a total bandwidth of 60 MHz can be obtained. The band-stop filter removes the voltage drop caused by the capacitive current feeding the test specimen. By this technique a PD-sensitivity of 5 pC can be obtained.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

La tension d'essai à haute fréquence est mesurée avec un voltmètre à haute fréquence et la forme d'onde est surveillée sur le deuxième canal de l'oscilloscope à mémoire numérique. Pour obtenir des précisions supplémentaires sur le circuit d'essai, voir D.2.2.

7.5.5 Bande passante requise du circuit d'essai

Dans l'évaluation suivante, le circuit d'essai a une caractéristique de transfert passe-bas de 1er ordre (caractéristique PT_1), entraînant une fréquence de coupure inférieure de zéro et une fréquence de coupure supérieure (3 dB) f_c égale à la bande passante.

Les considérations concernant l'effet de points de résonance potentiels ou la fréquence de coupure inférieure du circuit d'essai sont décrites en D.2.2.

7.5.5.1 Bande passante minimale pour la résolution des impulsions de DP

Pour les tensions d'essai à haute fréquence, il faut qu'une fréquence de répétition à impulsions élevées des impulsions de DP soit attendue. Par conséquent, il faut que la résolution des impulsions de DP soit suffisante pour éviter des impulsions de recouvrement. Pour cette raison, seuls des matériels de mesurage dits « à large bande » peuvent être utilisés. Cela est en contraste avec les recommandations données dans la Partie 1 pour les essais sous une tension à fréquence industrielle.

La bande passante minimale du circuit de mesurage de DP doit être supérieure ou égale à la fréquence d'impulsion de DP, afin d'éviter les impulsions de recouvrement. Il s'agit d'une exigence minimale absolue qui ne fournit pas une reproduction de la forme d'onde d'impulsion de DP.

Une fréquence de coupure supérieure du circuit d'essai f_c représentant cinq fois la fréquence d'impulsion de DP est généralement suffisante; pour plus de précisions, voir D.2.2.2.1.

7.5.5.2 Bande passante minimale pour l'analyse des impulsions de DP

Afin d'analyser la source du signal de DP et d'effectuer une analyse de la forme et de la taille des soufflures qui sont à l'origine des DP, des bandes passantes bien plus grandes sont nécessaires. Pour davantage de précisions, voir D.2.2.2.2.

7.5.6 Dimensionnement du circuit d'essai

Un dimensionnement adéquat doit éviter le recouvrement des impulsions de DP, et il convient qu'il permette une analyse de la forme d'onde des impulsions de DP. Ce dimensionnement nécessite une analyse du circuit d'essai, qui est réalisée en D.2.2.

7.5.6.1 Influence du circuit d'essai sur les caractéristiques de transfert

Pour une reproduction adéquate des impulsions de DP, une réponse approximativement apériodique du circuit d'essai est nécessaire, et il convient que la fréquence de coupure supérieure f_c soit aussi élevée que possible. Les détails sont décrits en D.2.2.3.3.1.

Afin d'obtenir une réponse apériodique du circuit d'essai, l'inductance L, qui est la somme de celle du câblage L_W et du condensateur de couplage L_{Ck}:

$$L = L_W + L_{Ck} \tag{4}$$

doit être limitée à:

$$L \leq \frac{R_m^{\,2}\, C}{4} \tag{5}$$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

The high-frequency test voltage is measured with a high-frequency voltmeter and the waveshape is monitored on the second channel of the digital storage oscilloscope. For further details of the test circuit see D.2.2.

7.5.5 Required bandwidth of the test circuit

In the following evaluation, the test circuit has a 1st order low-pass transfer characteristic (PT_1-characteristic) resulting in a lower cut-off frequency of zero and an upper cut-off frequency (3 dB) f_c that is equal to the bandwidth.

Considerations with respect to the effect of possible resonance points or the lower cut-off frequency of the test circuit are described in D.2.2.

7.5.5.1 Minimum bandwidth for PD-impulse resolution

For high-frequency test voltages, a high pulse repetition frequency of PD-impulses must be expected. Therefore the PD-impulse resolution must be sufficient to avoid overlapping pulses. For that reason, only so called „wide-band“ measuring equipment can be used. This is in contrast to the recommendations given in Part 1 for tests at power-frequency voltage.

The minimum bandwidth of the PD measuring circuit shall be equal to or greater than the PD-impulse frequency in order to avoid overlapping pulses. This is an absolute minimum requirement that does not provide a reproduction of the PD-pulse waveshape.

An upper test circuit cut-off frequency f_c of five times the PD-impulse frequency is usually sufficient, for details see D.2.2.2.1.

7.5.5.2 Minimum bandwidth for PD-impulse analysis

In order to analyse the source of the PD-signal and to make some analysis of the shape and size of the voids that are the origin of PD, much greater bandwidths are required. For further details see D.2.2.2.2.

7.5.6 Dimensioning of the test circuit

Proper dimensioning shall avoid overlap of PD-impulses and should allow some analysis of the PD-impulse waveshape. This dimensioning requires some analysis of the test circuit, which is performed in D.2.2.

7.5.6.1 Influence of the test circuit on the transfer characteristics

For adequate reproduction of the PD-impulses approximately aperiodic response of the test-circuit is required, and the upper cut-off frequency f_c should be as high as possible. Details are described in D.2.2.3.3.1.

To obtain aperiodic response of the test-circuit, the inductance L, which is the sum of that of the wiring L_W and the coupling capacitor L_{Ck}:

$$L = L_W + L_{Ck} \tag{4}$$

shall be limited to:

$$L \leq \frac{R_m^2 C}{4} \tag{5}$$

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

R_m étant l'impédance de mesurage pour le courant de DP. La capacité effective C est

$$C = \frac{C_3\, C_k}{C_3 + C_k} \tag{6}$$

avec la capacité de l'éprouvette C_3.

Dans ce cas, la fréquence de coupure supérieure f_c peut être approchée en supposant un circuit RC simple:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\, R_m\, C} \tag{7}$$

La fréquence de coupure inférieure est de zéro.

7.5.6.2 Influence du condensateur de couplage sur les caractéristiques de transfert

L'influence de la taille du condensateur de couplage C_k sur les caractéristiques de transfert du circuit d'essai est évaluée en D.2.2.3.4 [5], qui montre clairement que cette influence est très forte et que les petits condensateurs de couplage par rapport à la capacité de l'éprouvette C_3 ne sont pas appropriés.

De petits condensateurs de couplage réduiront le signal de mesurage, qui est pris en compte par étalonnage. Cependant, la sensibilité du circuit d'essai de DP sera également réduite. L'autre problème est la différenciation du signal de mesurage en utilisant de petits condensateurs de couplage. D'après D.2.2.3.4, on peut se rendre compte que la capacité minimale est $C_k = C_3$. Si possible, il convient que la capacité soit $C_k \geq 10 \times C_3$.

La valeur nécessaire pour la capacité de couplage est la plus élevée de cette valeur et la capacité qui est nécessaire pour la réponse apériodique du circuit d'essai (voir 7.5.6.1, Equation (5)).

7.6 Exemples des résultats d'essai

De nombreux composants pour le matériel à basse tension ont été soumis aux essais à l'aide d'une tension d'essai à haute fréquence. La plupart des données sont des données propriétaires. Certains résultats généraux sont présentés à l'Article D.3.

8 Tensions non sinusoïdales

8.1 Considérations générales

La présente norme traite de l'influence des tensions sinusoïdales à haute fréquence sur le dimensionnement et les essais de l'isolation. Dans de nombreux cas pratiques, la contrainte de tension réelle est loin d'être sinusoïdale. Des impulsions périodiques avec des formes d'ondes variant fortement peuvent être trouvées dans de nombreuses applications.

Dans ce cas, une analyse harmonique de la forme d'impulsion est nécessaire, et les fréquences sinusoïdales correspondantes doivent être identifiées.

La considération suivante ne prend pas en compte l'effet de la forme d'onde de tension sur la distribution de tension à travers l'isolation des enroulements.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

with R_m the measuring impedance for the PD-current. The effective capacitance C is

$$C = \frac{C_3\, C_k}{C_3 + C_k} \tag{6}$$

with the capacitance of the test specimen C_3.

In that case the upper cut-off frequency f_c can be approximated by assuming a simple RC-circuit:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\, R_m\, C} \tag{7}$$

The lower cut-off frequency is zero.

7.5.6.2 Influence of the coupling capacitor on the transfer characteristics

The influence of the size of the coupling capacitor C_k on the transfer characteristics of the test circuit is evaluated in D.2.2.3.4 [5], which shows clearly that this influence is very strong and that small coupling capacitors compared to the capacitance of the test specimen C_3 are not appropriate.

Small coupling capacitors will reduce the measuring signal, which is taken into account by calibration. However the sensitivity of the PD-test circuit will also be reduced. The other problem is the differentiation of the measuring signal when using small coupling capacitors. From D.2.2.3.4, it can be seen that the minimum capacitance is $C_k = C_3$. If possible the capacitance should be $C_k \geq 10 \times C_3$.

The necessary value for the coupling capacitance is the greater of this value and the capacitance that is required for aperiodic response of the test circuit (see 7.5.6.1, Equation (5)).

7.6 Examples of test results

Many components for low-voltage equipment have been tested using high-frequency test voltage. Most of the data are proprietary. Some general results are shown in Clause D.3.

8 Non sinusoidal voltages

8.1 General considerations

This standard addresses the influence of sinusoidal high-frequency voltages on the dimensioning and testing of insulation. In many practical cases, the actual voltage stress is far from being sinusoidal. Periodic pulses with greatly varying waveshapes can be found in many applications.

In this case, a harmonic analysis of the impulse shape is required, and the relevant sinusoidal frequencies have to be identified.

The following consideration does not take into account the effect of the voltage waveshape on the voltage distribution across the insulation of windings.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

8.2 Tension de chocs périodique

Un exemple d'une telle forme d'onde de tension est donné à la Figure 4.

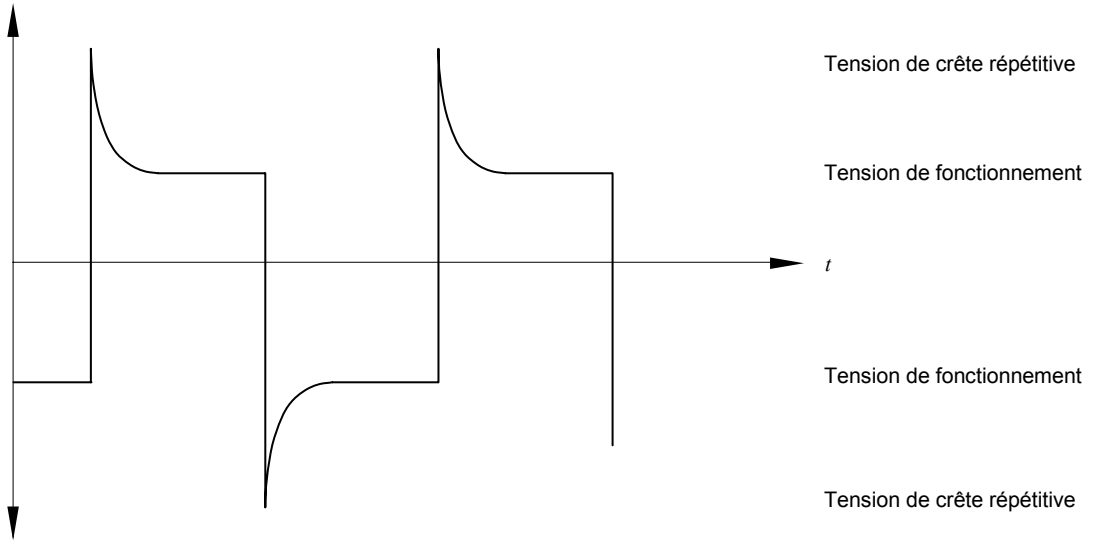


Figure 4 – Tension de chocs périodique (voir Partie 1)

8.3 Analyse harmonique

L'analyse harmonique des tensions de chocs périodiques avec différentes formes d'ondes est effectuée à l'Article E.2. Dans tous les cas, le spectre est dominé par l'onde fondamentale. La relation entre la fondamentale et la 3ème harmonique plus importante n'est pas beaucoup modifiée par le claquage considéré. Cela est également vrai si une forte oscillation est superposée.

Il semble par conséquent possible de concevoir et de soumettre aux essais des distances d'isolement, des lignes de fuite et de l'isolation solide pour la fréquence fondamentale de la tension de chocs. La valeur de crête de la tension non sinusoïdale est ainsi prise en compte en ajustant l'amplitude de l'onde fondamentale à cette valeur de crête.

8.4 Procédure de dimensionnement et essais

Pour le dimensionnement des distances d'isolement, la valeur de crête de la tension non sinusoïdale et la fréquence de répétition des crêtes de tensions sont pertinentes. La distance d'isolement doit être conçue pour une tension sinusoïdale pour la même valeur de crête et la même fréquence. Si les crêtes positive et négative sont différentes, la valeur la plus élevée des deux est applicable.

Pour le dimensionnement des lignes de fuite, la même observation s'applique, dans la mesure où les décharges partielles et le claquage sont considérés comme étant les facteurs pertinents pour le dimensionnement.

Pour le dimensionnement de l'isolation solide, comme déjà établi en 6.3, un essai à haute tension avec une tension à haute fréquence est en général nécessaire. Pour l'analyse harmonique de 8.3, l'amplitude de la fondamentale est bien supérieure à celle de la 3ème harmonique, même pour des formes d'ondes avec de grandes crêtes périodiques. Par conséquent, la fréquence de la tension d'essai sinusoïdale doit être la composante avec l'amplitude la plus élevée, qui sera généralement la fréquence fondamentale. Cependant, l'amplitude de la tension d'essai sinusoïdale doit correspondre à la valeur de crête de la forme d'onde originale ou à l'amplitude de la 1ère harmonique, en prenant celle des deux valeurs qui est la plus élevée.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

8.2 Periodic impulse voltage

An example of such a voltage waveshape is given in Figure 4.

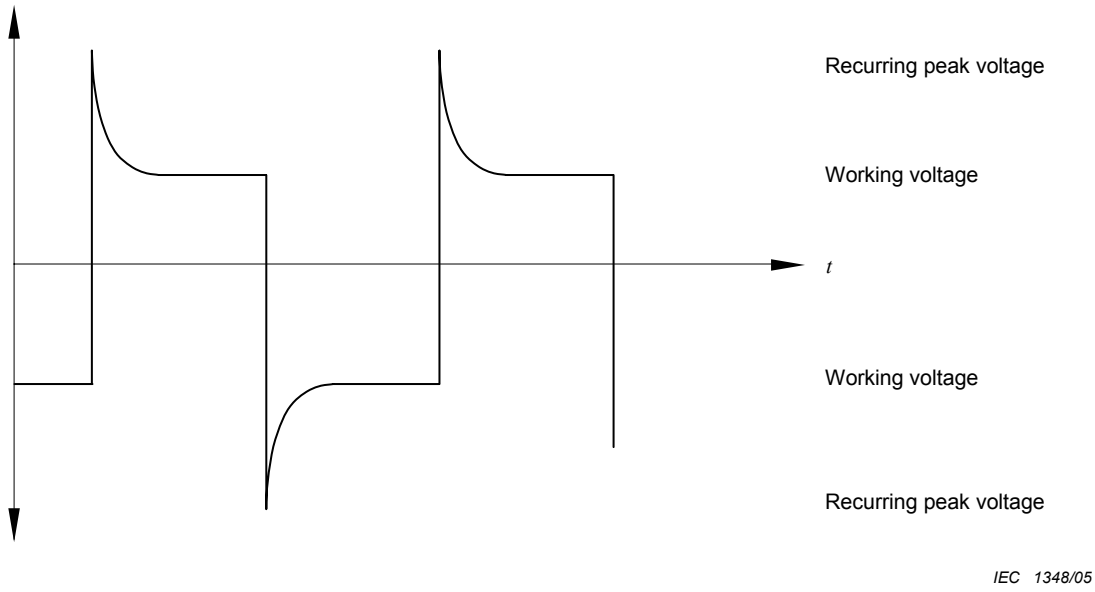


Figure 4 – Periodic impulse voltage (see Part 1)

8.3 Harmonic analysis

In Clause E.2 the harmonic analysis of periodic impulse voltages with different waveshapes is performed. In all cases the spectrum is dominated by the fundamental wave. The relation between the fundamental and the most important 3rd harmonic is not much changed by the overshoot considered. This is also true if a strong oscillation is superimposed.

Therefore it seems to be possible to design and test clearances, creepage distances and solid insulation for the fundamental frequency of the impulse voltage. Thereby the peak value of the non-sinusoidal voltage is taken into account by adjusting the amplitude of the fundamental wave to this peak value.

8.4 Dimensioning procedure and testing

For dimensioning of the clearances, the peak value of the non-sinusoidal voltage and the repetition frequency of the voltage peaks are relevant. The clearance shall be designed for a sinusoidal voltage for the same peak value and frequency. If the positive and the negative peaks are different, the higher value of both is applicable.

For dimensioning of creepage distances the same applies, as partial discharges and breakdown are considered to be the relevant factors for dimensioning.

For dimensioning of solid insulation, as stated already in 6.3, in general a high-voltage test with high-frequency voltage is required. From the harmonic analysis in 8.3, the amplitude of the fundamental is far greater than that of the 3rd harmonic even for waveforms with large periodic peaks. Thus the frequency of the sinusoidal test voltage shall be the component with the highest amplitude, which will usually be the fundamental frequency. However the amplitude of the sinusoidal test voltage shall correspond with the peak value of the original waveshape or with the amplitude of the 1st harmonic, whichever is greater.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Cette augmentation de la tension d'essai, par rapport à l'amplitude de l'onde fondamentale, concerne l'influence des harmoniques plus élevées, qui ne sont pas prises en compte au cours de l'essai.

Dans le cas d'une fréquence maximale de la tension de 10 MHz, si l'intensité de champ est approximativement uniforme et qu'il n'y a pas de soufflures ni d'entrefers entre l'isolation solide, la procédure de dimensionnement décrite en 6.3 peut être appliquée au lieu des essais.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

This increase of the test voltage, as compared to the amplitude of the fundamental wave, addresses the influence of the higher harmonics, which are not taken into account during the test.

In the case of a maximum voltage frequency of 10 MHz, if the field strength is approximately uniform and no voids or air gaps are present in between the solid insulation, the dimensioning procedure described in 6.3 may be applied instead of testing.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Annexe A
(informative)

Caractéristiques d'isolement des distances d'isolement sous des tensions à haute fréquence

A.1 Informations de base sur le claquage des distances d'isolement

Le claquage des distances d'isolement apparaît habituellement en moins d'une microseconde. En tenant compte de cette échelle de temps, une tension alternative à sa fréquence industrielle possède une amplitude essentiellement constante. Par exemple à 50 Hz, l'amplitude reste en-deçà de 99 % de sa valeur de crête pendant 1 ms. C'est pourquoi, pendant l'évolution menant au claquage, c'est la valeur de crête de la tension qui est à l'origine du claquage. Pour les distances d'isolement dans le domaine d'application de la présente norme, cela entraîne des tensions de claquage alternatives (de crête) et continues identiques.

A des fréquences bien supérieures, une réduction de la valeur de sa tension de crête et aussi un renversement de sa polarité doivent être pris en compte pendant le claquage. Cet effet augmentera la tension de claquage.

Jusqu'alors, l'effet des ions (généralement positifs) générés au début du claquage n'a pas été considéré. Ces ions sont générés à la crête de la sinusoïde et, normalement, ils ont assez de temps pour transiter vers les électrodes pendant la partie restante de la demi-sinusoïde. Cependant, il se peut que la polarité s'inverse pour des distances d'isolement élevées ou à haute fréquence, avant que les ions aient pu être éliminés de la distance d'isolement. Cela se traduira par une distorsion du champ électrostatique et réduira la tension de claquage. La vélocité moyenne v de tels ions est d'environ [1]

$$v = 6 \times 10^2 \ \frac{\text{m}}{\text{s}} \tag{A.1}$$

pour l'air à 1 bar. Pendant l'intervalle de temps compris entre la crête et le passage à zéro de la sinusoïde, les ions parcourront la distance s suivante [2]:

$$s = \frac{v}{2\pi f} \tag{A.2}$$

qui est de 1,91 m pour f = 50 Hz. C'est pourquoi, aux fréquences industrielles, ce problème n'apparaît que pour des distances d'isolement très élevées. Cependant, si la fréquence est augmentée dans la zone du kHz, ce phénomène se produit aussi pour des distances d'isolement faibles.

La superposition de ces deux effets a pour résultat des courbes typiques présentant une tension minimale de claquage pour une certaine fréquence f_{min}, qui est de l'ordre de 3 MHz.

A.2 Valeurs expérimentales

A.2.1 Distribution de champ homogène et approximativement homogène

Pour les distances d'isolement avec une distribution de champ homogène, les données de la tension de claquage U_{b} sont présentées à la Figure A.1 [3]. Pour les fréquences de l'ordre de 25 MHz, la tension de claquage est presque la même qu'à 50 Hz. La figure montre également que la valeur de la distance d'isolement est un paramètre important tenant compte de ce comportement.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Annex A
(informative)

Insulation characteristics of clearances at high-frequency voltages

A.1 Basic information about the breakdown of clearances

Breakdown of clearances usually occur in less than one microsecond. With respect to that time scale, an a.c. voltage of power frequency has an essentially constant amplitude. For instance at 50 Hz, the amplitude remains within 99 % of its peak value for 1 ms. Therefore, during the development leading to breakdown, the peak value of the voltage initiates the breakdown. For clearances within the scope of this standard this results in identical a.c. (peak) and d.c. breakdown voltages.

At much higher frequencies, a reduction of the voltage from its peak value and even polarity reversal have to be taken into account during the development of breakdown. This effect will result in an increase of the breakdown voltage.

Up to now, the effect of the ions (which are usually positive) that are generated during inception of breakdown has not been considered. These ions are generated at the crest of the sine-wave and there is usually enough time for them to travel to the electrodes during the remaining part of that half-wave. However, in large clearances or at high frequency, the polarity may be reversed before the ions have been extracted from the clearance. This will result in a distortion of the electrostatic field and will reduce the breakdown voltage. The average velocity v of the ions is approximately [1]

$$v = 6 \times 10^2 \, \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} \tag{A.1}$$

for air at 1 bar. During the time interval between the crest and the zero crossing of the sine-wave the ions will move by the following distance s [2]:

$$s = \frac{v}{2\pi f} \tag{A.2}$$

which is 1,91 m for f = 50 Hz. Therefore, at power frequency, this aspect will only be relevant for very large clearances. However, if frequency is increased to the kHz-range, this phenomenon will also be relevant for small clearances.

The superposition of both effects results in typical curves that exhibit a minimum breakdown voltage for a certain frequency f_{min}, which is in the order of 3 MHz.

A.2 Experimental data

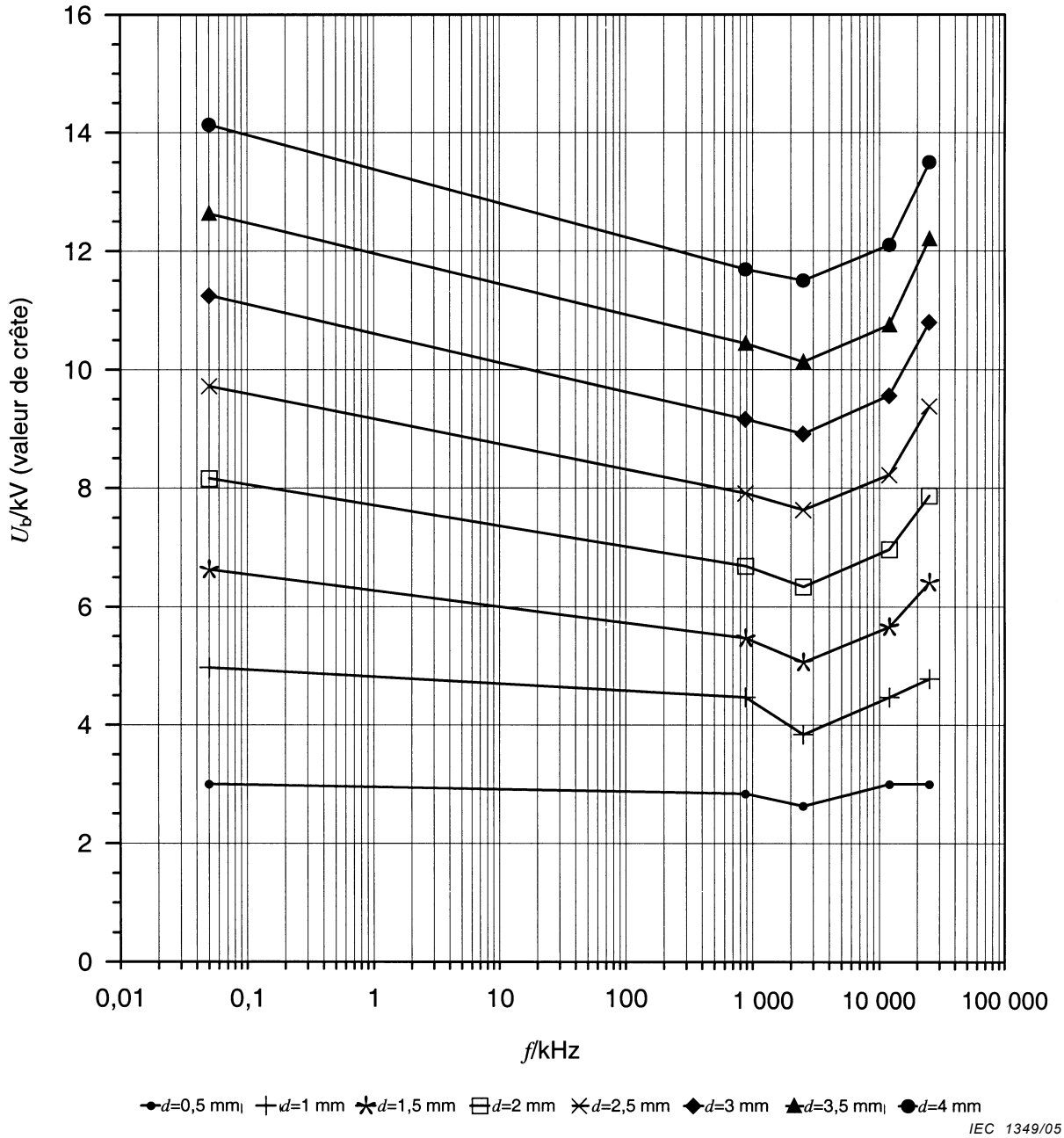
A.2.1 Homogeneous and approximately homogeneous field distribution

For clearances with homogeneous field distribution, data of the breakdown voltage U_{b} is shown in Figure A.1 [3]. For frequencies in the order of 25 MHz, the breakdown voltage is nearly the same as at 50 Hz. The figure also shows that the value of the clearance is an important parameter with respect to this behaviour.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

En tenant compte des fréquences actuellement utilisées, la gamme de la diminution initiale de la tension de claquage avec l'augmentation de la fréquence est du plus grand intérêt. Cette gamme de fréquences, qui est de l'ordre de 3 MHz, est décrite plus en détail à la Figure A.2 [4]. Cette donnée est considérée comme pertinente dans le domaine d'application de la présente norme.



Légende

U_b tension de claquage

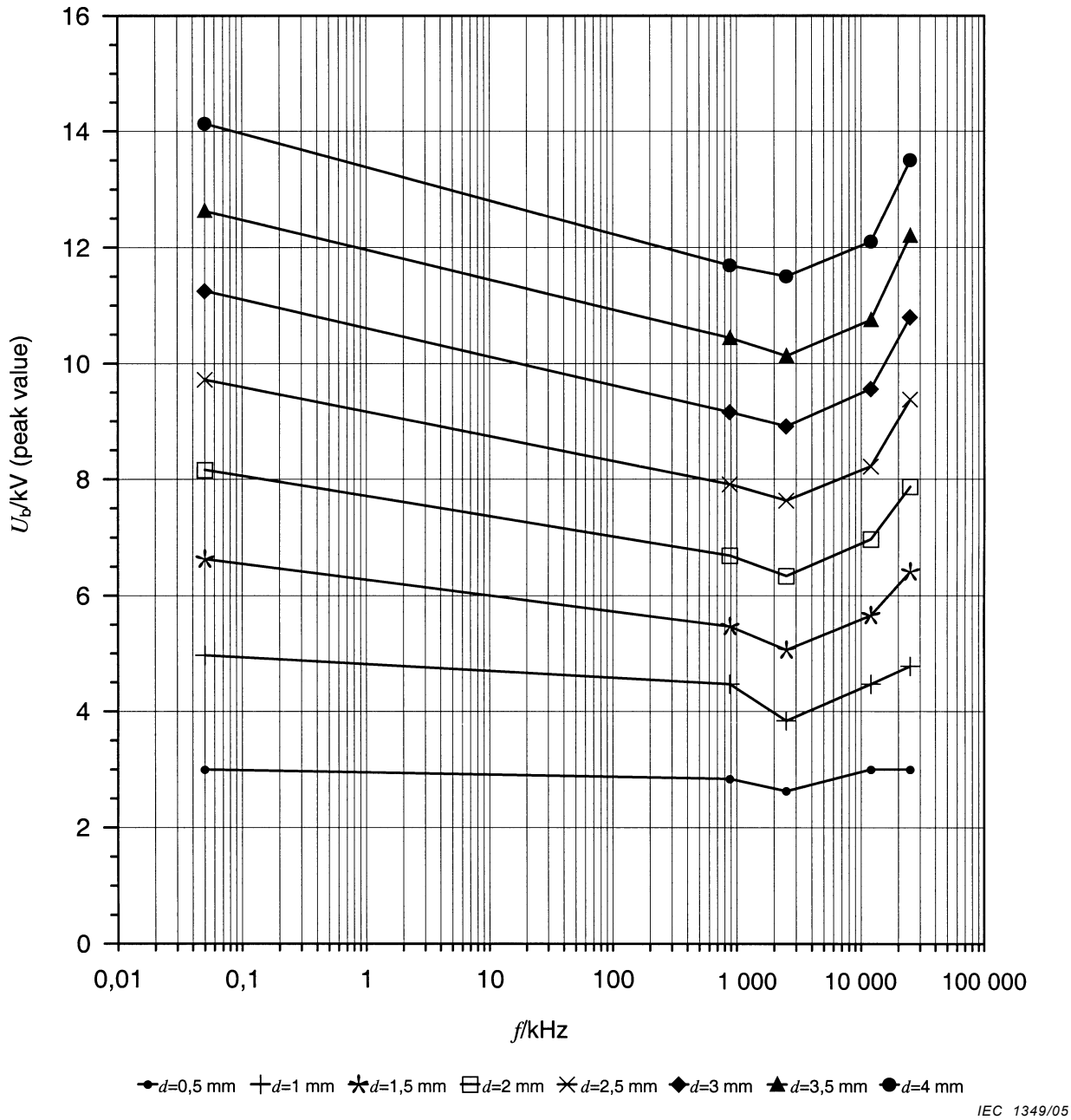
d distance d'isolement

Figure A.1 – Claquage à haute fréquence dans l'air sous pression atmosphérique, champ homogène, gamme de fréquences 50 Hz – 25 MHz [3]

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

With respect to the frequencies presently used, the range with the initial decrease of breakdown voltage with increasing frequency is of greater interest. This frequency range, which is in the order of 3 MHz, is described in more detail in Figure A.2 [4]. This data is considered to be relevant within the scope of this standard.



Key

U_b breakdown voltage

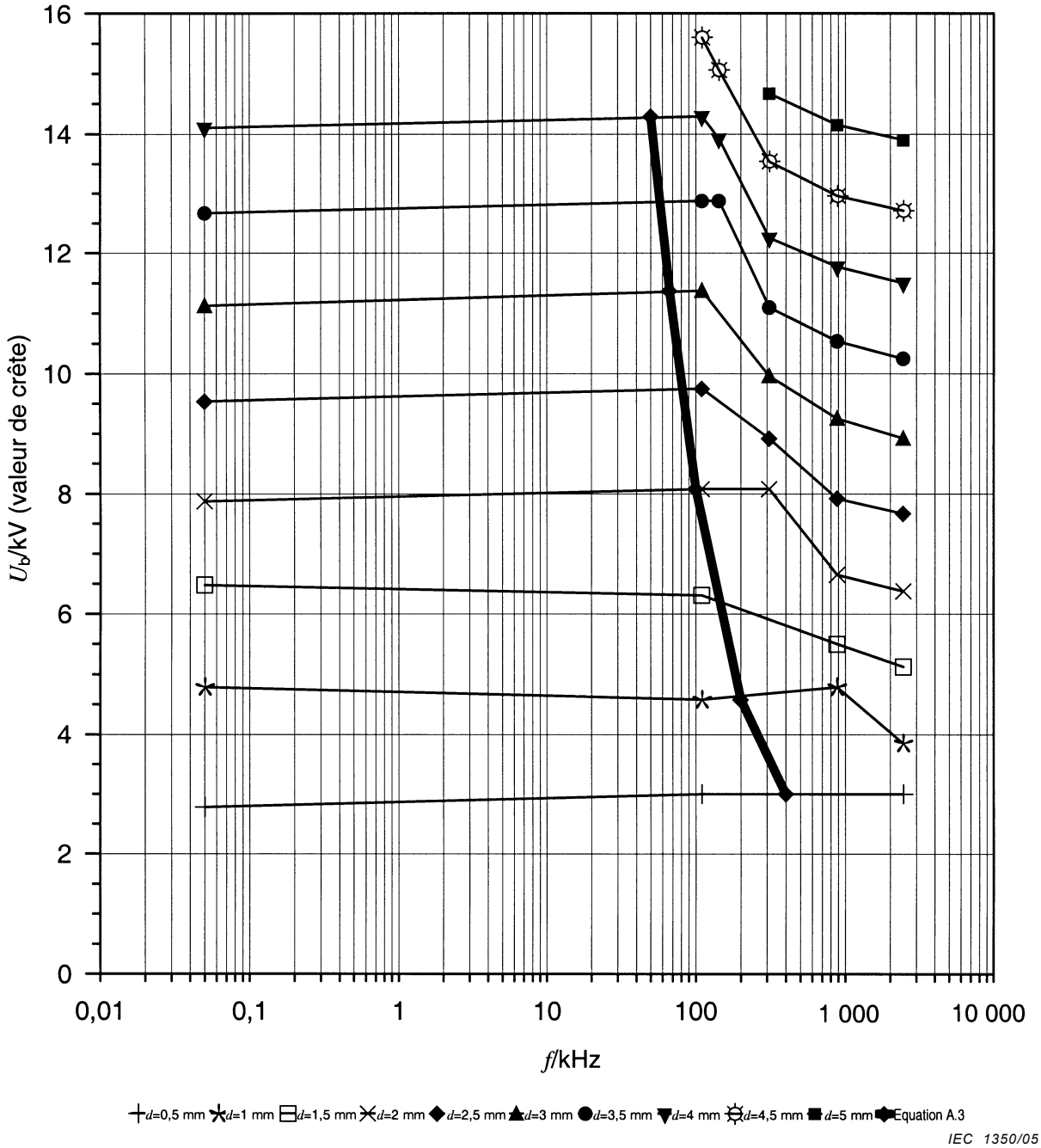
d clearance

Figure A.1 – Breakdown at high frequency in air at atmospheric pressure, homogeneous field, frequency range 50 Hz – 25 MHz [3]

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

En conclusion, pour des conditions de champ homogène, la réduction maximale de la tension de claquage U_b avec la fréquence est de 20 %, par rapport aux valeurs pour 50/60 Hz. La fréquence critique f_{crit} à laquelle la réduction de la tension de claquage apparaît [2] est, pour l'air à 1 bar, en fonction de la valeur de la distance d'isolement:

$$f_{crit} = \frac{v}{\pi d} \quad \Rightarrow \quad f_{crit} \approx \frac{0{,}2}{d \,/\, \text{mm}} \ \text{MHz} \tag{A.3}$$



Légende

U_b tension de claquage

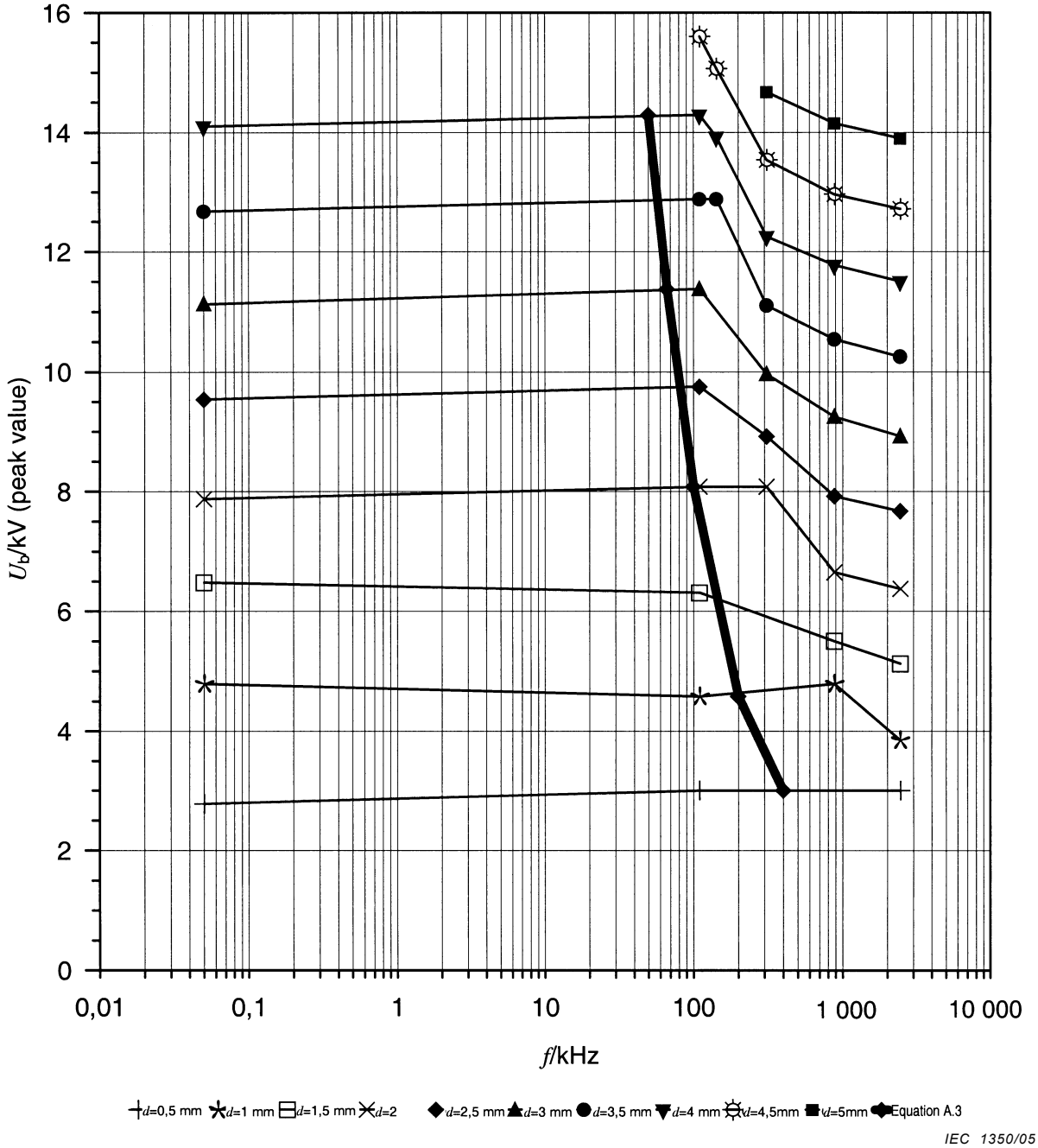
d distance d'isolement

Figure A.2 – Claquage à haute fréquence dans l'air sous pression atmosphérique, champ homogène, gamme de fréquences 50 Hz – 2,5 MHz [4]

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

As a conclusion, for homogeneous field conditions, the maximum reduction of the breakdown voltage U_b with frequency is 20 % compared to the 50/60 Hz-values. The critical frequency f_{crit} at which the reduction of the breakdown voltage occurs [2] is for air at 1 bar depending from the value of the clearance:

$$f_{crit} = \frac{v}{\pi d} \quad \Rightarrow \quad f_{crit} \approx \frac{0{,}2}{d\,/\,\text{mm}} \ \text{MHz} \tag{A.3}$$



Key
U_b breakdown voltage
d clearance

Figure A.2 – Breakdown at high frequency in air at atmospheric pressure, homogeneous field, frequency range 50 Hz – 2,5 MHz [4]

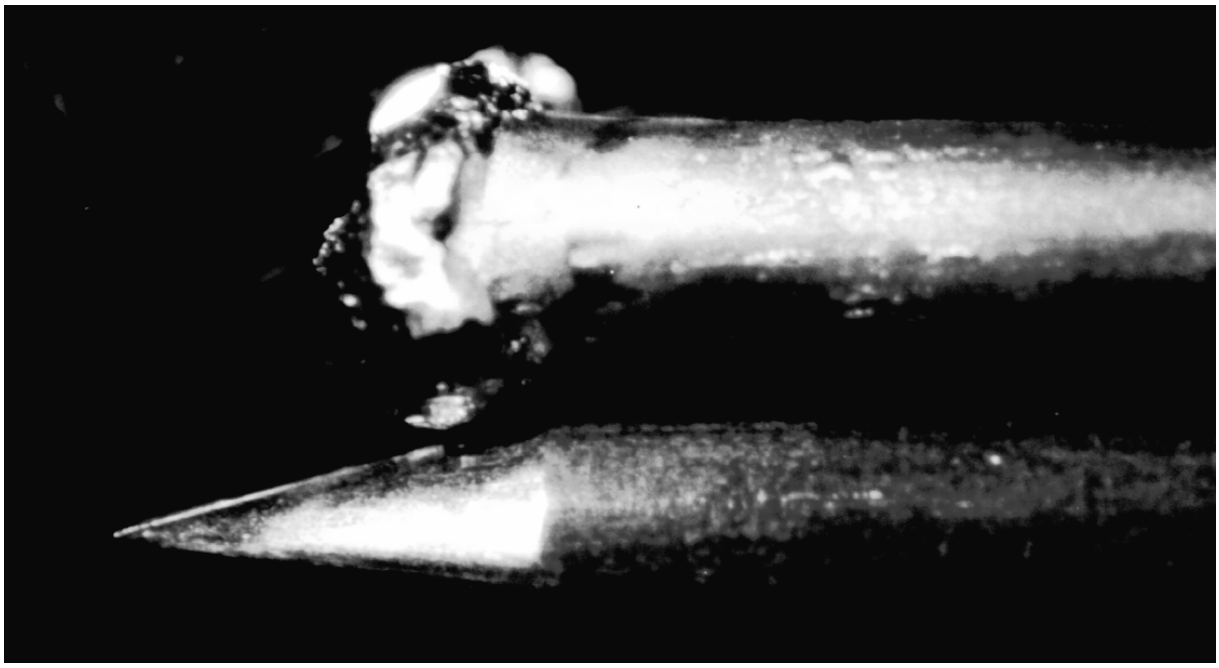
Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Comme le montre la courbe supplémentaire conformément à l'Equation (A.3) à la Figure A.2, il y a un écart entre les valeurs expérimentales disponibles et la fréquence critique donnée par l'Equation (A.3). Dans la mesure où les valeurs expérimentales ne sont pas complètes et où leur précision n'est pas connue, l'Equation (A.3) sera utilisée pour le dimensionnement.

A.2.2 Distribution de champ non homogène

Pour des conditions de champ non homogène sous une contrainte de tension à haute fréquence, des phénomènes lumineux intenses peuvent être observés à l'œil nu à proximité de la pointe de l'aiguille, si la tension de seuil de décharges partielles (couronne) est dépassée. Après de nouvelles augmentations de la tension à partir de cette zone, un canal de faible épaisseur commence à se développer vers l'électrode opposée (plane), provoquant un claquage. La détérioration de la pointe de l'aiguille est ainsi très probable. Cela est représenté à la Figure A.3.

Pour des conditions de champ non homogène, f_{crit} peut toujours être approchée à partir de l'Equation (A.3). Au-dessus de f_{crit}, l'influence de la fréquence sur la tension de claquage est bien plus significative par rapport aux conditions de champ homogène. La réduction de la tension de claquage par rapport à celle à 50 Hz peut être supérieure à 50 % [1].



IEC 1351/05

Figure A.3 – Pointe de l'aiguille après claquage (en haut) et avant claquage (en bas)

Des mesures très détaillées de la tension de seuil de décharges partielles (DP) et de la tension de claquage des vides non homogènes (pointe-plan) dans l'air sous pression atmosphérique ont été réalisées récemment [5] et [6]. Comme électrodes pointes, des aiguilles arborescentes (Ogura) avec un rayon de 5, 30 et 100 µm et des tubes de drainage unidirectionnels conformément à l'ISO 7864 [7] (B. Braun) avec un rayon effectif d'environ 5 µm ont été utilisées. Ces derniers ont été principalement utilisés et sont appelés aiguilles BB.

En général, des électrodes aiguilles peuvent être utilisées pour la simulation de champs non homogènes, si la longueur de l'aiguille effective représente environ 3 fois la distance d'isolement [8]. Par conséquent, des aiguilles BB avec une longueur d'aiguille effective d'environ 20 mm peuvent être utilisées pour une distance d'isolement maximale de 7 mm.

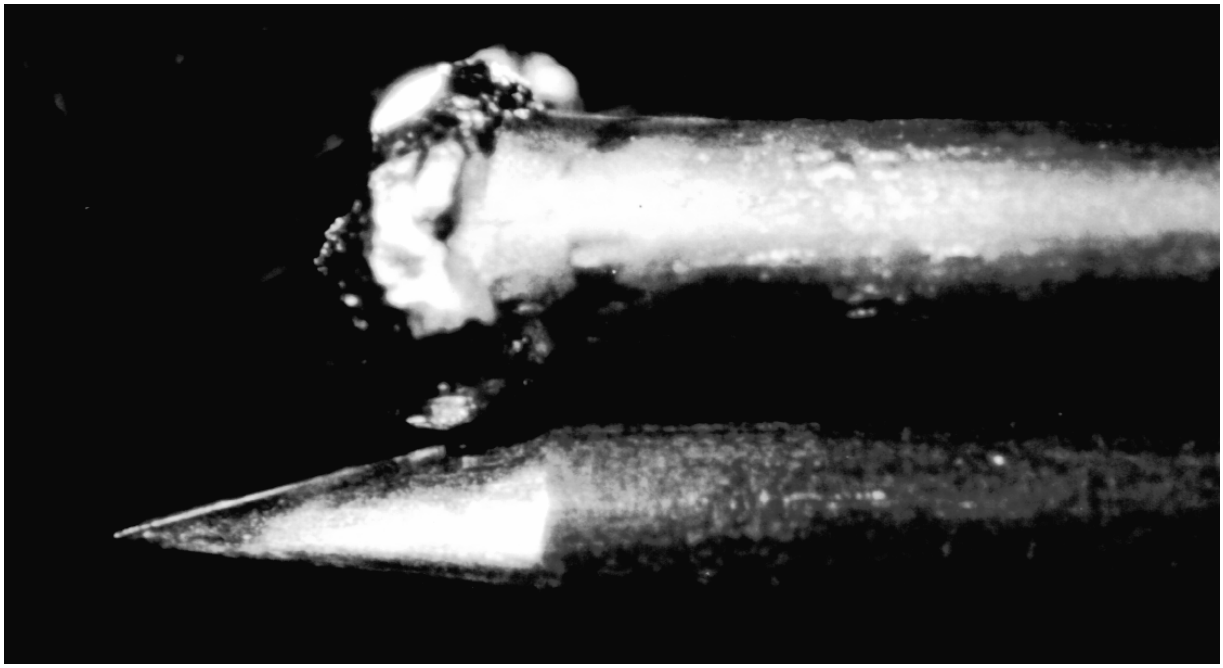
Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

As can be seen from the additional curve according to Equation (A.3) in Figure A.2, there is some deviation between the available experimental data and the critical frequency given by Equation (A.3). As the experimental data is not complete and its precision is not known, Equation (A.3) will be used for the purpose of dimensioning.

A.2.2 Inhomogeneous field distribution

For inhomogeneous field conditions at high-frequency voltage stress intense luminous phenomena can be observed with the naked eye in the vicinity of the needle tip, if the partial discharge (corona) inception voltage is exceeded. After further increase of the voltage from this area a thin channel begins to develop towards the opposite electrode (plane) causing breakdown. Thereby deterioration of the needle tip is very likely. This is shown in Figure A.3.

For inhomogeneous field conditions, f_{crit} can still be approximated from Equation (A.3). Above f_{crit}, the influence of frequency on the breakdown voltage is much more significant compared to homogeneous field conditions. The reduction of the breakdown voltage with respect to that at 50 Hz can be more than 50 % [1].



IEC 1351/05

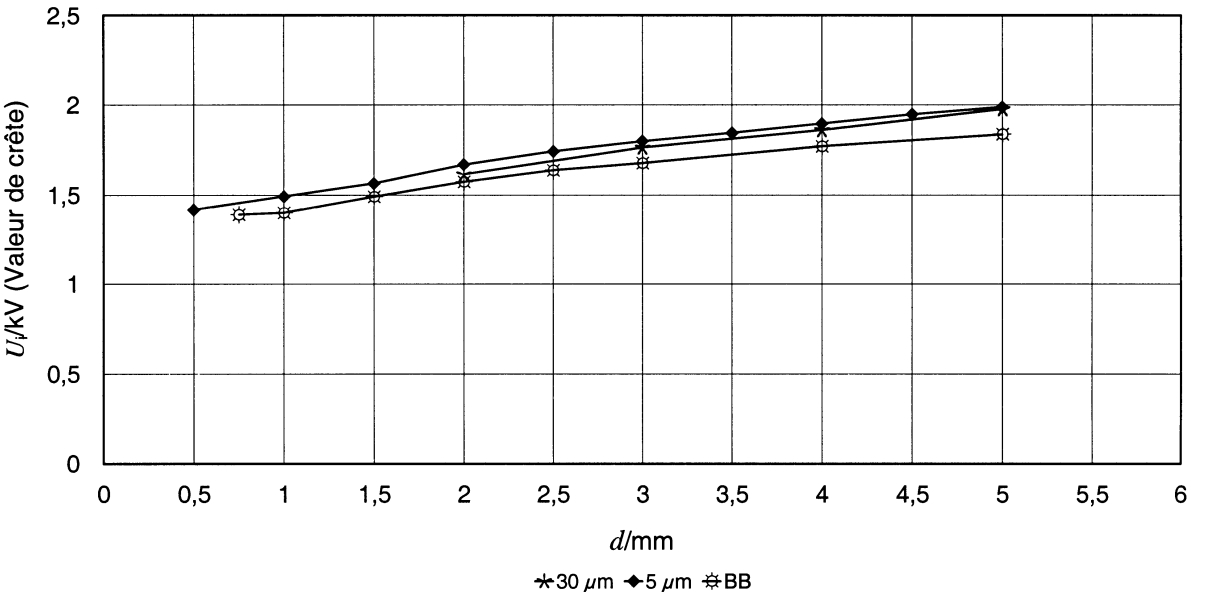
Figure A.3 – Needle tip after (upper) and before (lower) breakdown

Recently very detailed measurements of the partial discharge (PD) inception voltage and the breakdown voltage of inhomogeneous gaps (point-plane) in air at atmospheric pressure have been performed [5] and [6]. As point electrodes treeing-needles (Ogura) with a radius of 5, 30 and 100 µm and one-way drain tubes according to ISO 7864 [7] (B. Braun) with an effective radius of approximately 5 µm have been used. The latter were mainly used and are called BB-needles.

In general needle electrodes can be used for simulation of inhomogeneous fields if the effective needle length is approximately 3 times the clearance [8]. Therefore the BB-needles with an effective needle length of approximately 20 mm can be used for a maximum clearance of 7 mm.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Les mesures comparatives de la Figure A.4 [6], qui ont été réalisées à une fréquence de 100 kHz, montrent qu'il n'y a pas de différence significative dans le comportement d'aiguilles arborescentes (Ogura; 30 µm et 5 µm) et d'aiguilles BB (environ 5 µm). Conformément à la Figure A.4, les données les plus faibles sont obtenues pour les aiguilles BB. Par conséquent, les données de dimensionnement ont été déduites de mesures effectuées avec des aiguilles BB.



Légende

U_i tension de seuil de DP

d distance d'isolement

Figure A.4 – Tensions de seuil de DP dans l'air sous pression atmosphérique pour f = 100 kHz, électrodes pointe-plan avec un rayon de point différent [6]

Dans la mesure où la tension d'extinction de DP est bien plus reproductible, il convient qu'elle soit spécifiée. Il s'agit également de la valeur correspondante pour le dimensionnement, dans la mesure où les décharges partielles peuvent être débutées par des surtensions transitoires et ne doivent pas être maintenues par toute tension en régime permanent (voir 4.1.2.4 de la Partie 1).

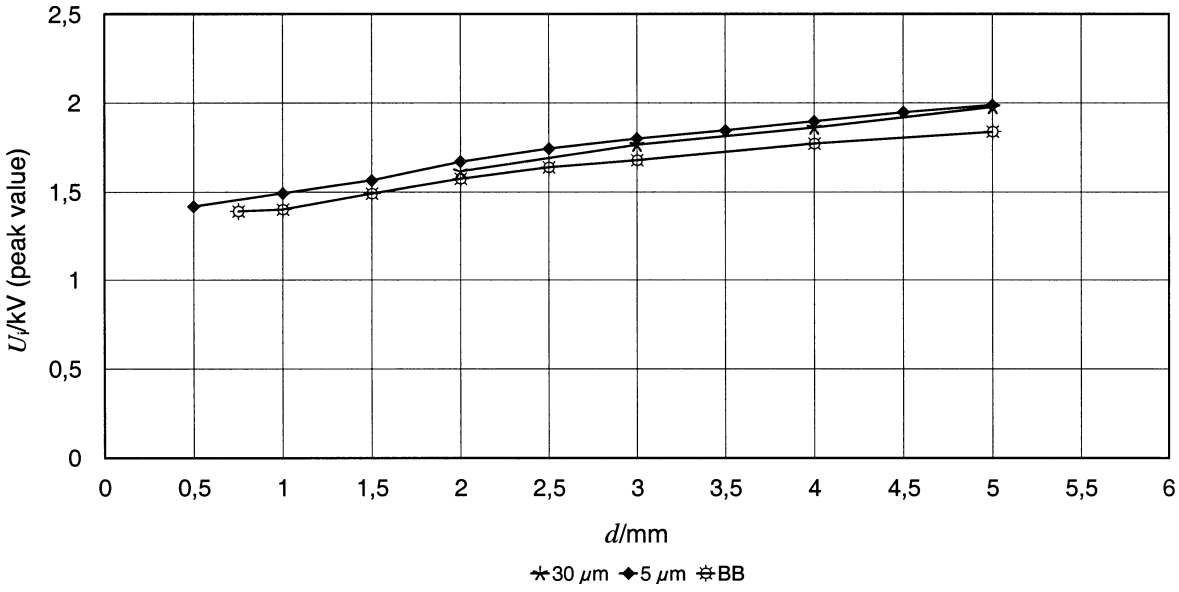
A partir de ces mesures, les tensions d'extinction de DP ont été évaluées et sont présentées à la Figure A.5 [6] pour une fréquence de 460 kHz, avec la tension de claquage. Ces derniers essais ont été limités par la tension d'essai maximale de la source utilisée.

D'autres essais ont été effectués pour une fréquence de 1 MHz. En conséquence, la Figure A.6 représente les tensions d'extinction de DP et les tensions de claquage [6]. Pour les distances d'isolement inférieures à 1 mm, le seuil de DP coïncide quasiment avec le claquage, de telle sorte qu'aucune distinction n'est possible entre les claquages.

Pour une fréquence de 3 MHz, seules des expériences limitées pourraient être réalisées, qui fourniraient des données expérimentales. Cela était quasiment identique aux données obtenues à 1 MHz. C'est pourquoi les données présentées à la Figure A.6 étaient considérées comme pertinentes pour le dimensionnement dans le domaine d'application de la présente norme.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

The comparative measurements in Figure A.4 [6], which were performed at a frequency of 100 kHz, show that there is no significant difference in the behaviour of treeing needles (Ogura; 30 µm and 5 µm) and BB-needles (approximately 5 µm). According to Figure A.4 the lowest data are obtained for the BB-needles. Therefore the dimensioning data were derived from measurements with BB-needles.



Key

U_i PD inception voltage

d clearance

Figure A.4 – PD inception voltages in air at atmospheric pressure for f = 100 kHz, point-plane electrodes with different point radius [6]

As the PD-extinction voltage is much more reproducible it should be specified. This is also the relevant value for dimensioning, as PD can be started by transient overvoltages and shall not be maintained by any steady state voltage (see 4.1.2.4 of Part 1).

From these measurements the PD-extinction voltages have been evaluated and are shown in Figure A.5 [6] for a frequency of 460 kHz together with the breakdown voltage. The latter tests were limited by the maximum test voltage of the source being used.

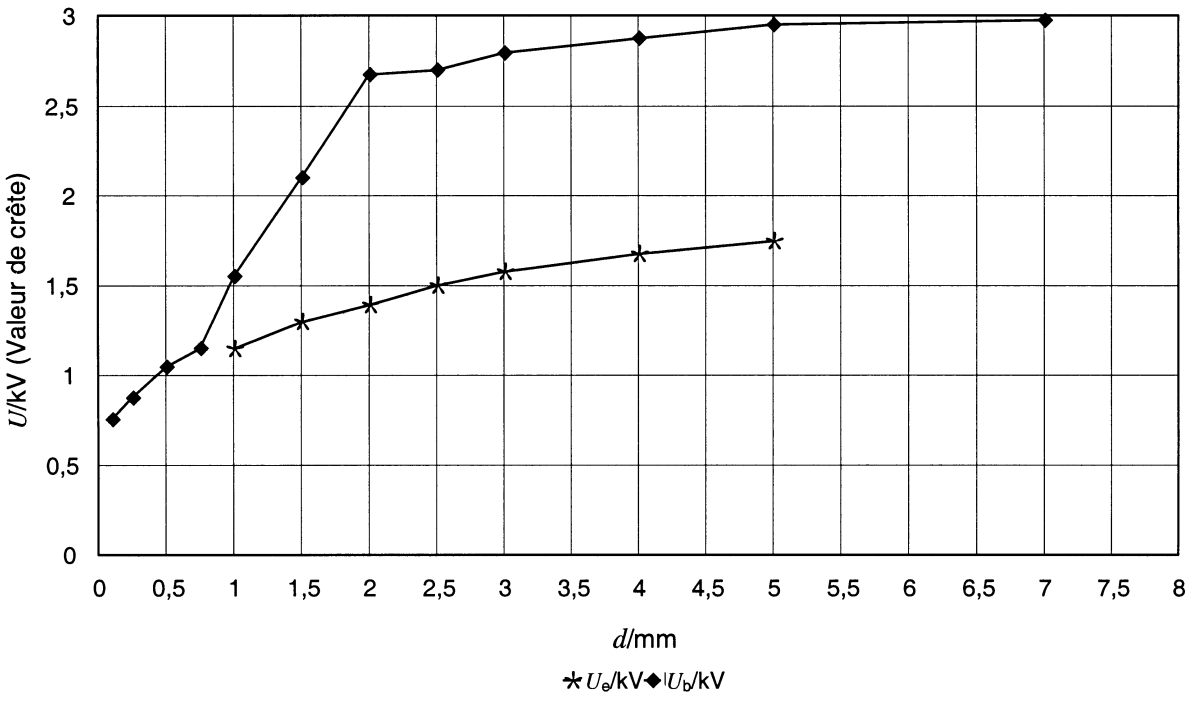
Further tests have been performed for a frequency of 1 MHz. As a result in Figure A.6 the PD-extinction voltages and the breakdown voltages are shown [6]. For clearances of less than 1 mm PD-inception nearly coincides with breakdown so that no distinction between breakdowns is possible.

For a frequency of 3 MHz only limited experiments could be performed, which provided some tentative data. This was nearly identical with the data obtained at 1 MHz. Therefore the data shown in Figure A.6 was considered to be relevant for dimensioning within the scope of this standard.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Il convient de noter que les résultats de mesure de la tension de seuil de DP sont, dans une certaine mesure, influencés par le taux d'augmentation de la tension d'essai.



Légende

d distance d'isolement

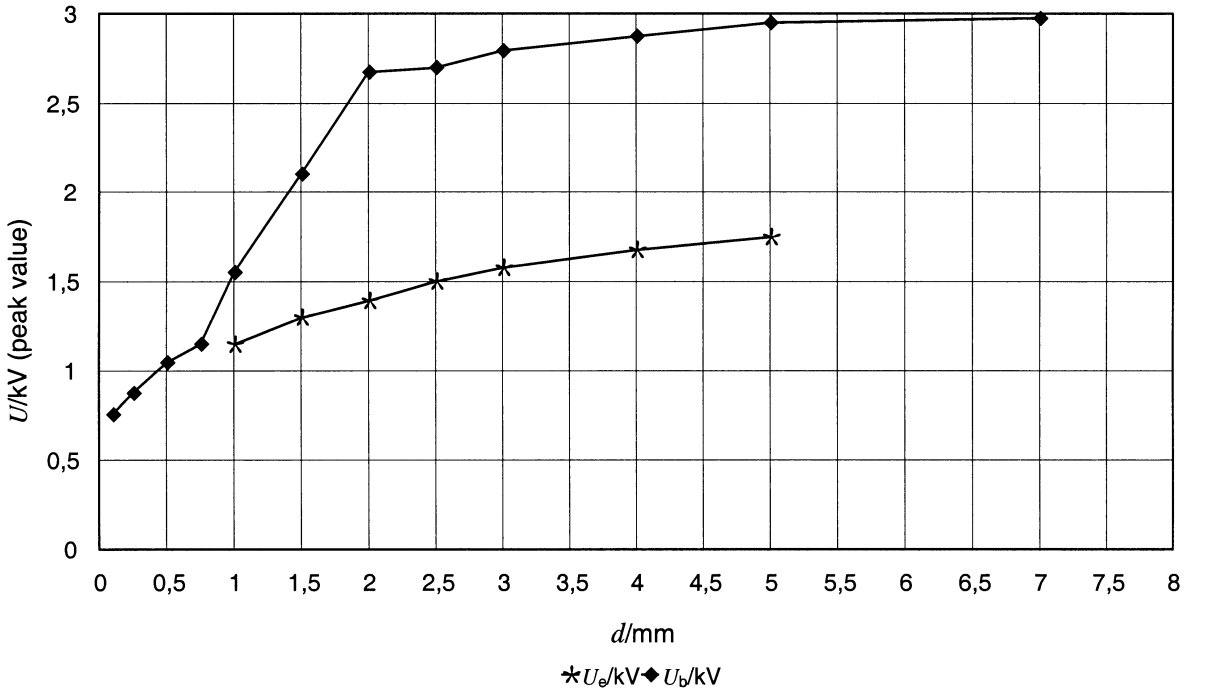
U_e tension d'extinction de DP

U_b tension de claquage

Figure A.5 – Tensions d'extinction de DP et tensions de claquage dans l'air sous pression atmosphérique pour f = 460 kHz, électrodes pointe-plan avec des aiguilles BB [6]

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

It should be noted that the measurement results of the PD-inception voltage are to some extent influenced by the rate of rise of the test voltage.



Key

d clearance

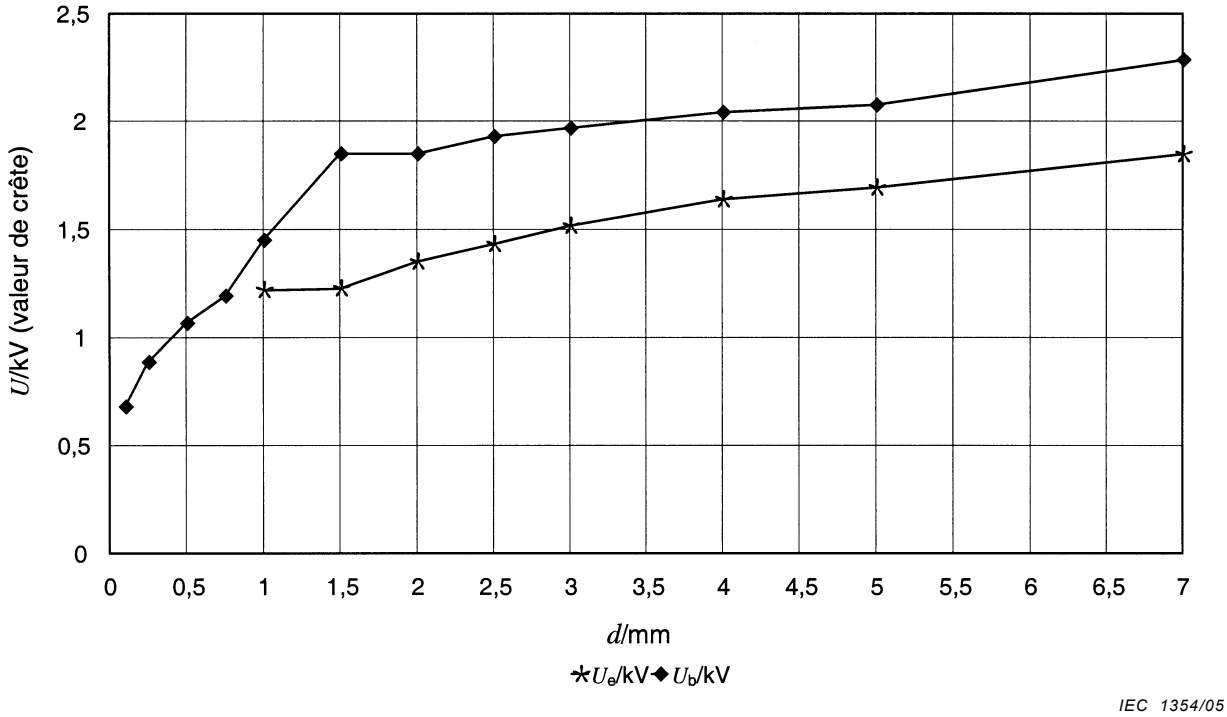
U_e PD extinction voltage

U_b breakdown voltage

Figure A.5 – PD extinction voltages and breakdown voltages in air at atmospheric pressure for f = 460 kHz, point-plane electrodes with BB-needles [6]

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale



Légende

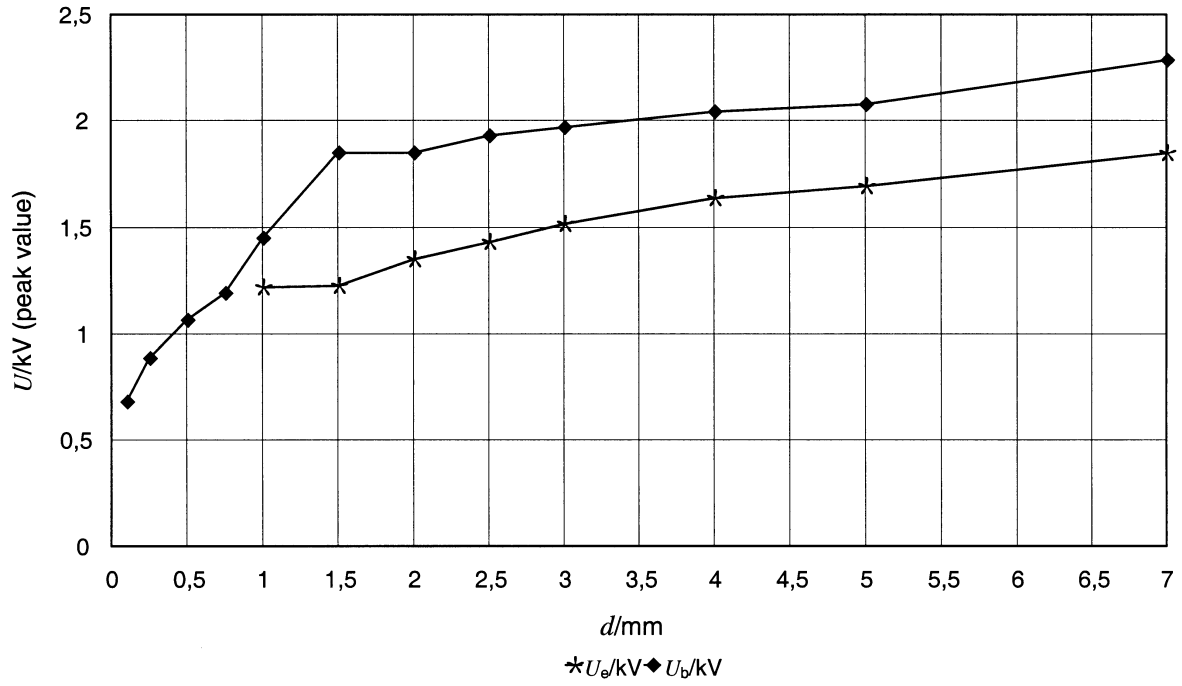
d distance d'isolement

U_e tension d'extinction de DP

U_b tension de claquage

Figure A.6 – Tensions d'extinction de DP et tensions de claquage dans l'air sous pression atmosphérique pour f = 1 MHz, électrodes pointe-plan avec des aiguilles BB [6]

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale



Key

d clearance

U_e PD extinction voltage

U_b breakdown voltage

Figure A.6 – PD extinction voltages and breakdown voltages in air at atmospheric pressure for f = 1 MHz, point-plane electrodes with BB-needles [6]

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Annexe B
(informative)

Caractéristiques d'isolement des lignes de fuite sous des tensions à haute fréquence

B.1 Caractéristiques de tenue des lignes de fuite

Dans la Partie 1, le cheminement est le seul phénomène pris en compte pour le dimensionnement des lignes de fuite. Cependant, des données plus récentes [9] ont montré que cela ne s'applique que pour des conditions d'environnement sévères, et si les matériaux utilisés ne résistent pas au cheminement (voir la CEI 60112). Dans des conditions d'environnement plus favorables, le cheminement ne semble pas être fonction du dimensionnement. Dans ce cas, en particulier pour des petites distances inférieures à 2 mm, la tension de claquage à la surface du matériau isolant est réduite par la pollution et doit être prise en compte pour le dimensionnement (voir la Partie 5).

Pour des pollutions plus faibles, et en particulier pour des petites distances, le claquage à la surface de l'isolant semble être pris en compte pour le dimensionnement et une possible influence de la fréquence sur les tensions de claquage doit être considérée.

B.2 Conditions expérimentales

L'éprouvette pour mesurer les caractéristiques de tenue des lignes de fuite faibles est représentée à la Figure B.1. Les matériaux, qui ont été inclus dans les recherches, sont décrits au Tableau B.1. Les conducteurs imprimés ont été appliqués conformément aux techniques de fabrication normalisées. Les éprouvettes étaient propres et non recouvertes. Chaque carte a 15 points de mesurage entre les conducteurs parallèles. Les distances nominales de l'électrode sont également représentées à la Figure B.1. Les tensions de DP et les tensions de claquage ont été mesurées.

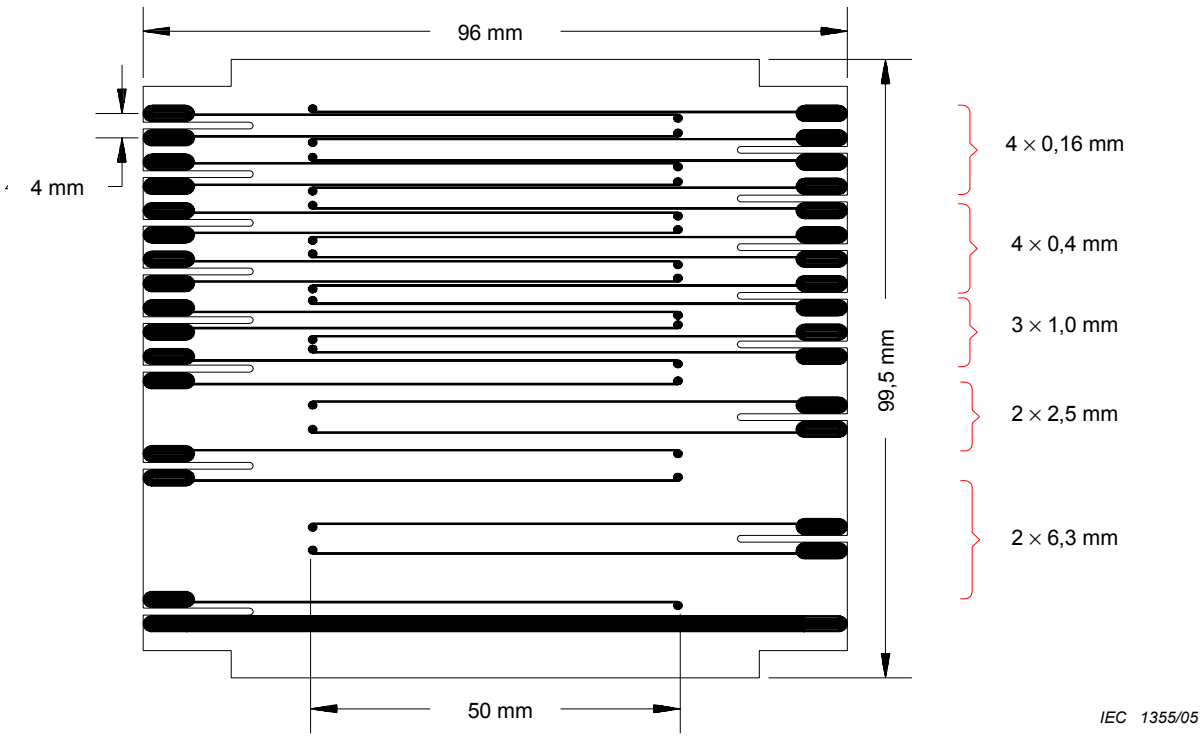


Figure B.1 – Eprouvette pour la mesure des tensions de DP et des tensions de tenue des lignes de fuite jusqu'à 6,3 mm

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

Annex B
(informative)

Insulation characteristics of creepage distances at high-frequency voltages

B.1 Withstand characteristics of creepage distances

In Part 1, tracking is the only phenomenon, which is taken into account for dimensioning of creepage distances. However, more recent data [9] provides evidence that this only applies for severe environmental conditions, and if the materials used are not resistant to tracking (see IEC 60112). Under more favourable environmental conditions, tracking does not seem to be very relevant for dimensioning. In this case particularly for small distances below 2 mm, the breakdown voltage across the surface of the insulating material is reduced by pollution and has to be taken into account for dimensioning (see Part 5).

For less pollution and in particular for small distances, breakdown across the surface of the insulation seems to be relevant for dimensioning and the influence of the frequency on the breakdown voltages has to be considered.

B.2 Experimental conditions

The test specimen for measuring the withstand characteristics of small creepage distances is shown in Figure B.1. The materials, which were included in the investigations, are described in Table B.1. The printed conductors were applied according to standard manufacturing techniques. The specimens were clean and not coated. Each board has 15 measuring points between parallel conductors. The nominal electrode distances are also shown in Figure B.1. Both the PD-voltages and the breakdown voltages were measured.

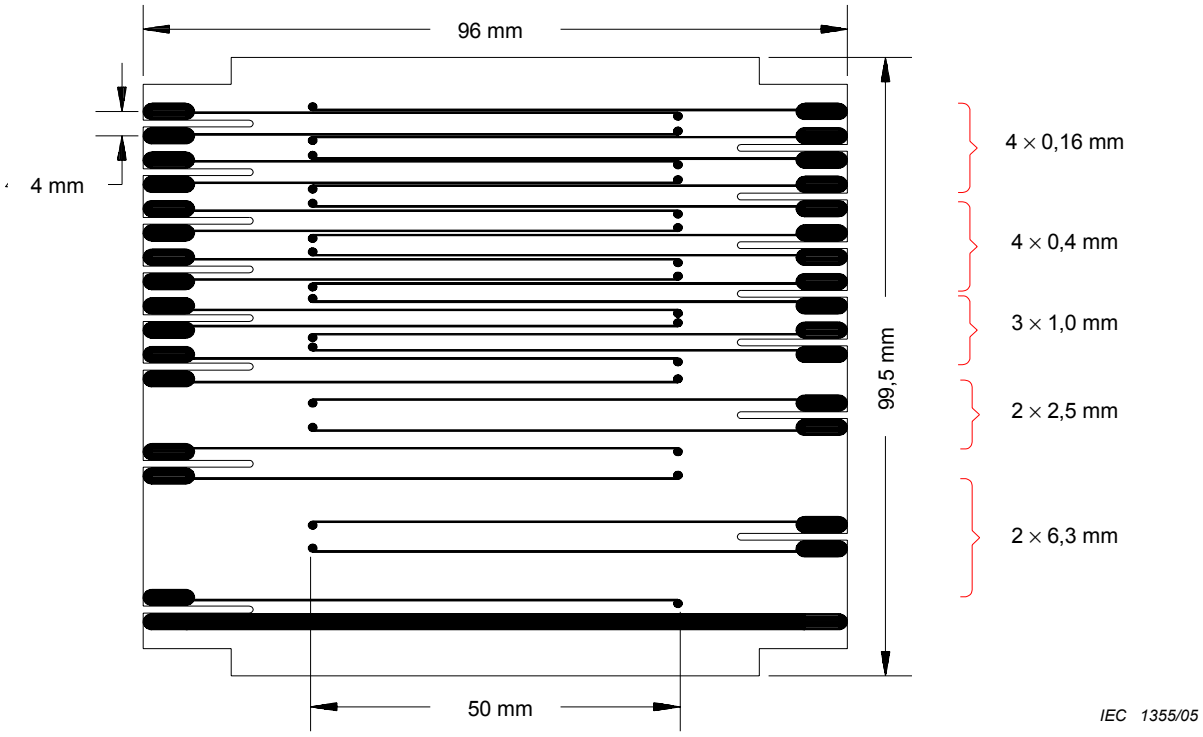


Figure B.1 – Test specimen for measuring the PD-voltages and the withstand voltages of creepage distances up to 6,3 mm

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

Tableau B.1 – Matériaux inclus dans les recherches

Classification des matériaux	Description des matériaux
B	Stratifié en verre époxy FR4
C	Résine polyester (thermodurcie), type 802
D	Résine phénolique, type 31.5
E	Stratifié en verre époxy à film en polyimide FR4
G	Stratifié en polyester GPO III
H	Résine mélamine, type 150

Pour mesurer les tensions de DP et les tensions de claquage, un taux d'augmentation de la tension d'essai d'environ 300 V/s a été choisi. Il est ainsi assuré qu'aucune détérioration significative de l'éprouvette ne se produira pendant les essais. Si le taux d'augmentation est nettement plus faible (environ 10 V/s) pour une haute fréquence de la tension d'essai, une détérioration du matériau de base peut se produire pendant les essais. Cela entraînerait une réduction des tensions de claquage mesurées de l'ordre de 10 %.

B.3 Valeurs expérimentales

Les résultats d'essai sont présentés aux Figures B.2 et B.3 [6]; des précisions supplémentaires sont décrites en [5]. Par rapport à une fréquence de 100 kHz à 1 MHz, la tension de seuil de DP n'est que d'environ 66 %. A une fréquence de 3 MHz, ces valeurs sont à nouveau diminuées d'environ 30 %. Il est donc nécessaire de fournir des critères de dimensionnement spécifiques en fonction de la fréquence de la tension.

La tension de claquage est moins dépendante de la fréquence de la tension. Cependant, l'effet de saturation, qui pourrait déjà être vu pour les distances d'isolement, est si fort que presque aucune augmentation de la tension de claquage ne pourrait être obtenue en variant les distances de quelques millimètres.

Au cours des mesures de la tension de claquage sur la plupart des éprouvettes, les électrodes et/ou le matériau de base ont été détériorés. La source de ce dommage, qui peut provoquer la conductivité du matériau d'isolation, semble être liée à deux mécanismes de détérioration. L'un d'eux est la fusion du matériau d'électrode due à l'énergie de décharge élevée pendant le claquage. L'autre phénomène est provoqué par les décharges partielles avant l'apparition du claquage et entraîne une dégradation du matériau de base.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Table B.1 – Materials included in the investigations

Material classification	Material description
B	Glass-epoxy laminate FR4
C	Polyester resin (thermoset), type 802
D	Phenolic resin, type 31.5
E	Polyimide film laminated to glass-epoxy laminate FR4
G	Polyester laminate GPO III
H	Melamine resin, type 150

For measuring the PD-voltages and the breakdown voltages a rate of rise of the test voltage of approximately 300 V/s was selected. Thereby it is assured that no significant deterioration of the test specimen will occur during test. If the rate of rise is much lower (some 10 V/s) for high frequency of the test voltage, deterioration of the base material can occur during the test. This would result in the measured breakdown voltages being reduced in the order of 10 %.

B.3 Experimental data

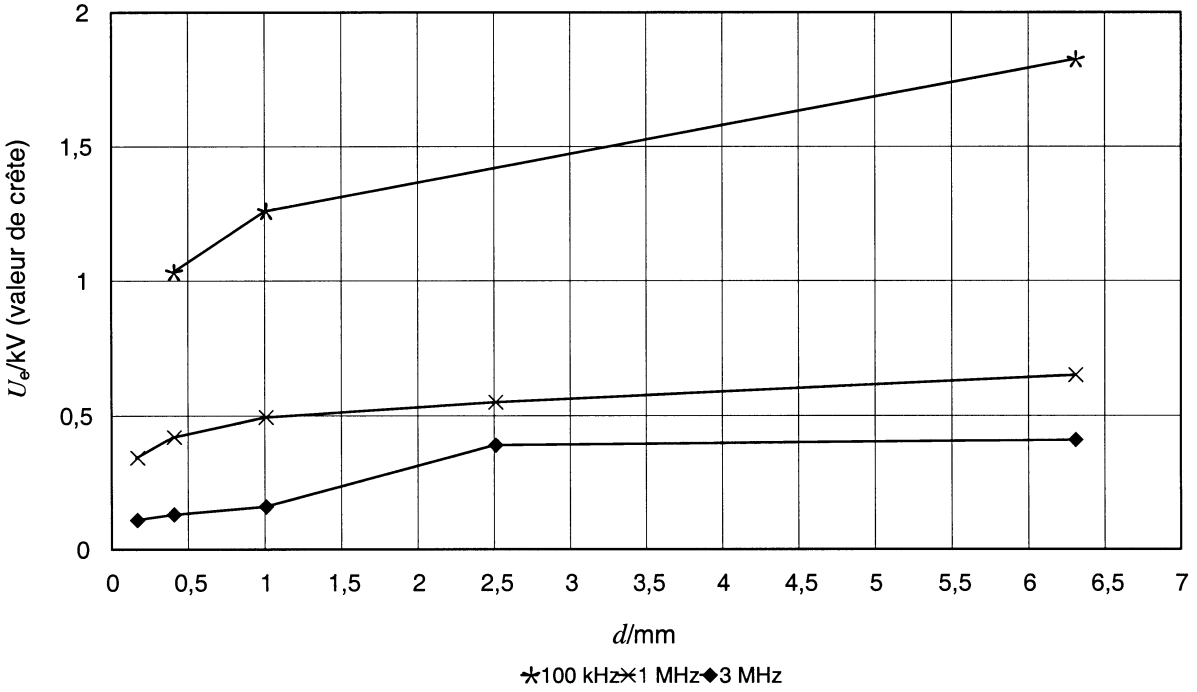
The test results are shown in Figures B.2 and B.3 [6]; more details are described in [5]. Compared to a frequency of 100 kHz at 1 MHz the PD-inception voltage is only about 66 %. At a frequency of 3 MHz, these values are further decreased by about 30 %. So it is necessary to provide specific dimensioning criteria depending upon the frequency of the voltage.

The breakdown voltage is less dependent on the frequency of the voltage. However the saturation effect, which could already be seen for clearances, is so strong, that nearly no increase of the breakdown voltage could be obtained by varying the distances in the range of some millimetres.

During the measurements of the breakdown voltage on most of the test specimens the electrodes and/or the base material have deteriorated. The source of this damage, which can cause conductivity of the insulation material, seems to be related to two deterioration mechanisms. One of them is melting of the electrode material due to the high discharge energy during breakdown. The other phenomenon is caused by PD before breakdown occurs and results in a degradation of the base material.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

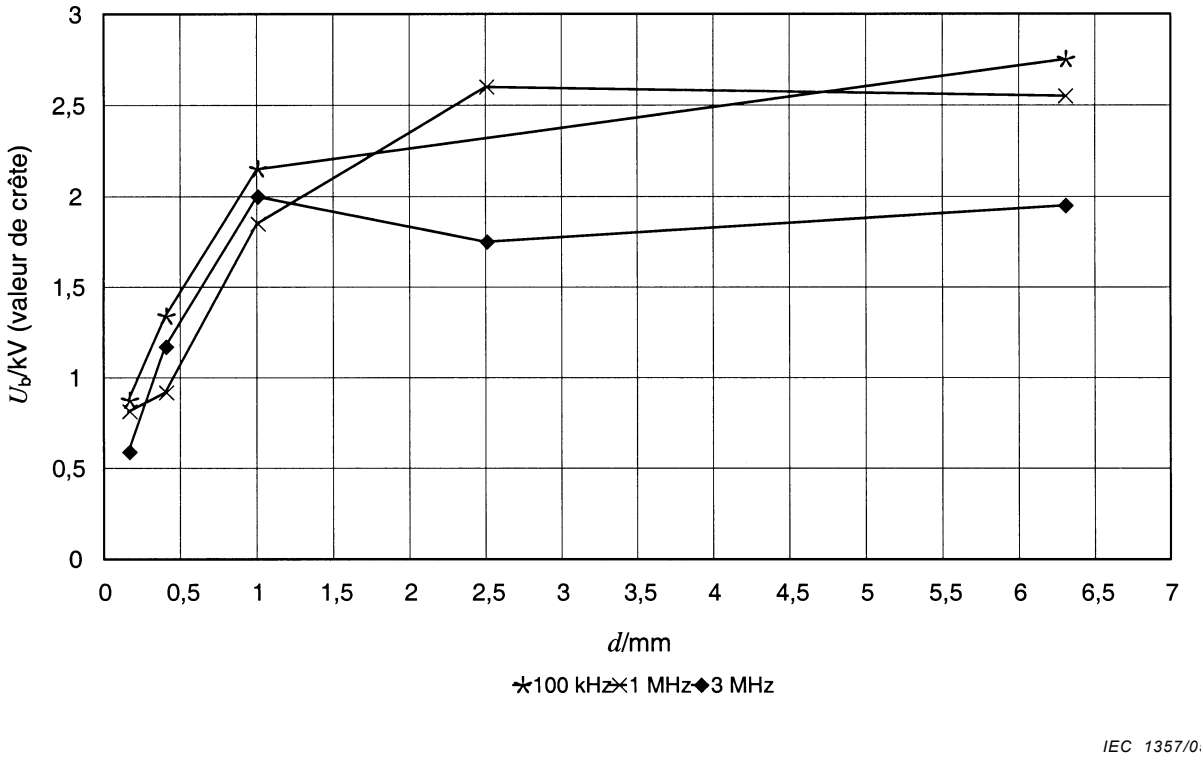
Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale



Légende

d ligne de fuite

Figure B.2 – Résultats d'essai de la tension d'extinction de DP U_e des lignes de fuite jusqu'à 6,3 mm [6]

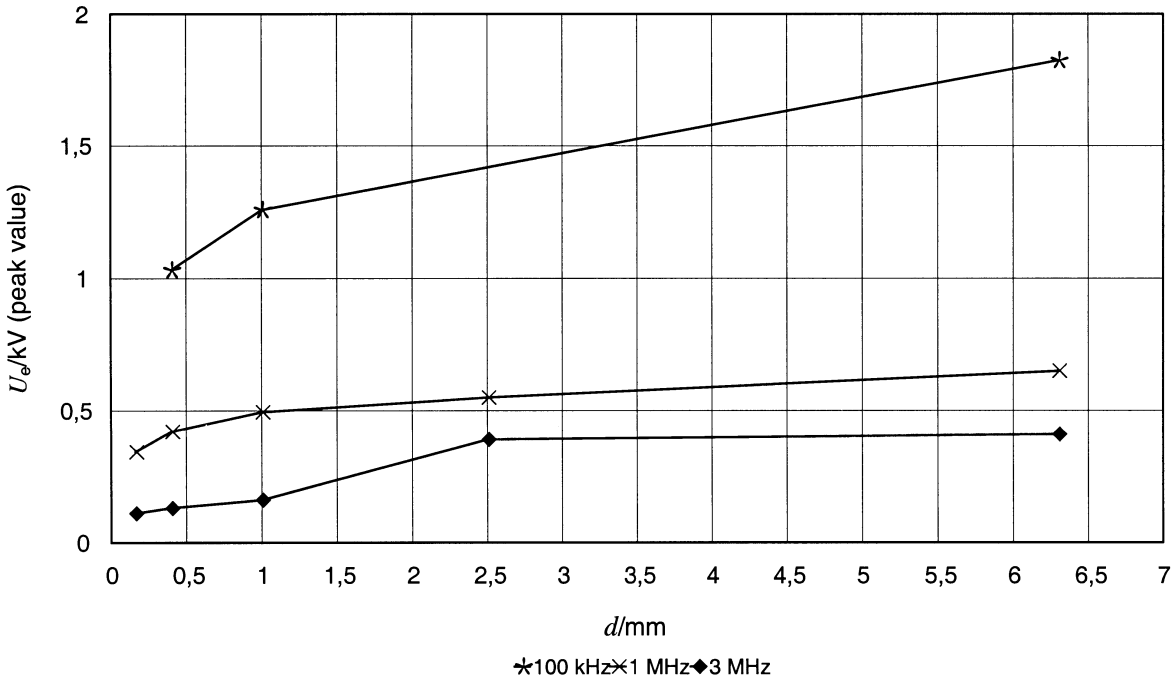


Légende

d ligne de fuite

Figure B.3 – Résultats d'essai de la tension de claquage U_b des lignes de fuite jusqu'à 6,3 mm [6]

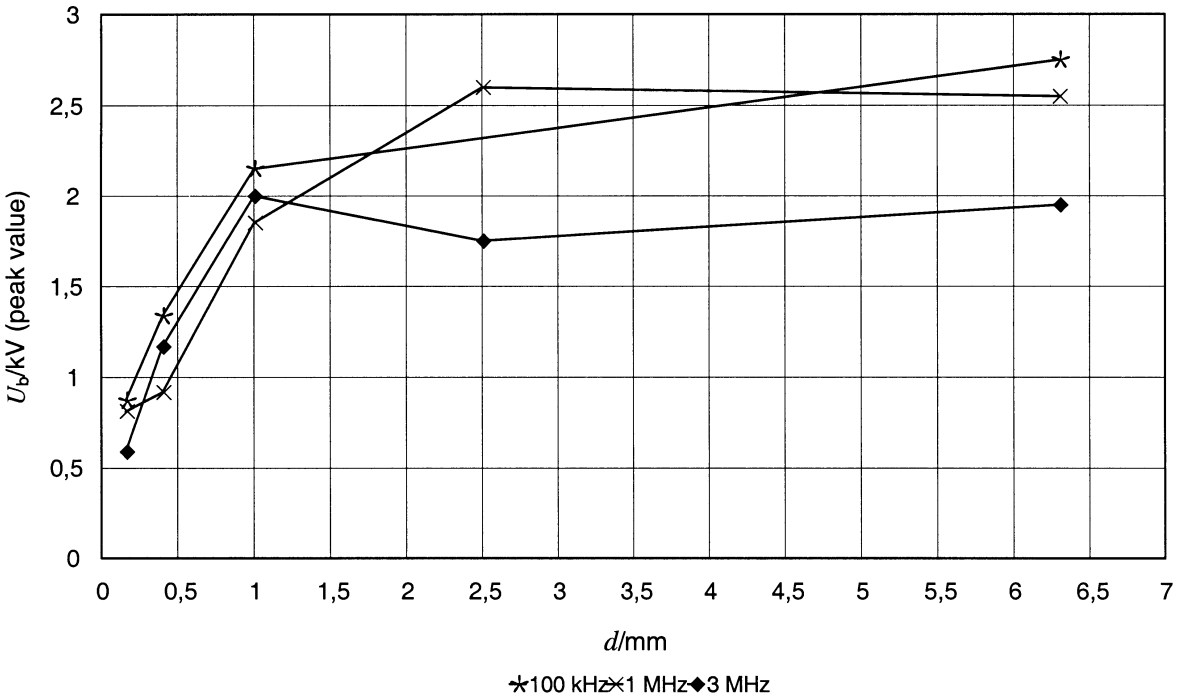
Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale



IEC 1356/05

Key
d creepage distance

Figure B.2 – Test results of the PD extinction voltage U_e of creepage distances up to 6,3 mm [6]



IEC 1357/05

Key
d creepage distance

Figure B.3 – Test results of the breakdown voltage U_b of creepage distances up to 6,3 mm [6]

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Annexe C
(informative)

Caractéristiques d'isolement de l'isolation solide sous des tensions à haute fréquence

C.1 Mécanisme de dégradation de l'isolation solide

Par rapport aux distances d'isolement dans l'air, l'isolation solide peut fournir une intensité du champ électrique au claquage qui est au moins à un niveau de grandeur supérieur. Cependant, il y a une grande dépendance de l'intensité du champ électrique au claquage sur les paramètres tels que l'épaisseur de l'isolation, la température du matériau isolant et la durée des contraintes électriques [10]. Il faut également considérer les influences spécifiques au matériau liées à la composition et au traitement. En général, on peut dire que pour une épaisseur d'isolation relativement petite (<0,1 mm) et pour une contrainte à court terme, des intensités du champ électrique au claquage très élevées de l'ordre de 100 kV/mm peuvent être obtenues à la fréquence industrielle.

Cependant, en pratique, l'intensité du champ électrique au claquage élevée de l'isolation solide ne peut, de loin, être utilisée. Provoquées par des cavités dans le matériau lui-même ou par des inclusions gazeuses dans les systèmes d'isolation en couches, des décharges partielles (DP) se produiront bien en dessous de la tension de claquage. Par là-même, le gaz dans la cavité devient conducteur pour une courte durée; l'isolation est cependant maintenue par la partie restante de l'isolation solide. Etant donné que, pendant les décharges partielles dans la cavité, un claquage de l'air (ou de gaz similaires) se produit, des intensités du champ électrique au claquage relativement faibles s'appliquent. Une autre aggravation résulte du fait que, pour une contrainte de tension alternative due à une distribution de tension capacitive et conformément à la constante diélectrique relativement élevée de l'isolation solide, la fraction la plus grande de la tension est appliquée dans la cavité remplie de gaz. L'isolant gazeux avec son intensité du champ électrique au claquage plus faible subit ainsi même plus de contraintes.

Par conséquent, dans les systèmes d'isolation réels, des décharges partielles peuvent se produire bien en dessous de la tension de claquage. A long terme, celles-ci conduisent à la destruction de presque tous les matériaux isolants solides [11]. Comme le montre l'exemple suivant, la durée jusqu'à la défaillance de l'isolation dans des conditions défavorables est si courte que même pendant les essais à haute tension à la fréquence industrielle, la détérioration de l'isolation solide est possible.

A titre d'exemple, une carte de circuit imprimé recouverte d'un film isolant [12] est considérée, la contrainte étant appliquée entre un conducteur et une soudure avoisinante à une distance nominale de 0,4 mm. En appliquant une haute tension, des décharges partielles élevées existent sous le film isolant (revêtement), ce qui entraîne finalement la destruction de l'échantillon d'essai. Cela est représenté à la Figure C.1 pour une tension d'essai de fréquence industrielle constante U_t de 3,15 kV (valeur efficace). Cette tension d'essai est déjà 45 % au-dessus de la tension de seuil de DP de 2,2 kV (valeur efficace). En raison du matériau isolant de haute qualité, l'échantillon d'essai pourrait résister à cette contrainte pendant environ 37 min en dépit d'intensités de DP q dans la gamme de nanocoulombs.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Annex C
(informative)

Insulation characteristics of solid insulation at high-frequency voltages

C.1 Degradation mechanism of solid insulation

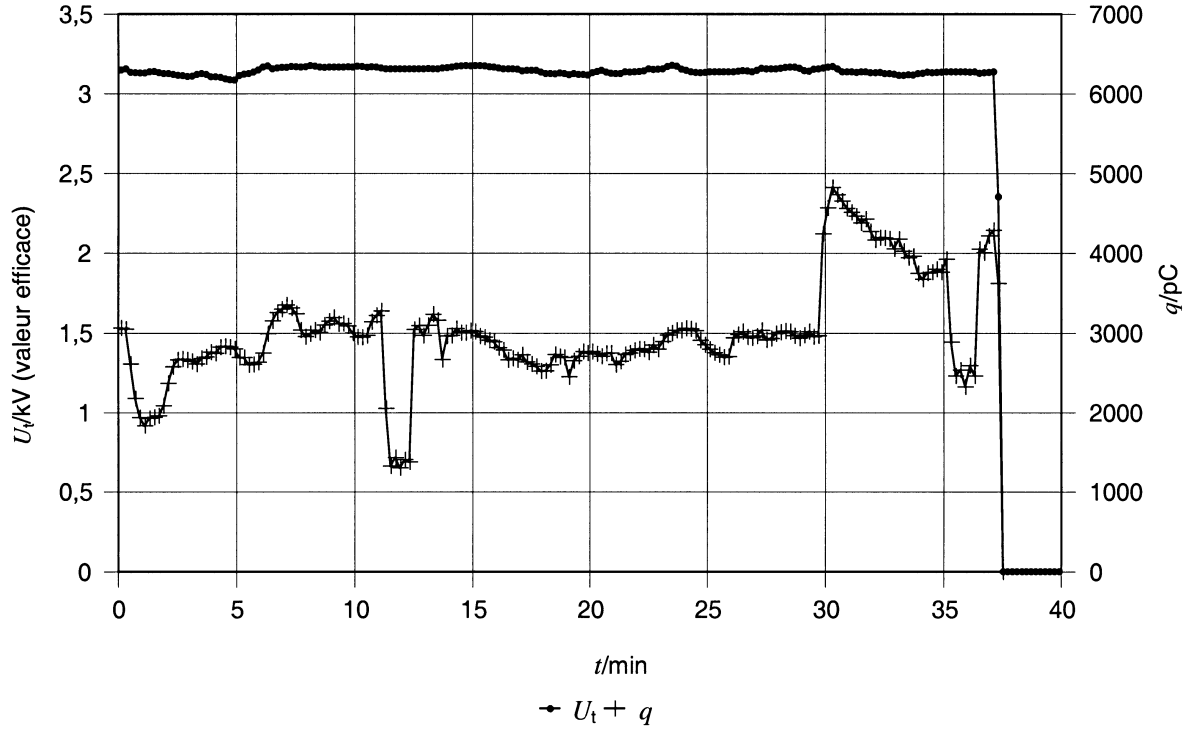
Compared to clearances in air, solid insulation can provide a breakdown field strength that is at least one order of magnitude higher. However there is a large dependency of the breakdown field strength on parameters such as thickness of insulation, temperature of the insulating material and duration of electrical stress [10]. Material specific influences related to composition and processing must also be considered. In general one can say, that for relatively small insulation thickness (<0,1 mm) and for short-time stress very high breakdown field strengths in the order of 100 kV/mm can be obtained at power frequency.

However, in practical use, the high breakdown field strength of solid insulation cannot by far be utilized. Caused by cavities in the material itself or by gas gaps within layered insulation systems partial discharges (PD) will occur far below the breakdown voltage. Thus, the gas within the cavity becomes conductive for a short period of time; the insulation however is maintained by the remaining part of the solid insulation. Since during the partial discharge within the cavity a breakdown of air (or similar gases) occurs, relatively low breakdown field strengths apply. A further aggravation results from the fact that for a.c. voltage stress due to capacitive voltage distribution and, according to the relatively high dielectric constant of solid insulation, the larger fraction of the voltage is applied across the gas filled cavity. Thereby the insulating gas with its lower breakdown field strength is even more stressed.

Therefore in real insulation systems partial discharges can occur far below the breakdown voltage. In the long run these lead to destruction of nearly all solid insulating materials [11]. As shown in the following example, the time duration until insulation failure under unfavourable conditions is so short, that even during power-frequency high-voltage tests deterioration of solid insulation is possible.

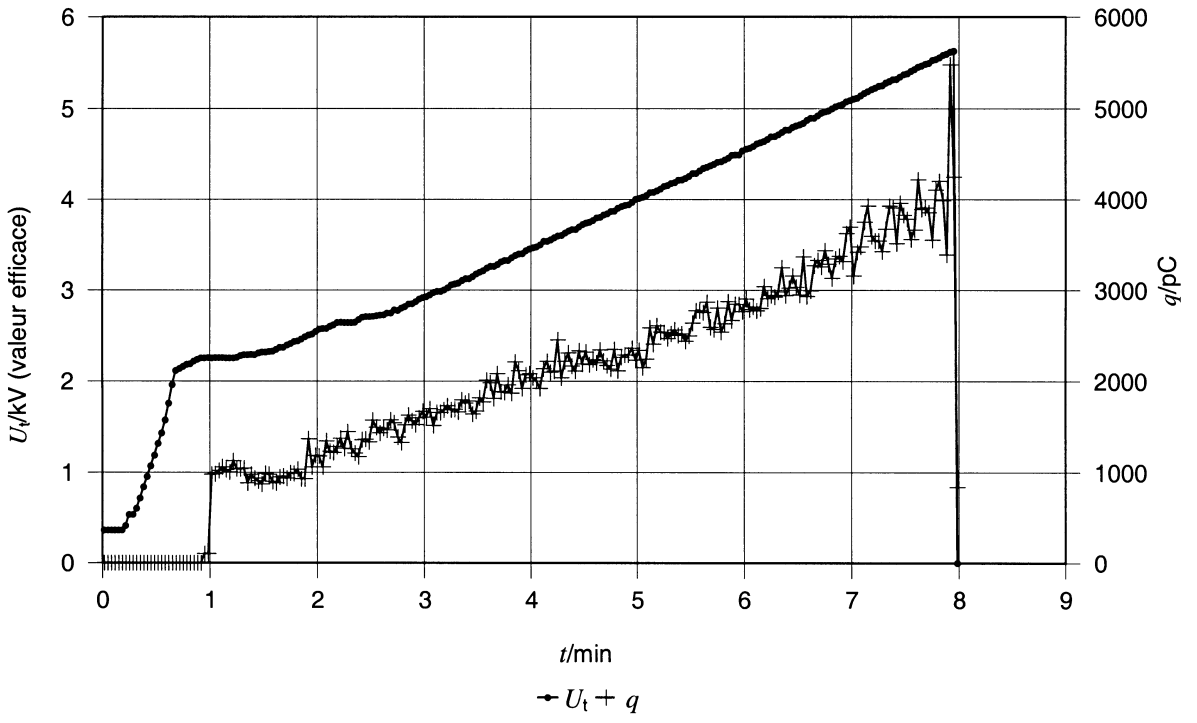
As an example a printed circuit board covered by an insulating film [12] is considered, where the stress is applied between a conductor and a neighbouring soldering pad at a nominal distance of 0,4 mm. When applying a high voltage, strong partial discharge exists underneath the insulating film (coating) which finally results in the destruction of the test sample. This is shown in Figure C.1 for a constant power-frequency test voltage U_t of 3,15 kV (r.m.s.). This test voltage is already 45 % above the PD-inception voltage of 2,2 kV (r.m.s.). Due to the high quality insulating material the test sample could withstand this stress for approximately 37 min in spite of PD-strengths q in the range of nanocoulombs.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale



IEC 1358/05

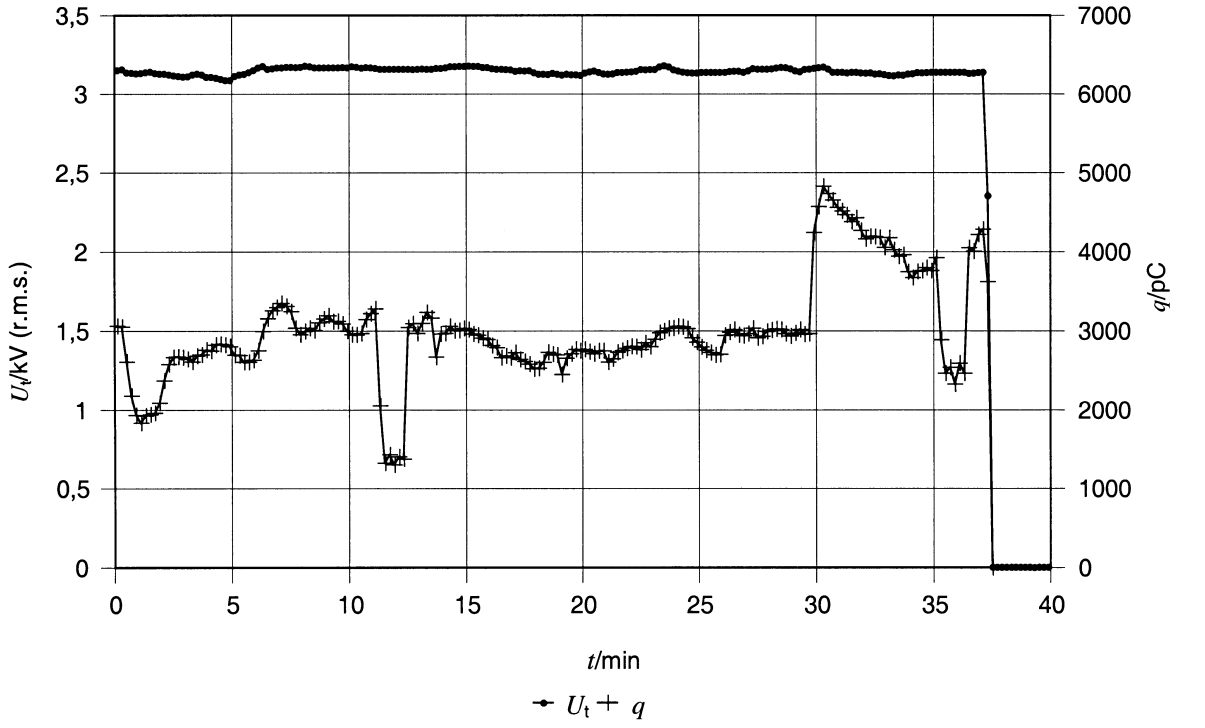
Figure C.1 – Capacité de tenue aux DP des revêtements; tension d'essai constante U_t (f = 50 Hz) [12]



IEC 1359/05

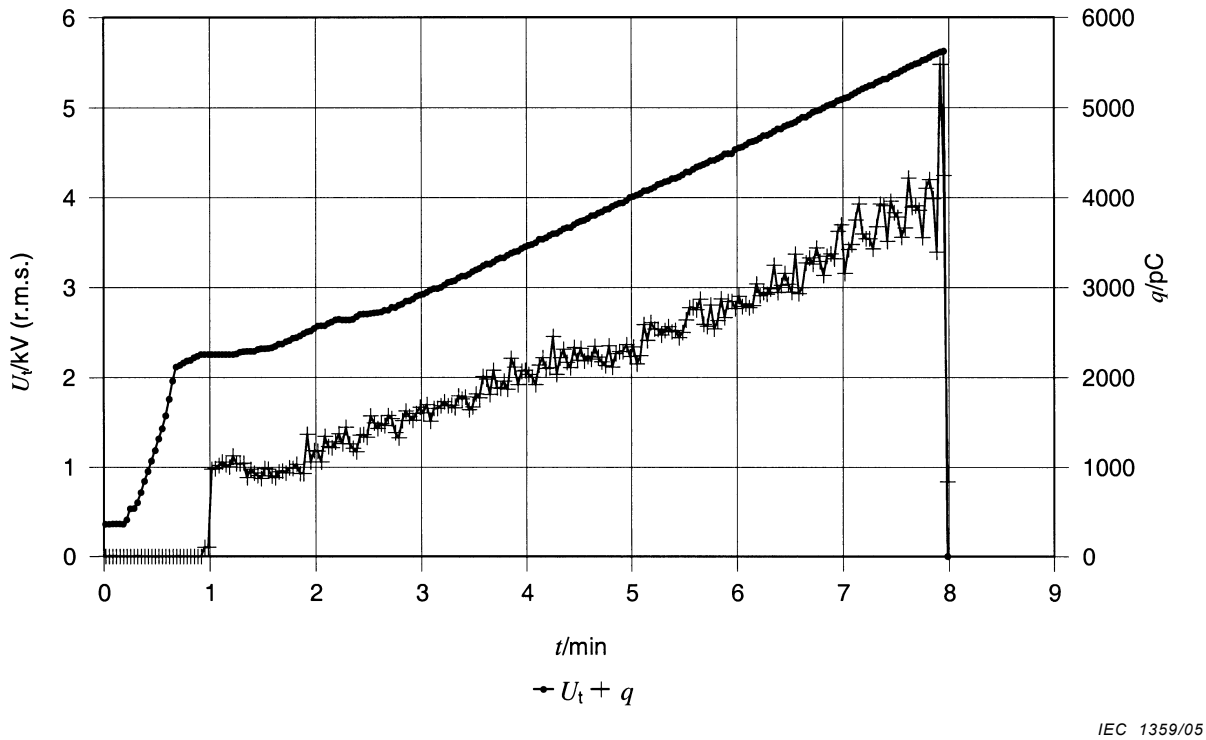
Figure C.2 – Capacité de tenue aux DP des revêtements; tension d'essai à augmentation linéaire U_t (f = 50 Hz) [12]

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale



IEC 1358/05

Figure C.1 – PD withstand capability of coatings; constant test voltage U_t (f = 50 Hz) [12]



IEC 1359/05

Figure C.2 – PD withstand capability of coatings; linearly increasing test voltage U_t (f = 50 Hz) [12]

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

A la Figure C.2, l'échantillon d'essai subit des contraintes par une tension d'essai à fréquence industrielle à augmentation presque linéaire U_t, avec un taux d'augmentation initial d'environ 4 kV par minute. Le seuil de DP à 2,2 kV (valeur efficace) est clairement visible. L'apparition immédiate d'une intensité de DP très élevée est typique de ces échantillons d'essai. L'intensité de DP et le taux d'impulsions de DP sont approximativement proportionnels à la valeur de la tension d'essai. L'échantillon ne peut résister à cette contrainte apparemment plus élevée que pendant environ 7 min. Cet exemple montre très clairement que même pour des tensions à fréquence industrielle, les décharges partielles peuvent avoir un potentiel très destructeur pendant une durée relativement courte.

De plus, pendant les conditions réelles d'application, il convient de considérer que toutes les contraintes et leurs effets néfastes qui se produisent pendant la durée de vie du matériel sont cumulatifs. Les contraintes électriques, thermiques [13] et également mécaniques sont superposées, conformément à des règles précédemment peu connues. La simulation de ces effets à long terme par des essais à court terme appropriés est une tâche très difficile. Cela ne peut être obtenu que par une combinaison d'essais électriques et un conditionnement approprié de l'éprouvette. Pour des méthodes de conditionnement adaptées, voir 4.1.2.1 de la Partie 1.

Ces contraintes influencent l'apparition de décharges partielles [14] et leur effet néfaste lié à l'échauffement diélectrique provoque une réduction considérable de l'intensité de claquage [15]. Il est assuré que, comme il a déjà été démontré par les essais accélérés [16], l'effet néfaste dû aux décharges partielles augmente avec la fréquence de la tension.

L'accélération la plus précise peut être réalisée pour une contrainte purement thermique (loi d'Arrhenius [17]). Cependant, même cela ne peut être simulé que s'il provoque un vieillissement chimique (oxydation). Si, cependant, le mécanisme de détérioration change (par exemple, ramollissement/écoulement lors de températures considérablement augmentées) pendant la contrainte accélérée, la méthode d'accélération n'est plus autorisée. En cas de contrainte thermique, cela peut être facilement prévu et évité. Cependant, en appliquant une contrainte électrique augmentée pour obtenir l'accélération, une modification du mécanisme de détérioration est susceptible de se produire [18].

Deux mécanismes de défaillance de l'isolation solide sont normalement pris en compte. Un mécanisme de défaillance est dû aux pertes diélectriques à des niveaux de contrainte électrique élevés. Un échauffement plus important apparaît, pouvant entraîner une instabilité thermique et un claquage thermique. Cela a généralement lieu en quelques minutes et peut être facilement vérifié. De plus, une isolation solide peut comporter des inclusions gazeuses ou des soufflures provoquées soit entre les couches de l'isolation ou à l'interface entre les pièces isolantes et les pièces conductrices, soit par un usinage imparfait du matériau d'isolation solide. Dans de telles conditions, des décharges partielles peuvent entraîner une défaillance éventuelle de l'isolation solide même si la contrainte diélectrique est suffisamment faible pour ne pas entraîner un claquage thermique.

Pour l'isolation solide, la fréquence de la tension est un facteur d'influence très important. La perte diélectrique à une fréquence donnée est obtenue à partir de l'Equation suivante:

$$P_v = 2\pi f U^2 C \tan\delta \qquad \text{(C.1)}$$

où

P_v est la puissance de dissipation;

f est la fréquence de la tension;

U est la valeur efficace de la tension appliquée à l'isolation solide;

C est la capacité de la disposition d'isolation;

$\tan\delta$ est le facteur de perte diélectrique du matériau d'isolation.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

In Figure C.2, the test sample is stressed by an approximately linearly increasing power-frequency test voltage U_t, with an initial rate of rise of approximately 4 kV per minute. The PD-inception at 2,2 kV (r.m.s.) is clearly visible. Typical for these test samples is the immediate occurrence of very high PD-intensity. PD-intensity and PD-impulse rate are approximately proportional to the value the test voltage. The sample can withstand this apparently much higher stress only for about 7 min. This example shows very clearly, that even for power-frequency voltages partial discharges can have a highly destructive potential during a relatively short period of time.

In addition during real life applications it has to be considered, that all stresses and their damaging effects that occur during the lifetime of the equipment are cumulative. Electrical, thermal [13] and also mechanical stresses are superimposed according to previously little known rules. Simulation of these long term effects through appropriate short time tests is a very difficult task. This can only be achieved through a combination of electrical tests and appropriate conditioning of the test specimen. For suitable conditioning methods, see 4.1.2.1 of Part 1.

These stresses influence the occurrence of partial discharges [14] and their damaging effect combined with dielectric heating cause a drastic reduction of the breakdown strength [15]. It is assured, that, as already demonstrated by time accelerated testing [16], the damaging effect due to partial discharges increases with the frequency of the voltage.

The most accurate time-acceleration can be made for pure thermal stress (Arrhenius law [17]). However even this can only be simulated, if it causes chemical ageing (oxidation). If however the deterioration mechanism changes (for example softening/flowing during drastically increased temperatures) during the accelerated stress, the time acceleration method is no longer permitted. In case of thermal stress this can easily foreseen and avoided. However, when applying increased electrical stress to achieve time-acceleration, a change of the deterioration mechanism is likely to occur [18].

Two failure mechanisms of solid insulation are normally relevant. One failure mechanism results from dielectric loss at high electric stress. Increased heating will occur, which can lead to thermal instability and thermal breakdown. This usually takes place within a few minutes and can be easily verified. Additionally, solid insulation can include gas gaps or voids, either caused by different layers of insulation, interfaces between insulating parts and conductive parts, or by imperfect manufacturing of the insulation material. In such small gaps, partial discharges are likely to cause eventual failure of solid insulation even if the dielectric stress is sufficiently low so as not to cause thermal breakdown.

For solid insulation, the frequency of the voltage is a very important influencing factor. The dielectric loss for a given frequency is obtained from the following Equation:

$$P_v = 2\pi f U^2 C \tan\delta \qquad \text{(C.1)}$$

where

P_v is the power dissipation;

f is the frequency of the voltage;

U is the r.m.s. value of the voltage across the solid insulation;

C is the capacitance of the insulation arrangement;

$\tan\delta$ is the dielectric loss factor of the insulation material.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

7En raison de la dépendance du facteur de perte tanδ avec la fréquence, l'influence de la fréquence sur la perte diélectrique peut être inférieure ou supérieure à celle pouvant être obtenue si la dépendance est linéaire. Cela peut entraîner une probabilité plus grande de claquage thermique et une réduction de la capacité de tenue diélectrique à court terme.

Il ne semble pas être possible de simuler les effets des contraintes à haute fréquence sur l'isolation solide. La présence de niveaux élevés d'un tel type de contrainte nécessitera ainsi en général les essais de l'isolation solide avec la tension à haute fréquence. Les résultats expérimentaux suivants doivent donner des informations sur les valeurs de l'intensité du champ électrique qui représentent une contrainte élevée à une fréquence particulière, de telle sorte qu'un essai avec une tension à haute fréquence sera nécessaire.

C.2 Résultats expérimentaux

Des caractéristiques de claquage à haute fréquence ont été testées sur divers matériaux isolants [15]. Les résultats les plus importants sont représentés à la Figure C.3. Pour une fréquence de 1 MHz, l'intensité du champ électrique au claquage à court terme E_b ne représente que 10 % de la fréquence industrielle. L'intensité du champ électrique au claquage ne semble pas atteindre une limite plus faible, même à des fréquences aussi élevées que 100 MHz.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Due to the dependency of the loss factor $\tan\delta$ on frequency, the influence of frequency on the dielectric loss can be lower or higher than can be expected from the apparent linear dependency. This can result in a higher probability of thermal breakdown and a reduction of the short-time dielectric withstand capability.

It does not seem to be possible to simulate the effects of high-frequency stress on solid insulation. So the presence of high levels of such kind of stress in general will require testing of solid insulation with high-frequency voltage. The following experimental results shall give some information about those values of the electrical field strength that represent a high stress at a peculiar frequency so that a test with high-frequency voltage will be required.

C.2 Experimental results

High-frequency breakdown characteristics have been investigated on different insulating materials [15]. The most important results are shown in Figure C.3. For a frequency of 1 MHz, the short-time breakdown field strength E_b is only 10 % of the power-frequency value. The breakdown field strength does not seem to reach a lower limit even at frequencies as high as 100 MHz.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

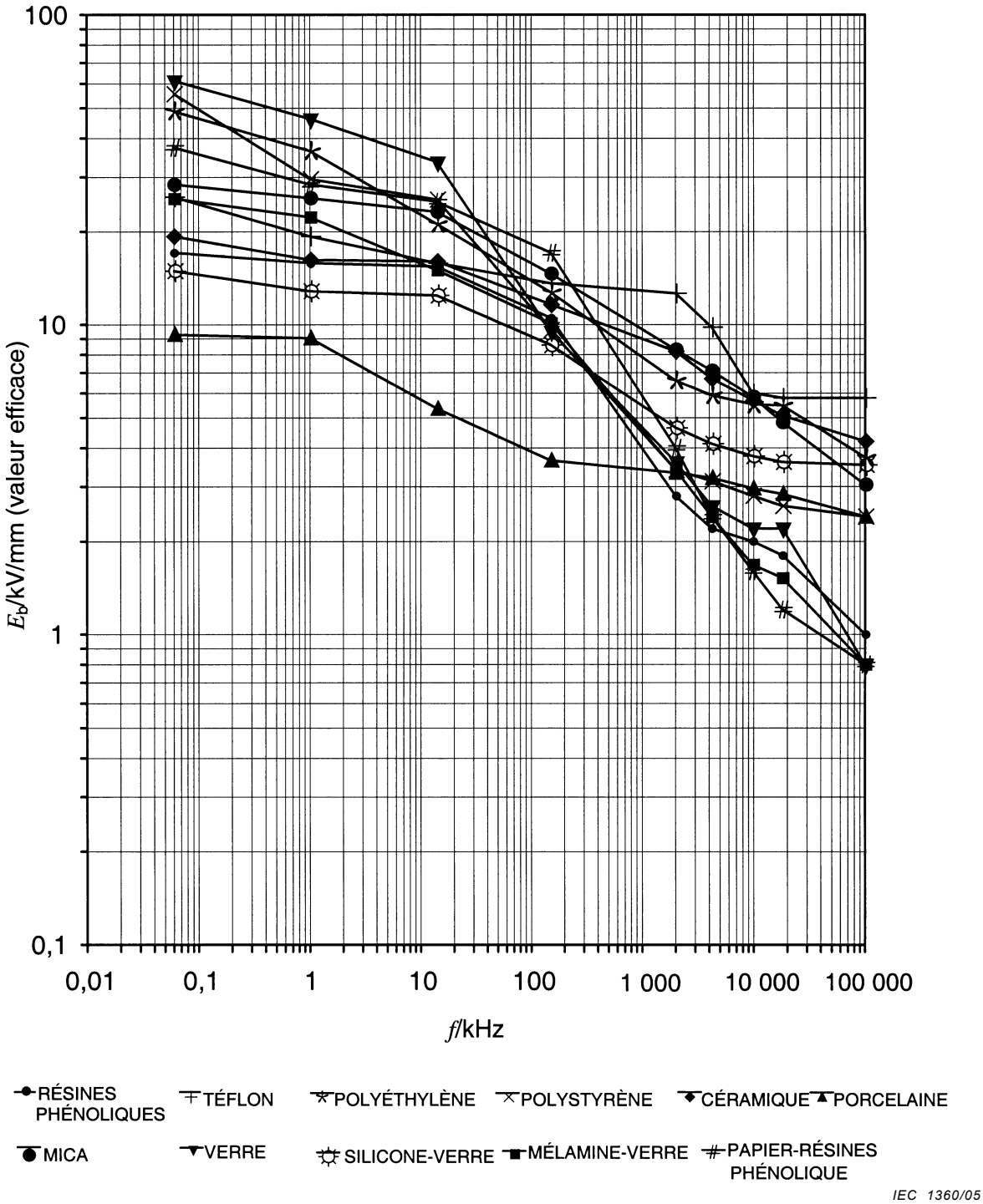


Figure C.3 – Claquage à haute fréquence, isolation solide; d = 0,75 mm [15]

En général, et particulièrement pour les tensions à haute fréquence, la rigidité diélectrique de l'isolation solide est davantage réduite par l'influence de l'humidité et de la température.

L'influence du stockage à long terme sur l'intensité du champ électrique au claquage de l'isolation solide sous des tensions à haute fréquence et sous forte humidité est représentée à la Figure C.4 [19]. Spécialement pour des résines phénoliques micacées, la réduction de l'intensité du champ électrique au claquage est extraordinairement élevée. Cela est déjà un problème grave pour des fréquences industrielles, mais cela s'aggrave davantage pour une augmentation de fréquence. La raison est la capacité d'absorption plutôt élevée des résines phénoliques micacées, laquelle est de l'ordre de 1 % du poids dans de telles conditions.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

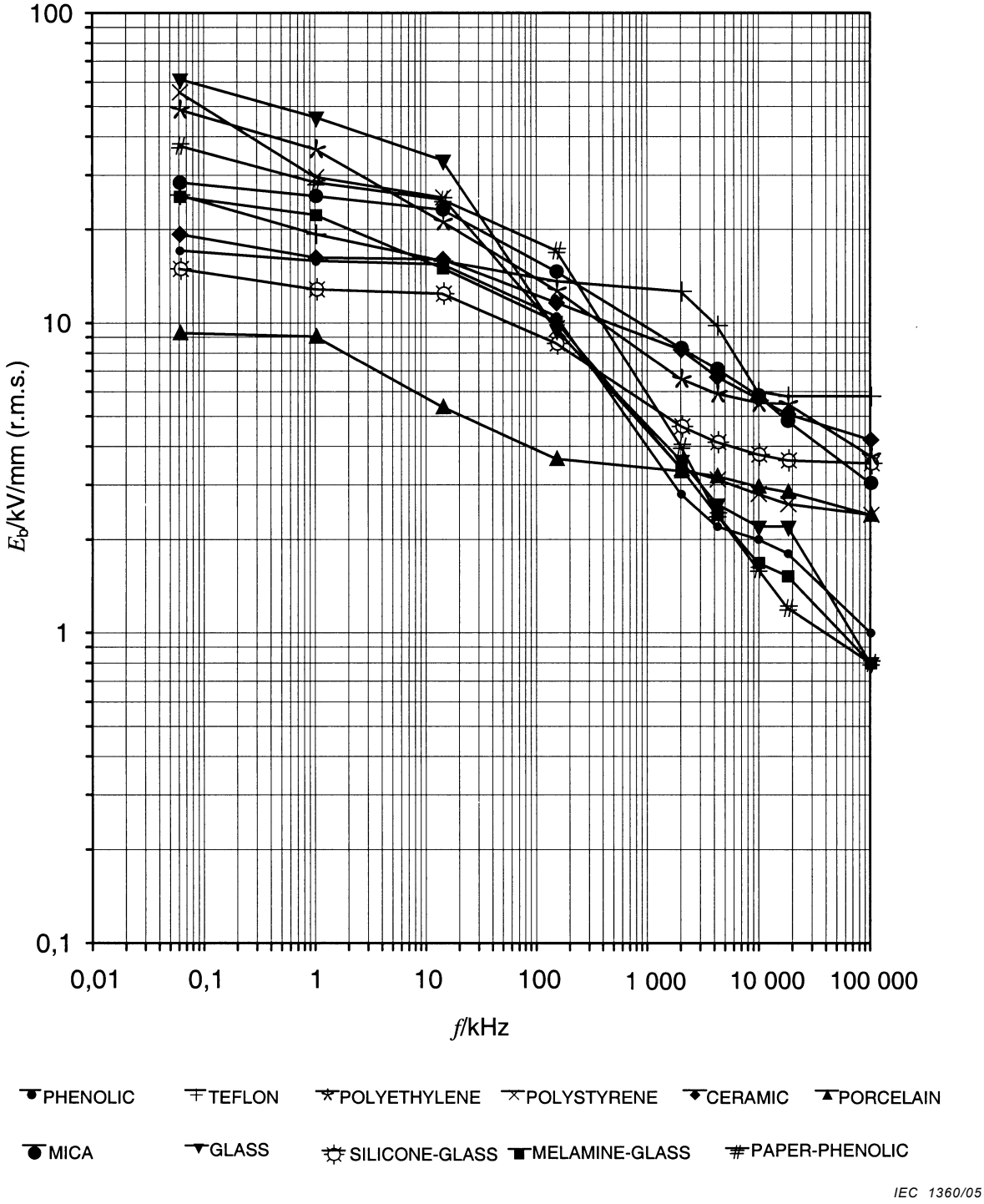


Figure C.3 – Breakdown at high frequency, solid insulation; d = 0,75 mm [15]

The dielectric strength of solid insulation in general, and especially at high-frequency voltage, is further reduced by the influence of humidity and temperature.

The influence of long-time storage under high humidity conditions on the breakdown field strength of solid insulation at high-frequency voltage is shown in Figure C.4 [19]. The reduction of the breakdown field strength of mica-filled phenolic is extraordinarily high. This is already a significant problem at power-frequency, but is further aggravated with increasing frequency. The poor performance of mica-filled phenolic is caused by its comparatively high water absorption, which was found to be in the order of 1 % by weight under such conditions.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Dans les mêmes conditions, l'absorption d'eau des stratifiés silicone-verre est seulement de 0,3 % de la masse.

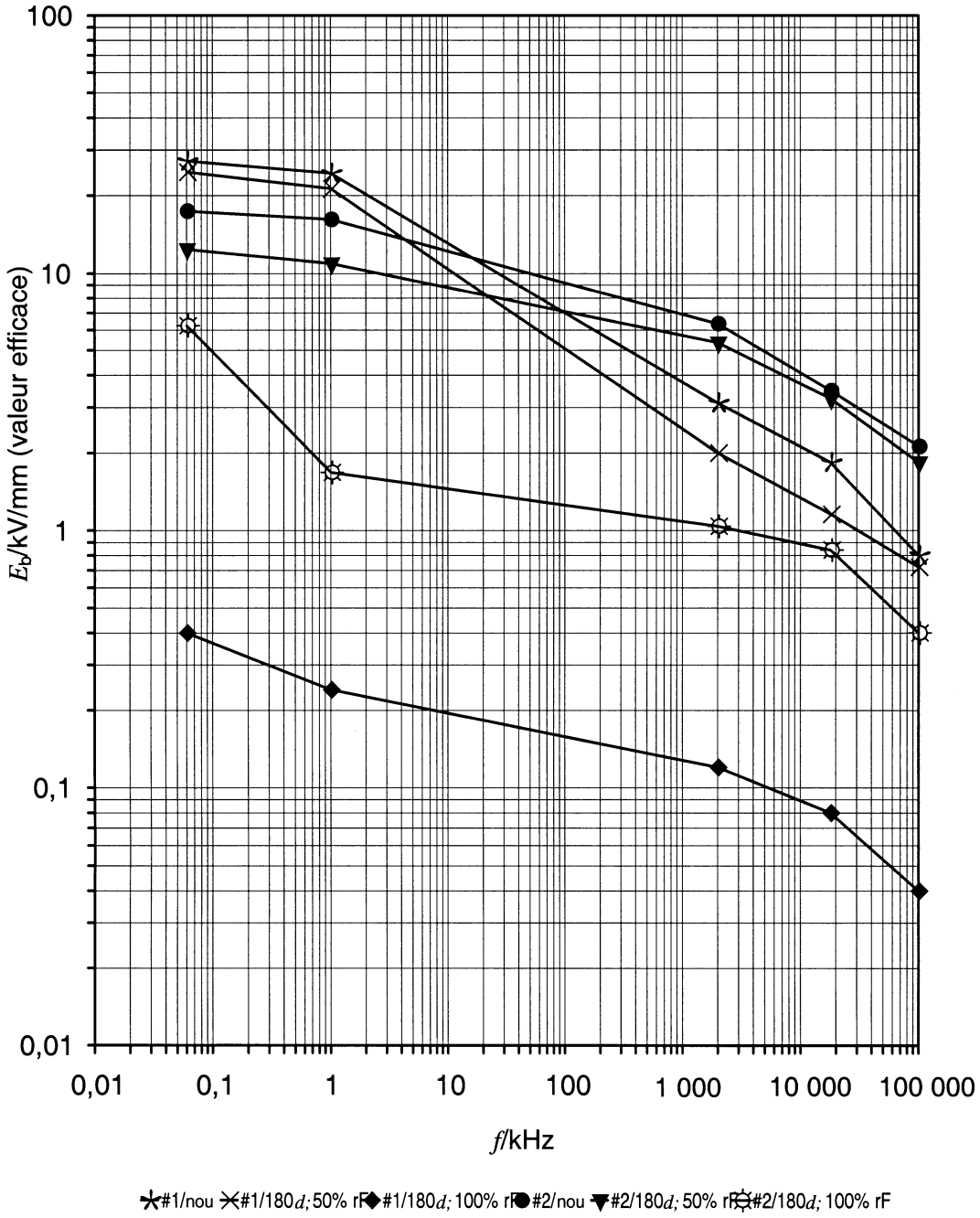
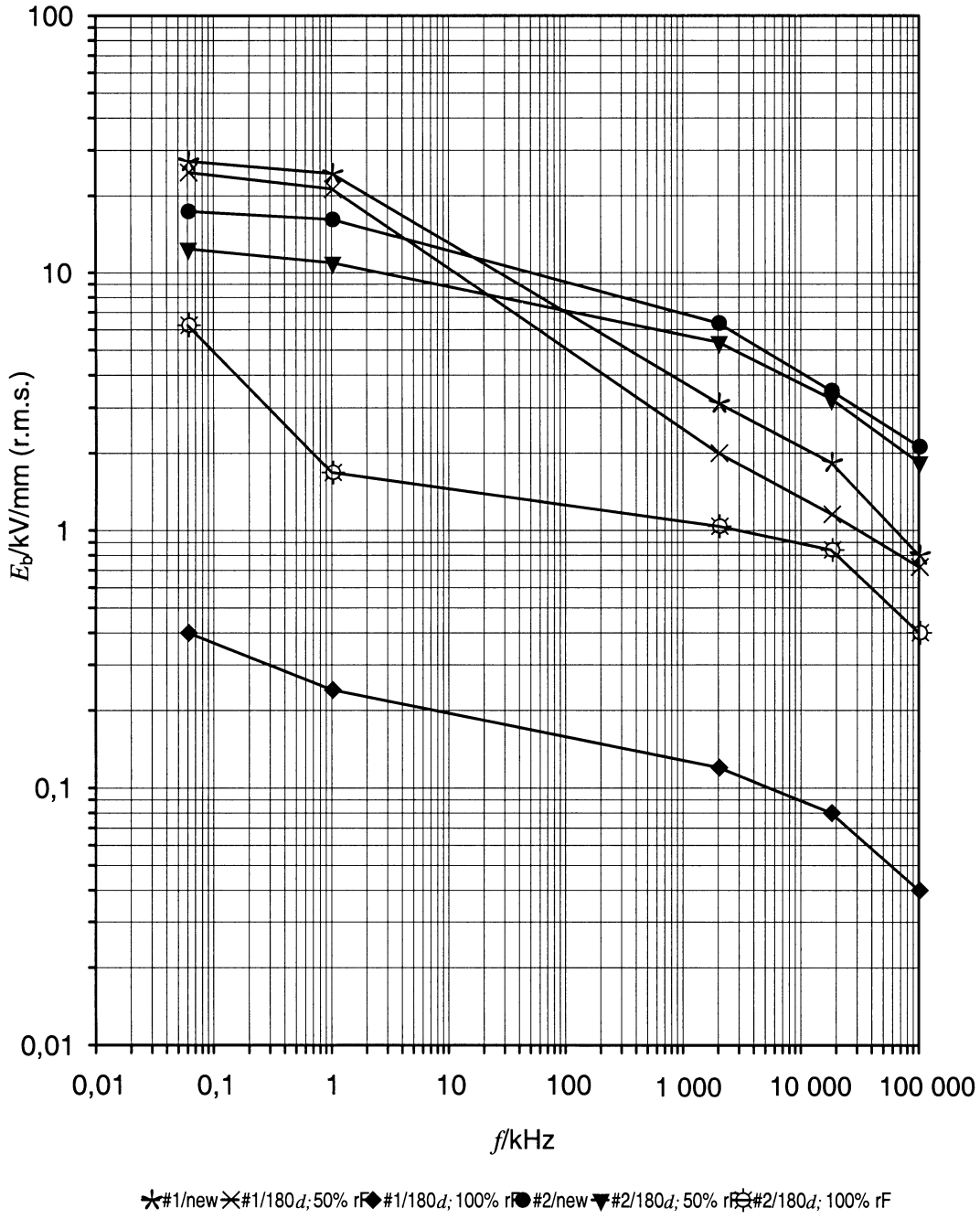


Figure C.4 – Claquage à haute fréquence, isolation solide, influence de l'humidité; conditionnement à 50 °C; #1: résines phénoliques micacées, d = 0,75 mm; #2: stratifiés silicone-verre, d = 1,5 mm [19]

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Under the same conditions, the water absorption of glass-silicone laminate was only 0,3 % by weight.



IEC 1361/05

Figure C.4 – Breakdown at high frequency, solid insulation, influence of humidity; conditioning at 50 °C; #1: mica-filled phenolic, d = 0,75 mm; #2: glass-silicone laminate, d = 1,5 mm [19]

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

L'intensité du champ électrique au claquage de l'isolation solide est fonction de l'épaisseur du matériau et les films de très faible épaisseur peuvent présenter des intensités du champ électrique au claquage supérieures de l'ordre d'une magnitude à celles des éprouvettes de 0,75 mm d'épaisseur. Cela est démontré à la Figure C.5 [20]. Avec l'augmentation de la fréquence, cependant, il existe également une réduction significative des valeurs. A 1 MHz, les valeurs de claquage ne représentaient qu'environ 10 % des valeurs à 50 Hz. Cette réduction est comparable à celle d'éprouvettes d'environ 1 mm d'épaisseur. Ainsi, tout dimensionnement conformément à l'épaisseur de l'isolation solide doit prendre en compte cette dépendance de l'intensité du champ électrique au claquage sur l'épaisseur de l'isolation.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

The breakdown field strength of solid insulation is a function of the thickness of the material, and very thin films can have a breakdown field strength that can be up to one order of magnitude higher than that of the test specimen with 0,75 mm thickness. This is demonstrated in Figure C.5 [20]. With increasing frequency however, there is also a strong reduction of the values. At 1 MHz the breakdown values were only approximately 10 % of the 50 Hz values. This reduction is comparable to that of specimens having approximately 1 mm thickness. So any dimensioning according to thickness of solid insulation shall take into account this dependency of the breakdown field strength upon the thickness of the insulation.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

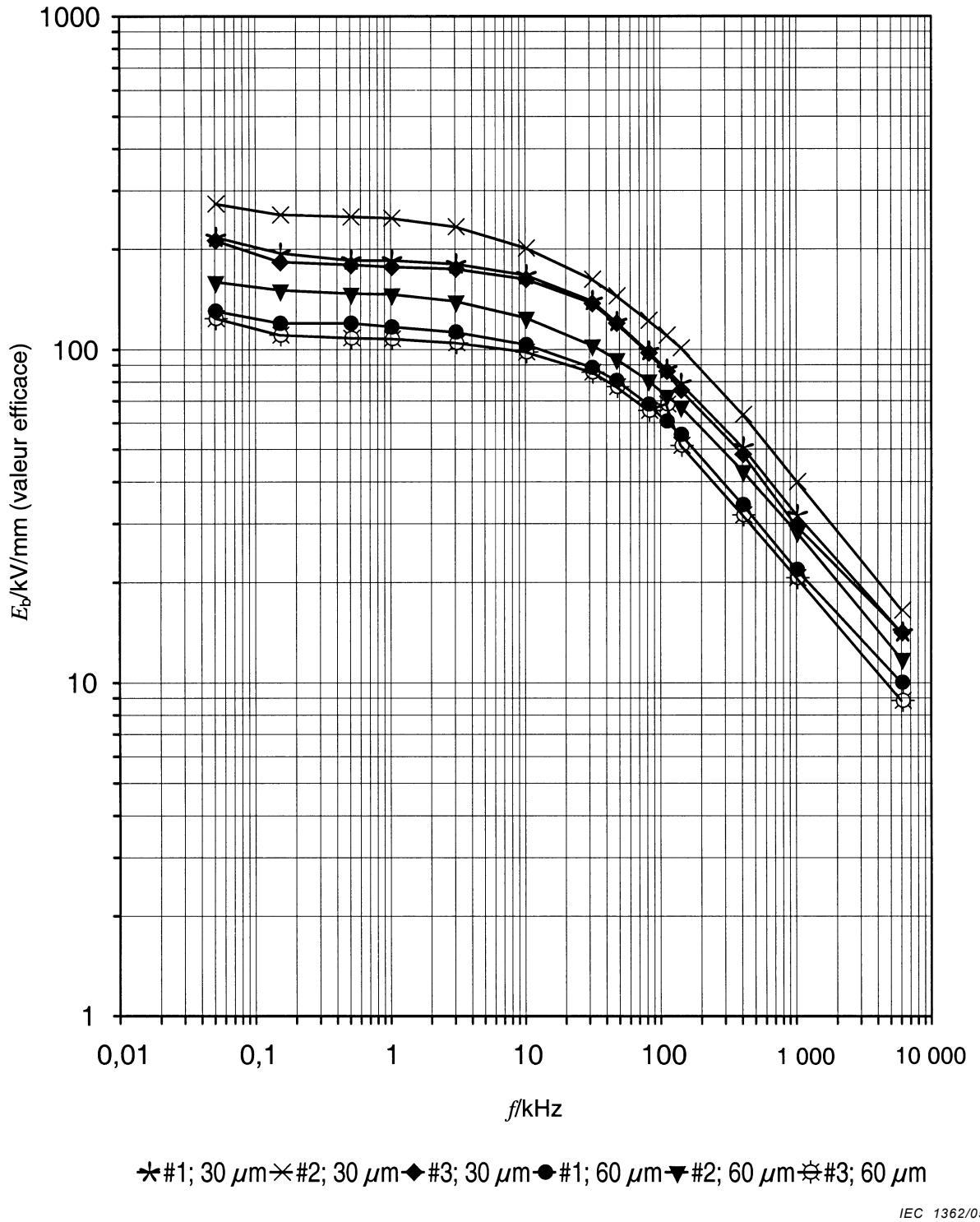


Figure C.5 – Claquage à haute fréquence, films isolants; #1: cellulose-acétobutyrate, #2: polycarbonate; #3: cellulose-triacétate [20]

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

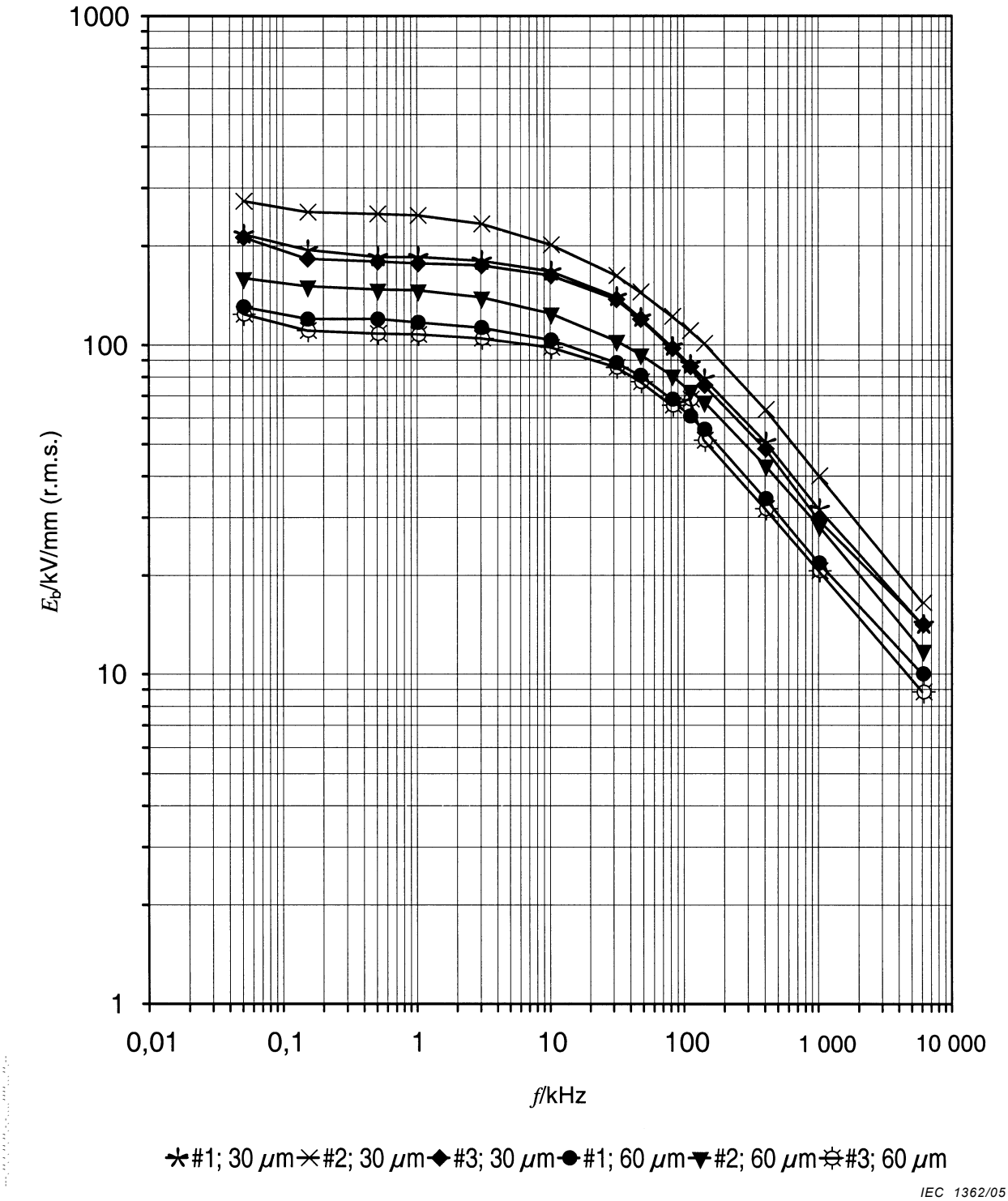


Figure C.5 – Breakdown at high frequency, insulating films; #1: cellulose-acetobutyrate, #2: polycarbonate; #3: cellulose-triacetate [20]

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

L’influence de la température sur la tension de claquage peut être vue à la Figure C.6 [20]. Par conséquent, la température est un facteur d’influence important, qui doit être pris en compte pour le dimensionnement et les essais.

Des résultats détaillés sur les caractéristiques de décharges partielles sous une tension à haute fréquence sont valables pour des fréquences jusqu'à quelques kHz [16] et [21]. Dans cette gamme de fréquences, il a été établi que le temps de défaut provoqué par les décharges partielles est inversement proportionnel à la fréquence. Cela a déjà été utilisé par des essais accélérés. C'est pourquoi, particulièrement pour les hautes fréquences de la tension, aucune durée de vie raisonnable d’isolation solide ne peut être définie quand apparaissent des décharges partielles.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

The influence of the temperature on the breakdown voltage can be seen in Figure C.6 [20]. Therefore the temperature is an important influencing factor, which shall be taken into account for dimensioning and testing.

Detailed results concerning the partial discharge characteristics at high-frequency voltage are available for frequencies up to a few kHz [16] and [21]. In that range, it has been established that the time to failure caused by partial discharges is inversely proportional to frequency. This relationship has already been used for accelerated testing. Therefore, especially at higher frequencies of the voltage, a reasonable lifetime of solid insulation cannot be expected when partial discharges occur.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

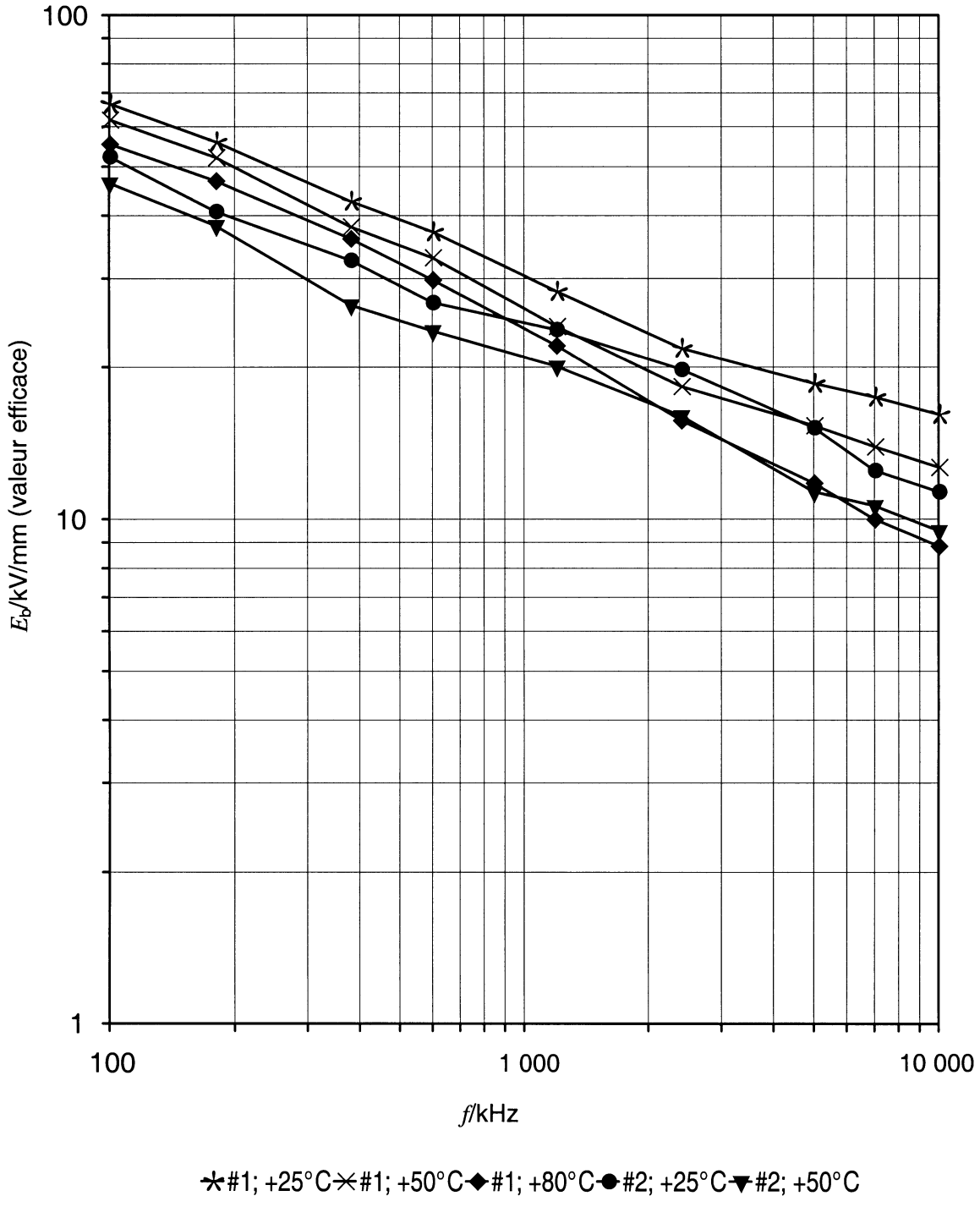


Figure C.6 – Claquage à haute fréquence, films isolants; #1: Polystyrène, d = 80 µm, #2: Polyéthylène, d = 50 µm [20]

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

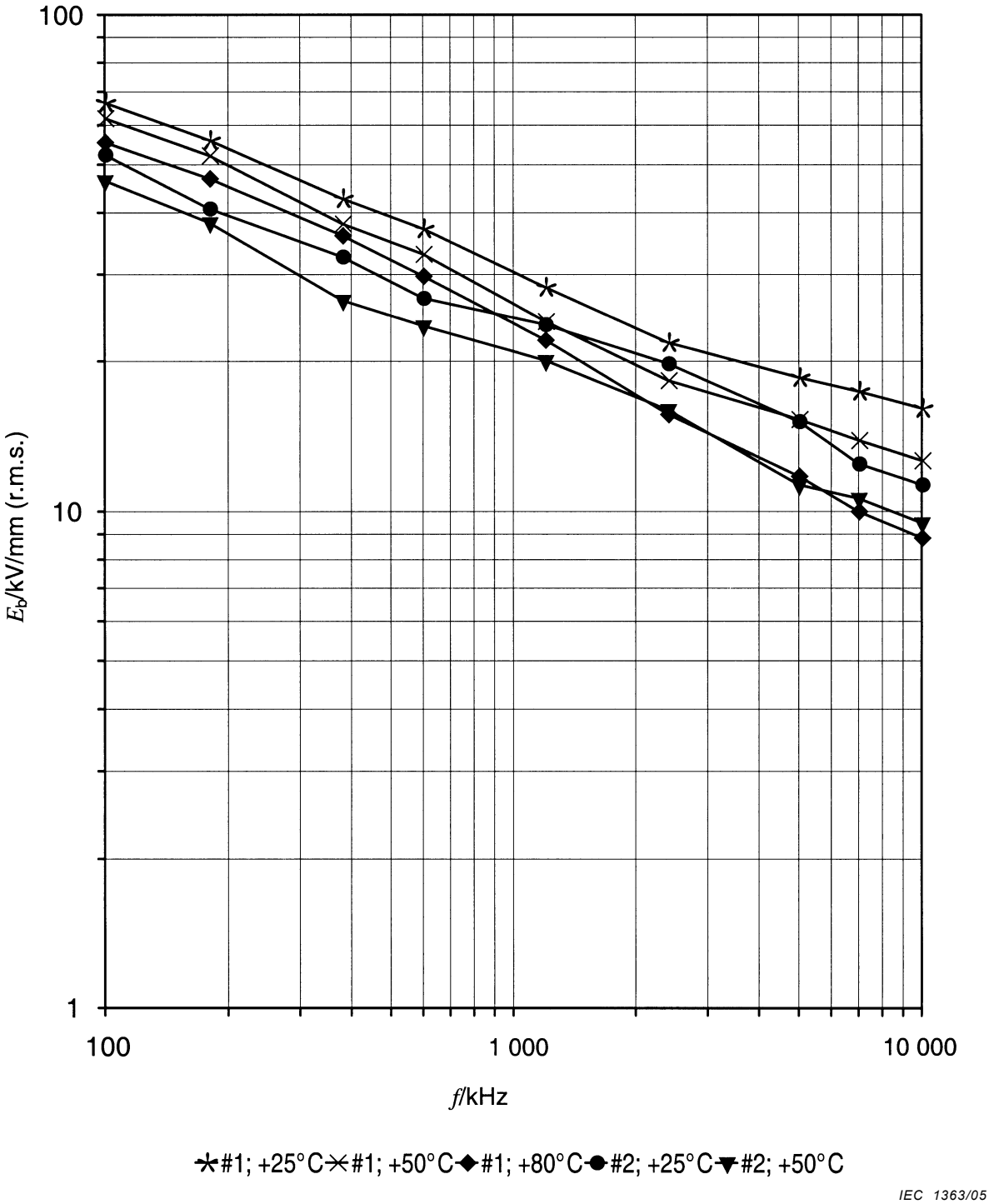


Figure C.6 – Breakdown at high frequency, insulating films; #1: Polystyrene, d = 80 µm, #2: Polyethylene, d = 50 µm [20]

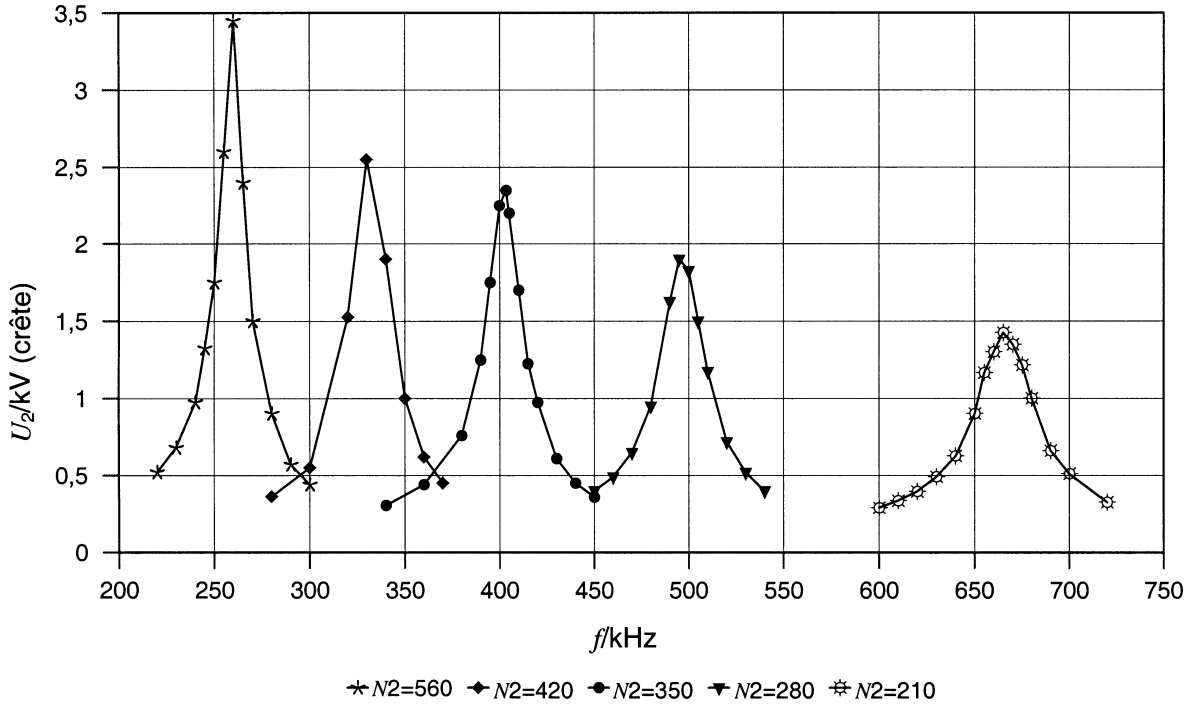
Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

Annexe D
(normative)

Essais de l'isolation sous des tensions à haute fréquence

D.1 Source de tension d'essai

Par rapport à tout type d'essai à haute tension à des fréquences bien supérieures à la fréquence industrielle, l'adaptation de sources de tension d'essai appropriées avec une fréquence ajustable est une question fondamentale.



IEC 1364/05

Figure D.1 – Transformateur à résonance à haute fréquence; influence du nombre de spires de la bobine secondaire N_2 sur la tension de sortie U_2; N_1 = 20; N_2 = 210/280/350/420/560 [22]

Des transformateurs à résonance à haute fréquence peuvent être utilisés avec des générateurs de puissance à haute fréquence à basse tension [22]. Les problèmes avec cette technique sont démontrés par les exemples présentés à la Figure D.1. Afin d'obtenir une fréquence de résonance élevée, le nombre de spires dans l'enroulement secondaire du transformateur doit être réduit, comme représenté à la Figure D.1. La tension de sortie disponible sera ainsi également réduite.

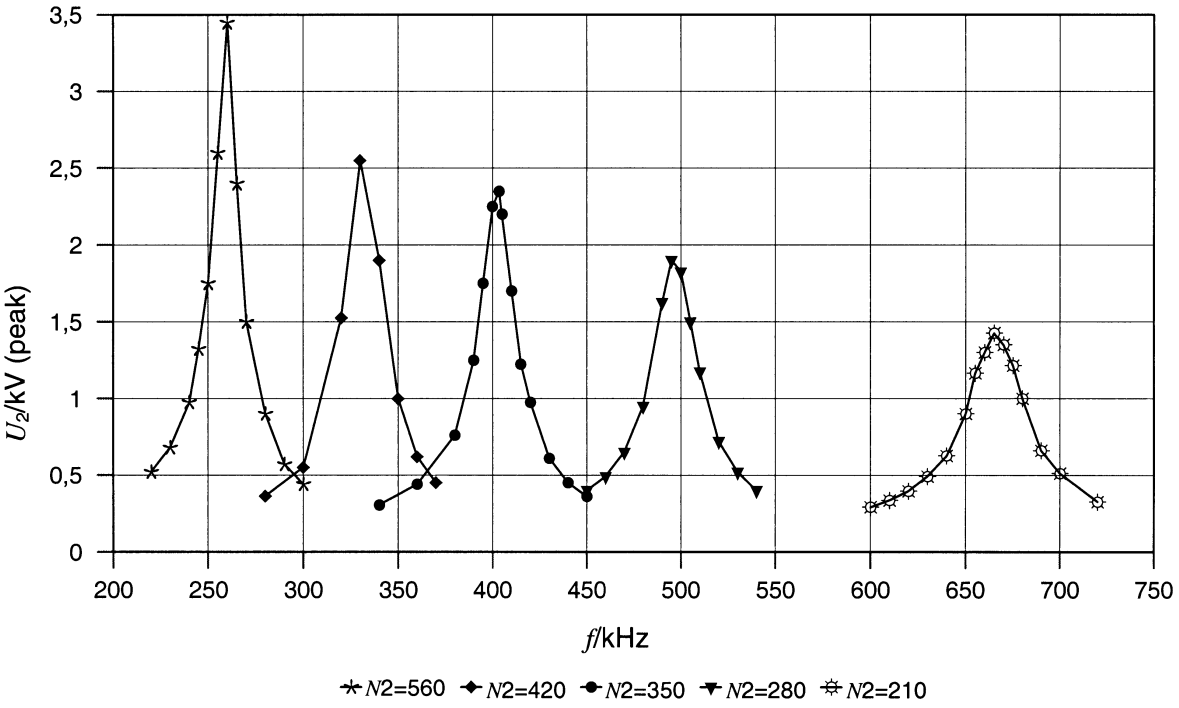
Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Annex D
(normative)

Testing of insulation at high-frequency voltages

D.1 Test voltage source

With respect to any kind of high-voltage testing at frequencies that are much higher than the power frequency the suitability of appropriate test voltage sources with adjustable frequency is a fundamental question.



IEC 1364/05

Figure D.1 – High-frequency resonance transformer; influence of the number of turns of the secondary coil N_2 on the output voltage U_2; N_1 = 20; N_2 = 210/280/350/420/560 [22]

High-frequency resonance transformers can be used in combination with low-voltage high-frequency power generators [22]. The problems with this technique are demonstrated by the examples shown in Figure D.1. In order to obtain a high resonant frequency, the number of turns in the secondary winding of the transformer shall be reduced as shown in Figure D.1. Thereby the available output voltage will also be reduced.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Afin de couvrir l'ensemble de la gamme de fréquences, plusieurs transformateurs à résonance sont nécessaires. Un problème supplémentaire de telles sources de tension d'essai est la forte réaction entre l'impédance de l'éprouvette et la fréquence et l'amplitude de la tension d'essai.

En variante, un oscillateur (transmetteur) à puissance élevée et à haute fréquence peut être utilisé comme source de tension d'essai. Cela donne des fréquences plus élevées combinées avec davantage de puissance de sortie [5], [6] et [20]. La Figure D.2 en donne un exemple. La tension de sortie de cette source est d'environ 4 kV en valeur de crête avec une fréquence maximale de 5 MHz (voir Tableau 5).

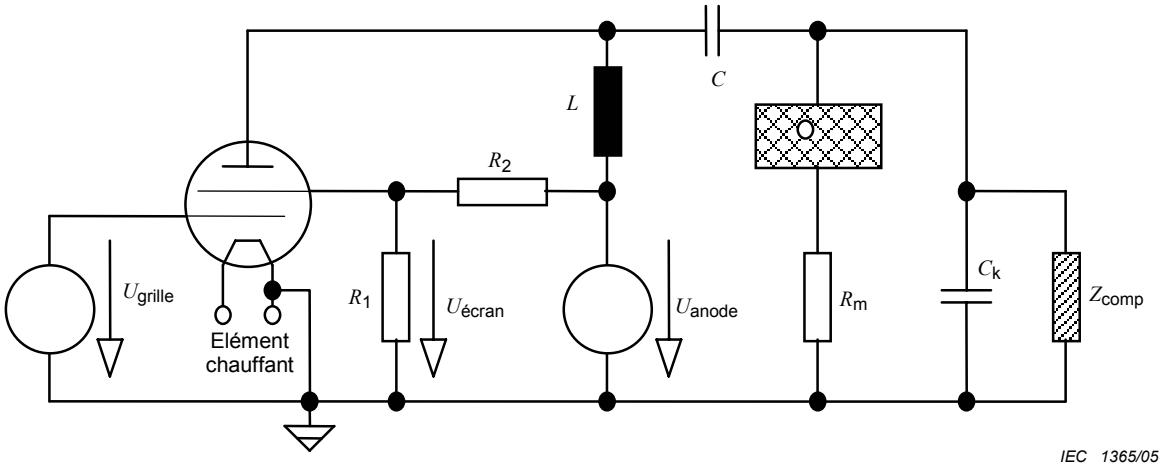


Figure D.2 – Oscillateur à puissance élevée et à haute fréquence [5] et [6]

La capacité de la source de tension d'essai à alimenter de grandes charges capacitives est l'un des problèmes les plus importants dans la sélection d'une source de tension d'essai. Dans la mesure où il convient qu'une capacité de couplage de DP soit plus grande que la capacité de l'éprouvette, le condensateur de couplage détermine habituellement la charge capacitive.

Le Tableau 5 présente certaines données typiques pour une source de tension d'essai puissante qui a été utilisée en [5] et [6]. La tension de sortie est produite par une tétrode à vide alimentée par une alimentation à haute tension puissante (4 kV, 400 mA). Le circuit résonnant en série, qui est formé par l'inductance de l'anode variable et la capacité de charge totale, est réglé sur la fréquence utilisée. La tension d'essai maximale et la capacité de charge maximale (qui est principalement la capacité de couplage de DP) sont données au Tableau D.1. La distorsion harmonique totale de la source de tension d'essai est inférieure à 2 %, à la suite du fonctionnement en résonance.

Tableau D.1 – Données de la source de tension d'essai [5] et [6]

Fréquence	Capacité de couplage	Tension d'essai maximale	Courant d'essai requis
100 kHz	1100 pF	2,7 kV	1,9 A
200 kHz	1100 pF	4,0 kV	5,5 A
500 kHz	450 pF	3,4 kV	4,8 A
1 MHz	520 pF	2,7 kV	8,8 A
3 MHz	320 pF	1,0 kV	6,0 A

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

In order to cover the entire frequency range, several resonant transformers are required. An additional problem of such test voltage sources is the strong reaction between the impedance of the test specimen and the frequency and the amplitude of the test voltage.

As an alternative, a high-frequency high power oscillator (transmitter) can be used as test voltage source. This provides higher frequencies combined with more power output [5], [6] and [20]. An example is shown in Figure D.2. The output voltage of this source is approximately 4 kV peak with a maximum frequency of 5 MHz (see Table 5).

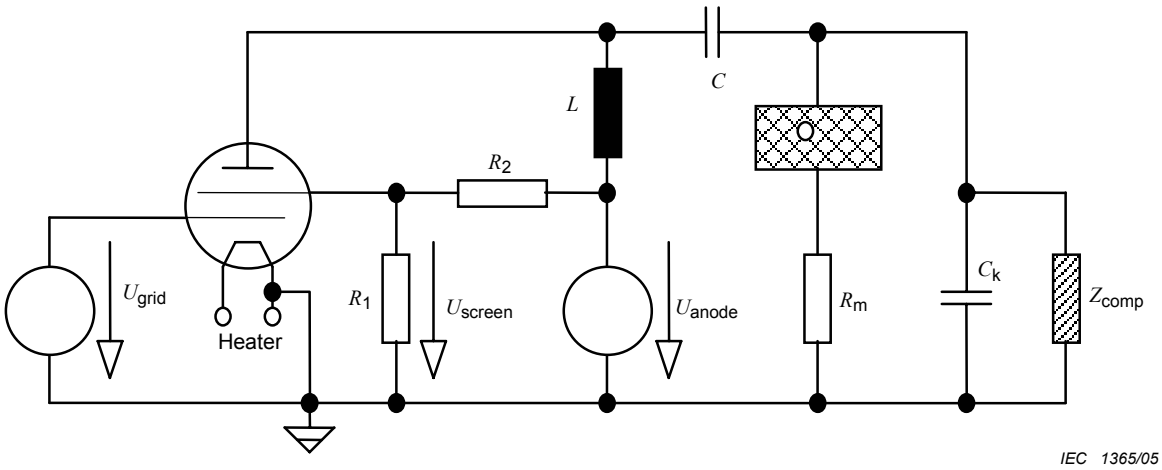


Figure D.2 – High-frequency high power oscillator [5] and [6]

The capability of the test voltage source to feed large capacitive loads is one of the most important issues in selecting a test voltage source. As a PD coupling capacitance should be larger than the capacitance of the test specimen, the coupling capacitor usually determines the capacitive load.

Table 5 presents some typical data for a powerful test voltage source that was used in [5] and [6]. The output voltage is generated by a vacuum tetrode that is fed by a powerful high-voltage supply (4 kV, 400 mA). The series resonant circuit, which is formed by the variable anode inductance and the total load capacitance, is tuned to the frequency being used. Both maximum test voltage and maximum load capacitance (which is mainly the PD coupling capacitance) are given in Table D.1. The total harmonic distortion of this test voltage source is less than 2 % as a result of the resonant operation.

Table D.1 – Data of the test voltage source [5] and [6]

Frequency	Coupling capacitance	Maximum test voltage	Required test current
100 kHz	1100 pF	2,7 kV	1,9 A
200 kHz	1100 pF	4,0 kV	5,5 A
500 kHz	450 pF	3,4 kV	4,8 A
1 MHz	520 pF	2,7 kV	8,8 A
3 MHz	320 pF	1,0 kV	6,0 A

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

D.2 Essai de décharges partielles à haute fréquence

D.2.1 Matériel d'essai

Certains problèmes supplémentaires sont rencontrés, si les essais de DP sous une tension à haute fréquence sont nécessaires [5] et [6], dans la mesure où aucun matériel de mesurage des DP normalisé ne peut être utilisé. Cependant, en général, un oscilloscope à mémoire numérique en combinaison avec des dispositifs de suppression de la tension d'essai à haute fréquence sera approprié.

Un grand nombre de mesures de DP réalisées avec une tension d'essai à haute fréquence ont été effectuées avec le circuit d'essai représenté à la Figure D.3 [24]. La détection de décharges partielles est réalisée par intégration numérique avec un oscilloscope à mémoire numérique à haut taux d'échantillonnage.

Ce circuit de la Figure D.3 est basé sur un transformateur à résonance à haute fréquence (2) alimenté par un amplificateur à haute fréquence (1) [22]. Une variante possible est l'utilisation d'un oscillateur de puissance à haute fréquence mis en fonctionnement en résonance, comme représenté à la Figure D.2. Cela permet la production de fréquences significativement plus élevées [5] et [6], tout en maintenant une distorsion harmonique faible qui est désirable afin de limiter l'affaiblissement de la tension d'essai pendant les mesures de DP.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

D.2 High-frequency partial discharge test

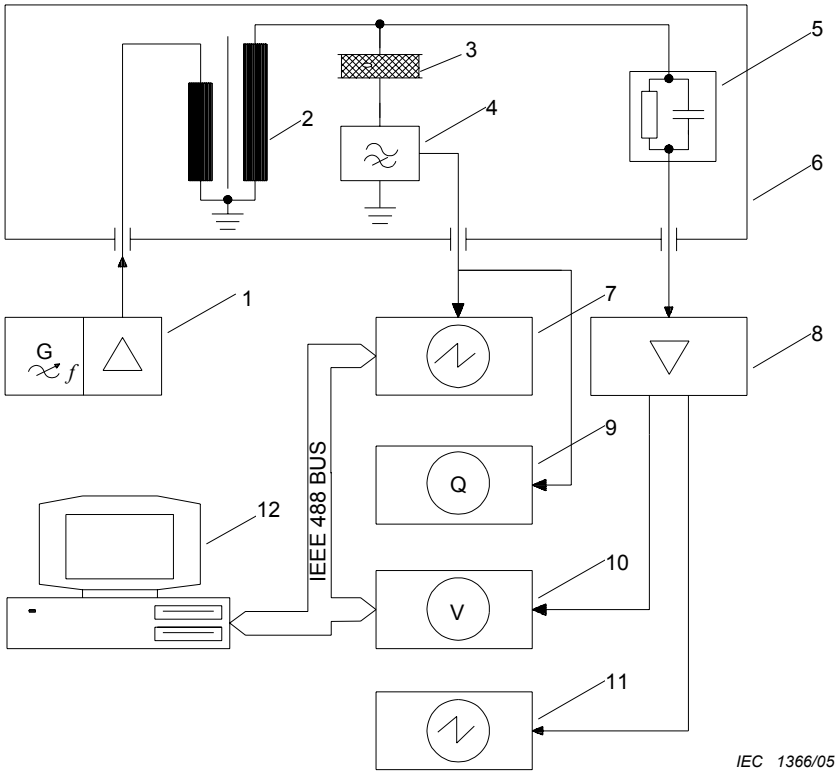
D.2.1 Test equipment

Some additional problems are encountered, if PD-tests at high-frequency voltage are required [5] and [6], as no standard PD-measuring equipment can be used. However in general a digital storage oscilloscope in combination with means for suppression of the high-frequency test voltage will be appropriate.

Many of the reported PD-measurements with high-frequency test voltage were performed with the test circuit shown in Figure D.3 [24]. The partial discharge detection is performed by digital integration with a digital storage oscilloscope of high sampling rate.

This circuit in Figure D.3 is based on a high-frequency resonant transformer (2) that is fed by a high-frequency amplifier (1) [22]. A possible alternative is the use of a high-frequency power oscillator operated in resonance, as shown in Figure D.2. This allows the generation of significantly higher frequencies [5] and [6] while maintaining low harmonic distortion that is desirable in order to ease rejection of the test voltage during PD-measurements.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

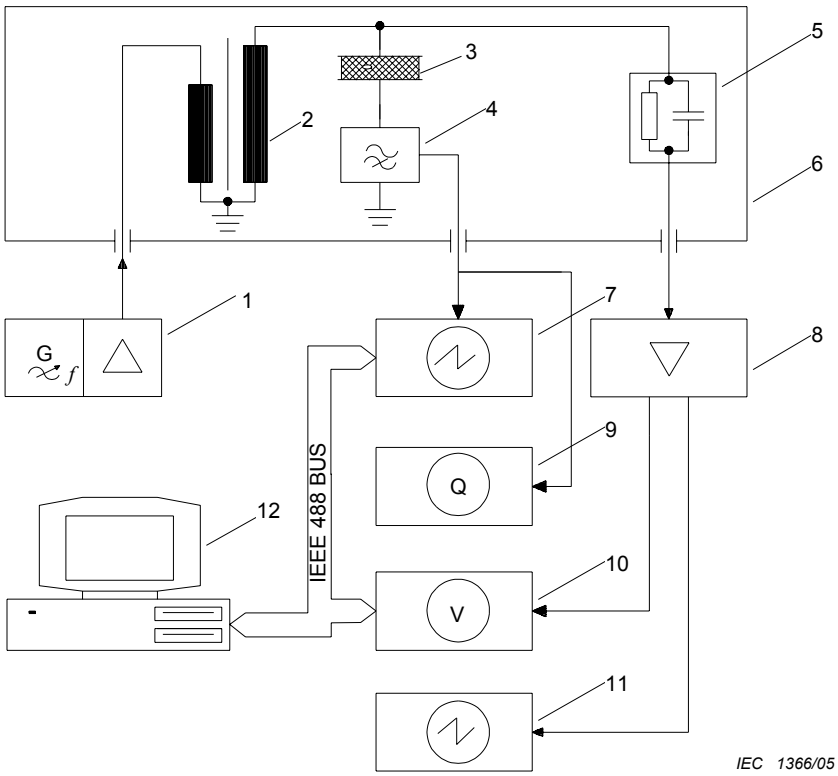


Légende

1 générateur et amplificateur à haute fréquence
2 transformateur à résonance à haute fréquence
3 éprouvette
4 filtre coupe-bande
5 filtre pour haute tension
6 cage de Faraday
7 oscilloscope à mémoire numérique à vitesse élevée
8 amplificateur de découplage
9 appareil de mesurage de DP (à bande étroite, uniquement à des fins de surveillance)
10 voltmètre numérique
11 oscilloscope analogique
12 ordinateur de contrôle

Figure D.3 – Circuit d'essai de DP pour les essais de tension à haute fréquence [22]

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale



Key

1 high-frequency generator and amplifier
2 high-frequency resonance transformer
3 test specimen
4 band-stop filter
5 high-voltage probe
6 screened cabinet
7 high-speed digital storage oscilloscope
8 decoupling amplifier
9 PD measuring instrument (narrow band, only for monitoring purposes)
10 digital voltmeter
11 analog oscilloscope
12 control computer

Figure D.3 – PD test circuit for high-frequency voltage tests [22]

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

D.2.2 Circuit d'essai

D.2.2.1 Considérations générales

La mesure de DP est réalisée par la détection du courant de DP. A cet effet, une impédance de mesurage R_m est connectée en série avec l'éprouvette. La chute de tension à travers cette impédance est appliquée avec un filtre coupe-bande de 3ème ordre à un canal d'un oscilloscope à mémoire numérique avec une bande passante élevée (au moins 100 MHz), de telle sorte qu'avec le circuit d'essai se composant de constantes discrètes, une bande passante totale de 60 MHz puisse être obtenue. Un filtre coupe-bande élimine la chute de tension provoquée par le courant capacitif alimentant l'éprouvette. Par l'intermédiaire de cette technique, une sensibilité de DP de 5 pC peut être obtenue.

La tension d'essai à haute fréquence est mesurée avec un voltmètre à haute fréquence et surveillée sur le deuxième canal de l'oscilloscope à mémoire numérique. Dans la mesure où l'éprouvette n'est pas visible dans de nombreux cas (enceinte climatique), il convient qu'une caméra vidéo soit utilisée afin de détecter toute activité de décharges externes ou contournement. Le circuit d'essai est contrôlé par un ordinateur par l'intermédiaire du Bus selon IEEE 488. Le montage schématique du circuit d'essai est représenté à la Figure D.4 [5] et [6].

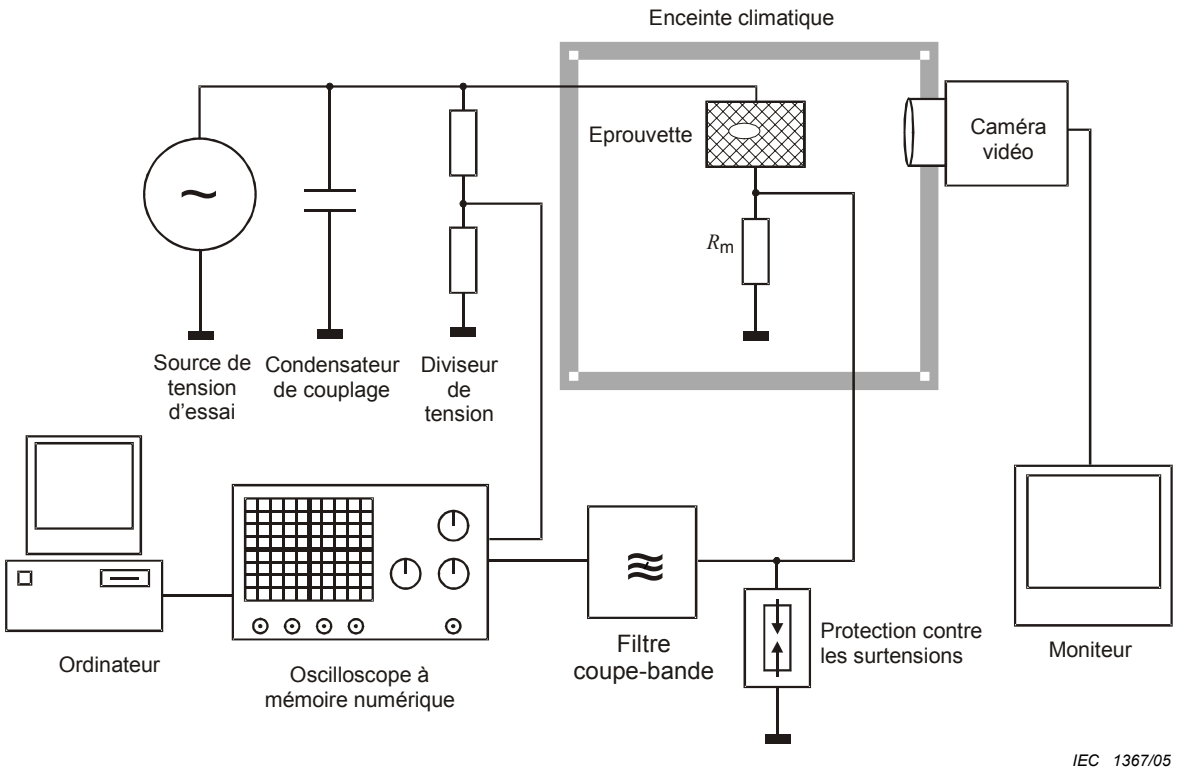


Figure D.4 – Schéma du circuit d'essai [5] et [6]

Pour les éprouvettes qui sont transparentes, la caméra vidéo permettrait également une détection visuelle des DP. Cependant, en général, cela ne peut pas remplacer les mesures électriques, dans la mesure où la sensibilité de cette technique, même sous des tensions à haute fréquence, est bien plus faible. L'utilisation d'un tube photomultiplicateur (PMT) pour détecter les émissions de lumière provenant d'une éprouvette transparente peut entraîner une excellente sensibilité de détection des DP, mais l'amplitude des DP ne peut pas être étalonnée. Cependant, l'utilisation d'un PMT pour déclencher un oscilloscope peut améliorer considérablement la détection des DP, dans la mesure où l'oscilloscope peut souvent être déclenché de cette façon en dessous du bruit électrique.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

D.2.2 Test circuit

D.2.2.1 General considerations

The PD-measurement is performed through detection of the PD-current. For this purpose, a measuring impedance R_m is connected in series with the test specimen. The voltage drop across this impedance is applied across a 3rd order band-stop filter to one channel of a digital storage oscilloscope with high bandwidth (at least 100 MHz) so that together with the test circuit consisting of lumped elements, a total bandwidth of 60 MHz can be obtained. A band-stop filter removes the voltage drop caused by the capacitive current feeding the test specimen. By this technique a PD-sensitivity of 5 pC can be obtained.

The high-frequency test voltage is measured with a high-frequency voltmeter and monitored on the second channel of the digital storage oscilloscope. As the test specimen is not visible in many cases (climatic cabinet), a video camera should be used in order to detect any external discharge activity or flashover. The test circuit is controlled by a PC via the IEEE 488-Bus. The schematic arrangement of the test circuit is shown in Figure D.4 [5] and [6].

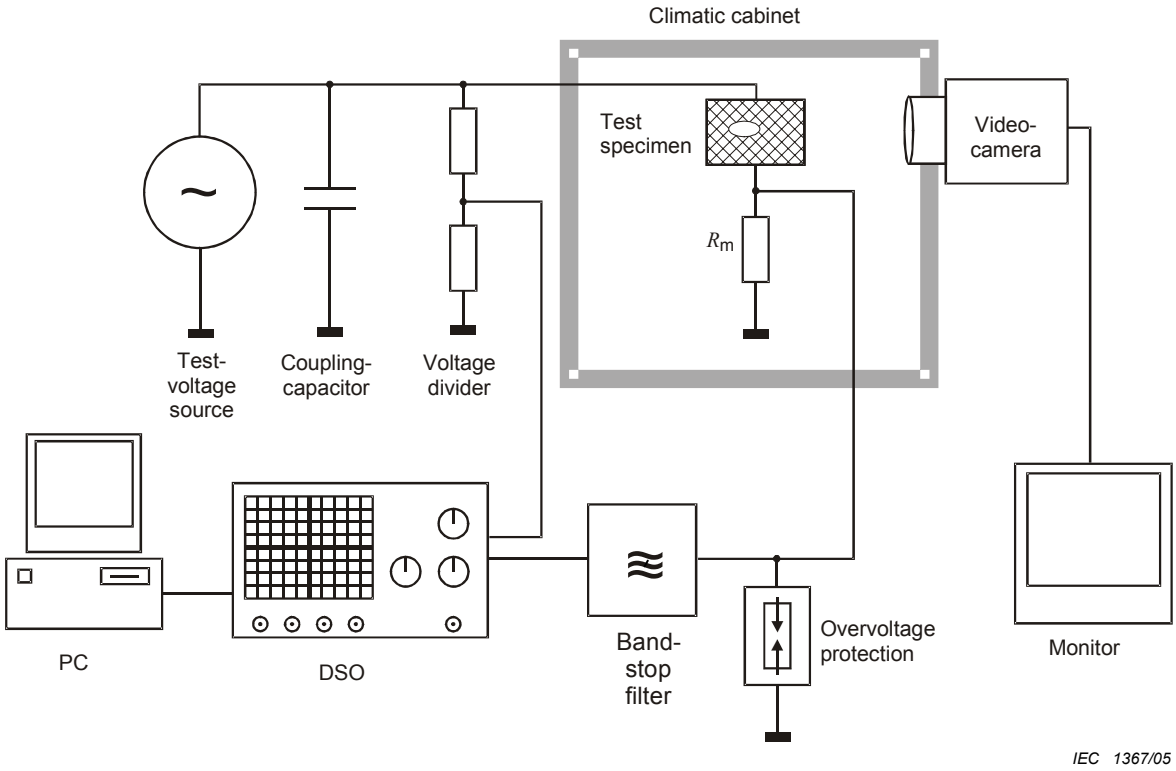


Figure D.4 – Diagram of the test circuit [5] and [6]

For test specimens that are transparent, the video-camera would also allow visual detection of PD. However in general this cannot replace the electrical measurements, as the sensitivity of this technique even at high-frequency voltage is much lower. The use of a photomultiplier tube (PMT) to detect light emission from a transparent test specimen can result in excellent PD-detection sensitivity, but the PD-magnitude cannot be calibrated. However the use of a PMT to trigger an oscilloscope can result in greatly improved PD-detection as the scope can often be triggered in this way below the electrical noise.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

D.2.2.2 Bande passante requise du circuit d'essai

Dans l'évaluation suivante, le circuit d'essai a une caractéristique de transfert passe-bas de 1er ordre (caractéristique PT_1), entraînant une fréquence de coupure inférieure de zéro et une fréquence de coupure supérieure (3 dB) f_c égale à la bande passante.

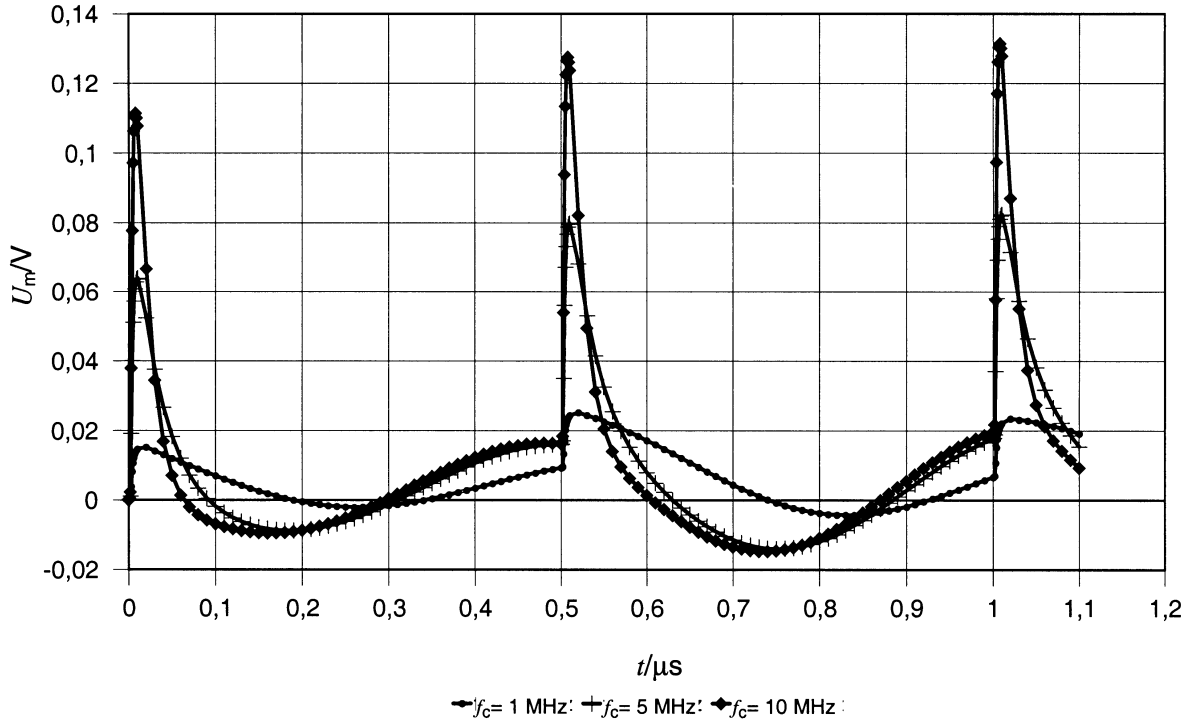
Les considérations concernant l'effet de points de résonance potentiels ou la fréquence de coupure inférieure du circuit d'essai sont décrites en D.2.2.3.

D.2.2.2.1 Bande passante minimale pour la résolution des impulsions de DP

Pour les tensions d'essai à haute fréquence, il faut qu'une fréquence de répétition à impulsions élevées des impulsions de DP soit attendue. Par conséquent, il faut que la résolution des impulsions de DP soit suffisante pour éviter des impulsions de recouvrement. Pour cette raison, seuls des matériels de mesurage dits « à large bande » [23] peuvent être utilisés. La détection de DP est donc habituellement réalisée à l'aide d'un oscilloscope à large bande.

Il est difficile de spécifier une certaine valeur pour la bande passante requise du circuit d'essai. Par exemple, avec une fréquence de tension d'essai de 100 kHz, des fréquences d'impulsion de DP inférieures ou égales à 1 MHz ont été observées dans des hétérogénéités pointe-plan. Pour les fils à paires torsadées [25], où les DP peuvent se produire simultanément à de nombreux emplacements, des fréquences d'impulsion de DP dépassant 10 MHz ont été observées.

La bande passante minimale du circuit de mesurage de DP doit être supérieure ou égale à la fréquence d'impulsion de DP, afin d'éviter des impulsions de recouvrement. Il s'agit d'une exigence minimale absolue qui ne fournit pas une reproduction de la forme d'onde d'impulsion de DP.



IEC 1368/05

Figure D.5 – Réponse d'impulsion de DP pour une fréquence d'impulsion de DP considérée de 2 MHz pour différentes fréquences de coupure supérieures f_c du circuit d'essai; cela inclut un filtre coupe-bande de 3ème ordre avec f_{centre} = 1 MHz [5] et [6]

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

D.2.2.2 Required bandwidth of the test circuit

In the following evaluation, the test circuit has a 1st order low-pass transfer characteristic (PT_1-characteristic) resulting in a lower cut-off frequency of zero and an upper cut-off frequency (3 dB) f_c that is equal to the bandwidth.

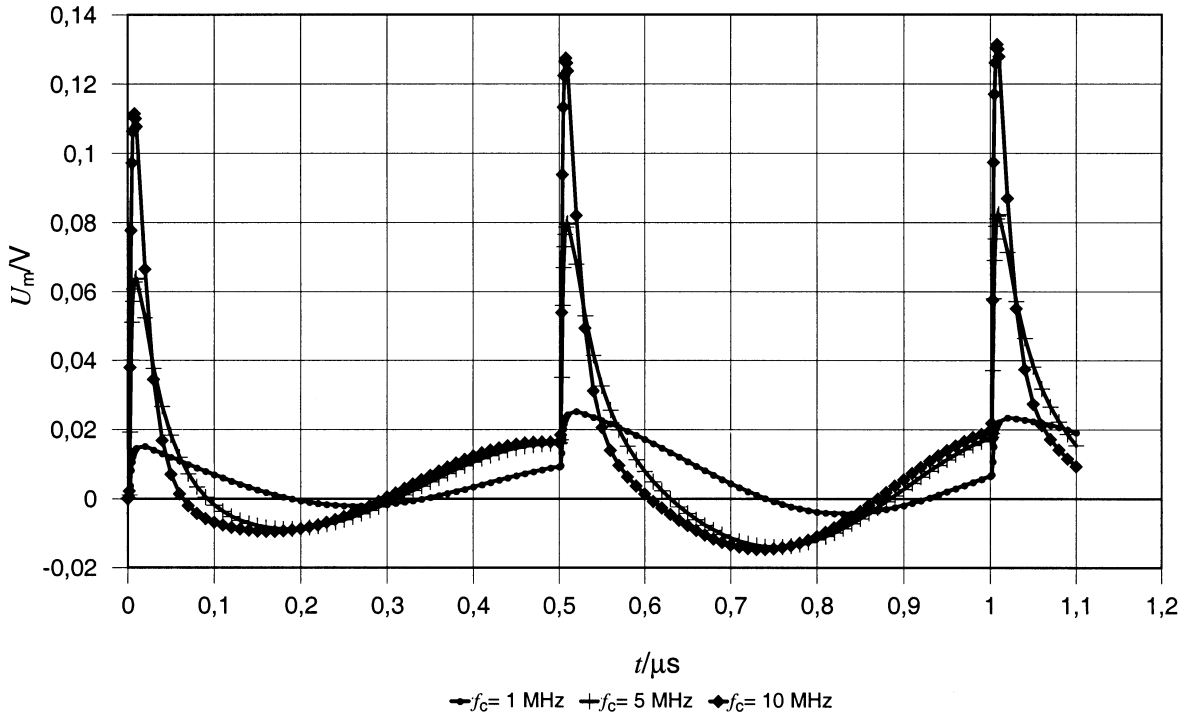
Considerations with respect to the effect of possible resonance points or the lower cut-off frequency of the test circuit are described in D.2.2.3.

D.2.2.2.1 Minimum bandwidth for PD impulse resolution

For high-frequency test voltages, a high pulse repetition frequency of PD-impulses must be expected. Therefore the PD-impulse resolution must be sufficient to avoid overlapping pulses. For that reason, only so called „wide-band“ measuring equipment [23] can be used. Thus PD-detection is usually performed using a wide-band oscilloscope.

It is difficult to specify a certain value for the required bandwidth of the test circuit. For instance with a test voltage frequency of 100 kHz, PD-impulse frequencies of up to 1 MHz have been observed in point-plane gaps. For twisted-pair wires [25], where PD can occur simultaneously at many locations, PD-impulse frequencies exceeding 10 MHz have been observed.

The minimum bandwidth of the PD-measuring circuit shall be equal or greater than the PD-impulse frequency in order to avoid overlapping pulses. This is an absolute minimum requirement that does not provide a reproduction of the PD-pulse waveshape.



IEC 1368/05

Figure D.5 – PD impulse response for an assumed PD impulse frequency of 2 MHz for different upper cut-off frequencies f_c of the test circuit; this includes a 3rd order band-stop filter with f_{centre} = 1 MHz [5] and [6]

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Une fréquence de coupure supérieure f_c du circuit d'essai représentant cinq fois la fréquence d'impulsion de DP est généralement suffisante. Cette condition, ainsi que d'autres exemples de fréquences de coupure supérieures insuffisantes, est représentée à la Figure D.5 pour une fréquence d'impulsion de DP considérée de 2 MHz. Dans un souci de simplification, on a considéré que seules des impulsions de DP positives se produisent.

Ce rapport fournit également une bande passante suffisante autour de la fréquence d'excitation du filtre coupe-bande pour une bonne sensibilité de détection des DP. L'exemple représenté à la Figure D.5 est basé sur l'utilisation d'un filtre coupe-bande de 3ème ordre avec f_{centre} = 1 MHz.

D.2.2.2.2 Bande passante minimale pour l'analyse des impulsions de DP

Afin d'analyser la source du signal de DP et d'effectuer une analyse de la forme et de la taille des soufflures qui sont à l'origine des DP, des bandes passantes bien plus grandes sont nécessaires. Dans le cas de DP de type Streamer avec un temps de montée de l'ordre de ≤1 ns [26], une bande passante de l'ordre de 1 GHz serait nécessaire pour une réponse d'impulsion vraie.

Des bandes passantes si larges ne peuvent habituellement être fournies qu'au moyen de circuits d'essai coaxiaux, c'est-à-dire en laboratoire [26] et [27]. Avec des constantes discrètes, une bande passante de l'ordre de 50 MHz peut être obtenue plutôt facilement. Une impulsion de DP de temps de montée très court serait ainsi reproduite avec un temps de montée d'environ 7 ns. Cela serait encore suffisant pour la discrimination entre les impulsions de DP de type Streamer (temps de montée type de 1 ns) et les impulsions de DP de type Townsend (temps de montée type de 20 ns) [26].

D.2.2.3 Dimensionnement du circuit d'essai

Un dimensionnement adéquat doit éviter le recouvrement des impulsions de DP, et il convient qu'il permette une analyse de la forme d'onde des impulsions de DP.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

An upper test circuit cut-off frequency f_c of five times the PD impulse frequency is usually sufficient. This condition together with other examples of insufficient upper cut-off frequencies is shown in Figure D.5 for an assumed PD-impulse frequency of 2 MHz. For simplification it was assumed that only positive PD-impulses occur.

This ratio also provides sufficient bandwidth around the excitation frequency of the band-stop filter for good PD-detection sensitivity. The example shown in Figure D.5 is based upon the use of a 3rd order band-stop filter with f_{centre} = 1 MHz.

D.2.2.2.2 Minimum bandwidth for PD-impulse analysis

In order to analyse the source of the PD-signal and to make some analysis of the shape and size of the voids that are the origin of PD, much greater bandwidths are required. In case of Streamer-like PD with a risetime on the order of ≤1 ns [26], a bandwidth in the order of 1 GHz would be required for true impulse response.

Such wide bandwidths usually can only be provided by means of coaxial test circuits, i.e., in the laboratory [26] and [27]. With lumped elements, a bandwidth in the order of 50 MHz can be obtained rather easily. Thereby a PD impulse of very short risetime would be reproduced with approximately 7 ns risetime. This would still be sufficient for the discrimination between Streamer-like PD-impulses (typical risetime 1 ns) and Townsend-like PD-impulses (typical risetime 20 ns) [26].

D.2.2.3 Dimensioning of the test circuit

Proper dimensioning shall avoid overlap of PD-impulses and should allow some analysis of the PD-impulse waveshape.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

D.2.2.3.1 Analyse du circuit d'essai de DP

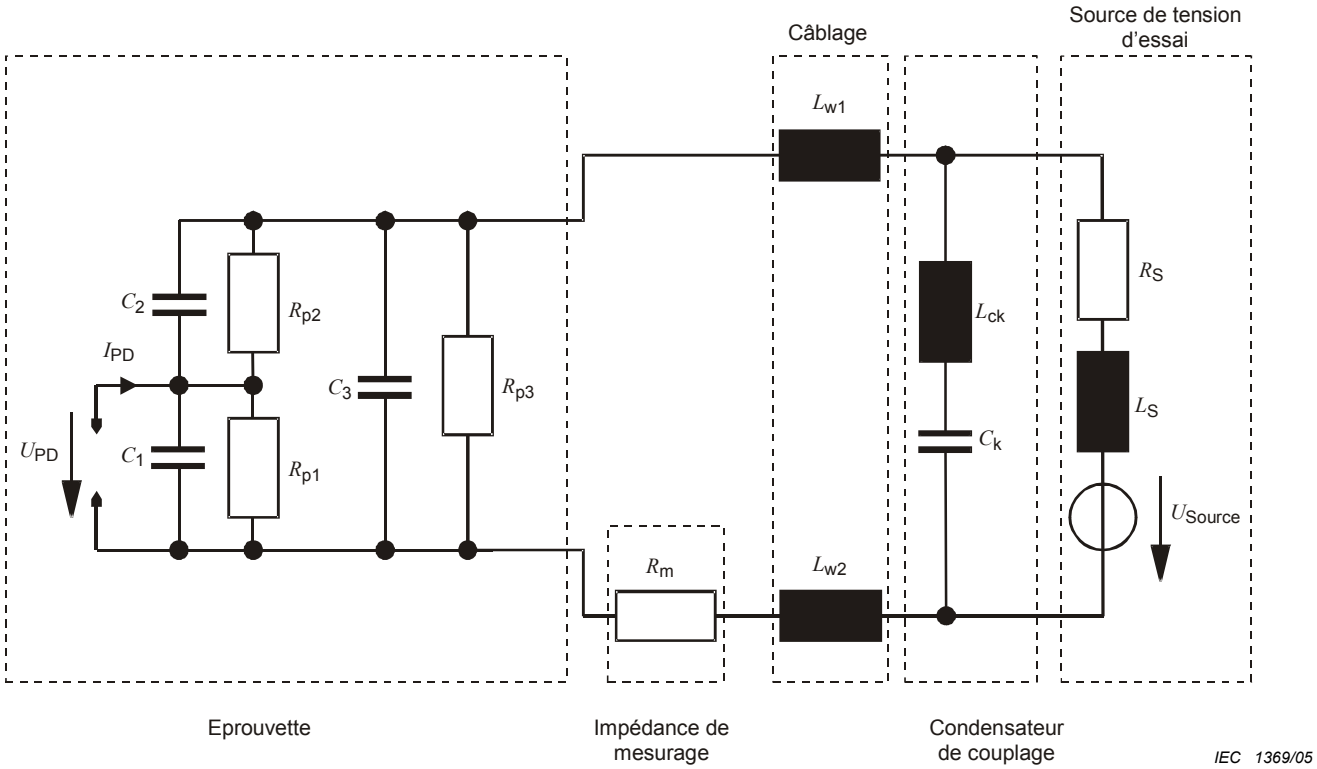


Figure D.6 – Circuit équivalent d'un circuit d'essai de DP avec des constantes discrètes [5]

Les circuits coaxiaux ne présentent un intérêt que pour les expériences en laboratoires et ne doivent pas être considérés dans ce contexte. Les circuits d'essai se composant de constantes discrètes (circuits RLC) peuvent être décrits par le circuit équivalent représenté à la Figure D.6 [5].

En général, les composants inductifs (inductance de câblage L_W, inductance de la source L_S et condensateur de couplage L_{Ck}) du circuit d'essai de DP ne peuvent pas être ignorés. Avec les composants capacitifs (condensateur de couplage C_k, capacité de l'éprouvette C_3), des points de résonance dans les caractéristiques de transfert du circuit d'essai de DP peuvent apparaître; ils influenceront largement la reproduction des impulsions de DP. Par conséquent, une réponse approximativement apériodique du circuit d'essai est nécessaire, et il convient que la fréquence de coupure supérieure f_c soit aussi élevée que possible.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

D.2.2.3.1 Analysis of the PD test circuit

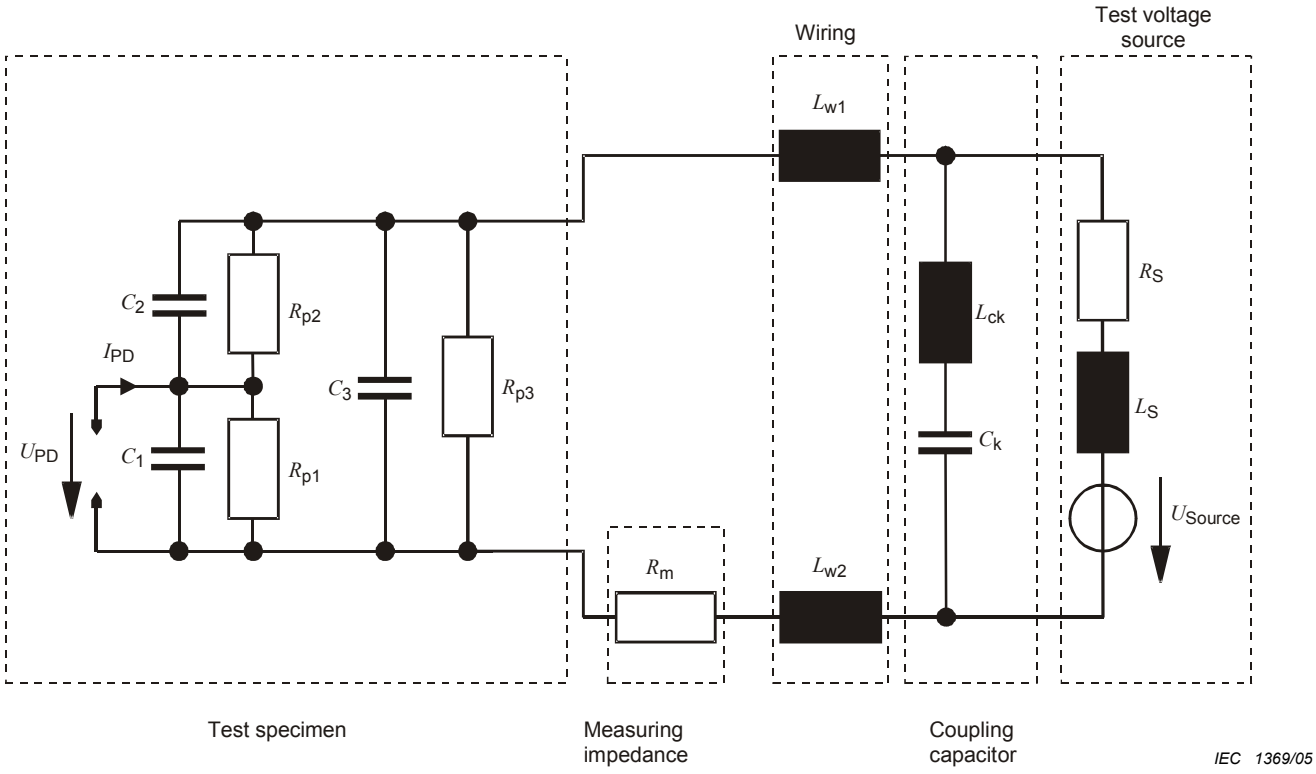


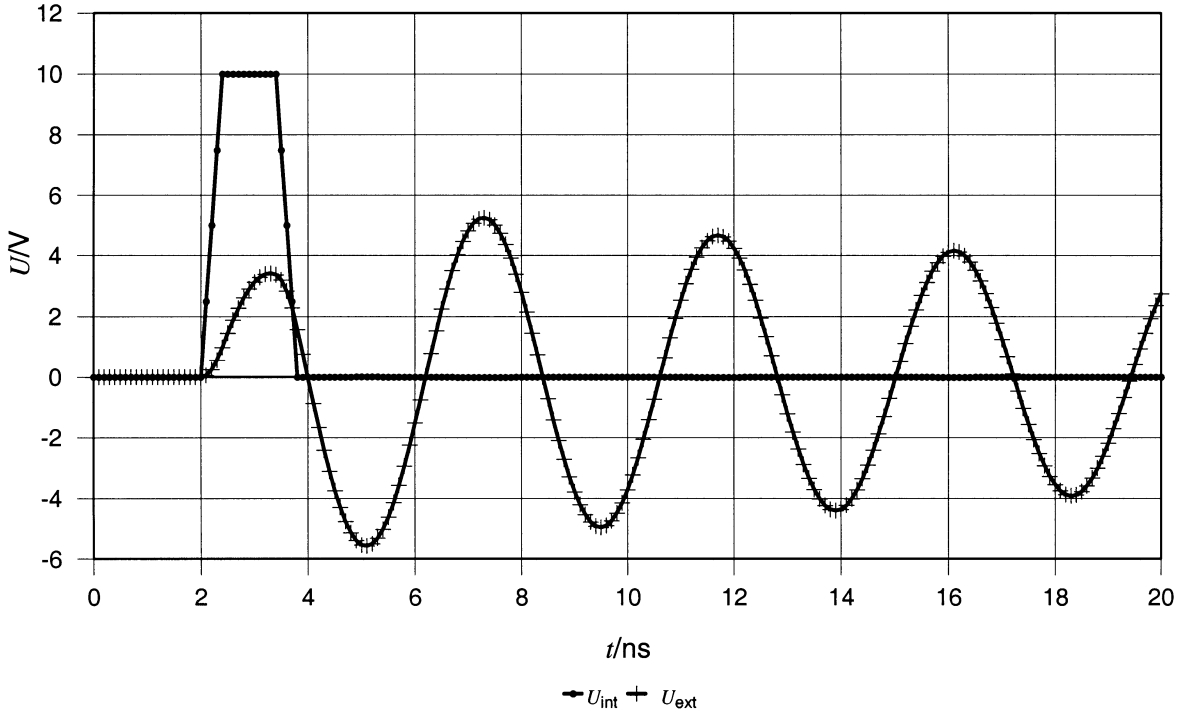
Figure D.6 – Equivalent circuit of a PD test circuit with lumped elements [5]

Coaxial circuits are only of interest for laboratory experiments and shall not be considered in this context. Test circuits consisting of lumped elements (RLC-circuits) can be described by the equivalent circuit shown in Figure D.6 [5].

In general, inductive components (wiring inductance L_W, inductance of source L_S and coupling capacitor L_{Ck}) of the PD-test circuit cannot be ignored. Together with the capacitive components (coupling capacitor C_k, capacitance of the test specimen C_3) resonance points in the transfer characteristics of the PD-test circuit can occur which will greatly influence the reproduction of the PD-impulses. Therefore an approximately aperiodic response of the test-circuit is required, and the upper cut-off frequency f_c should be as high as possible.

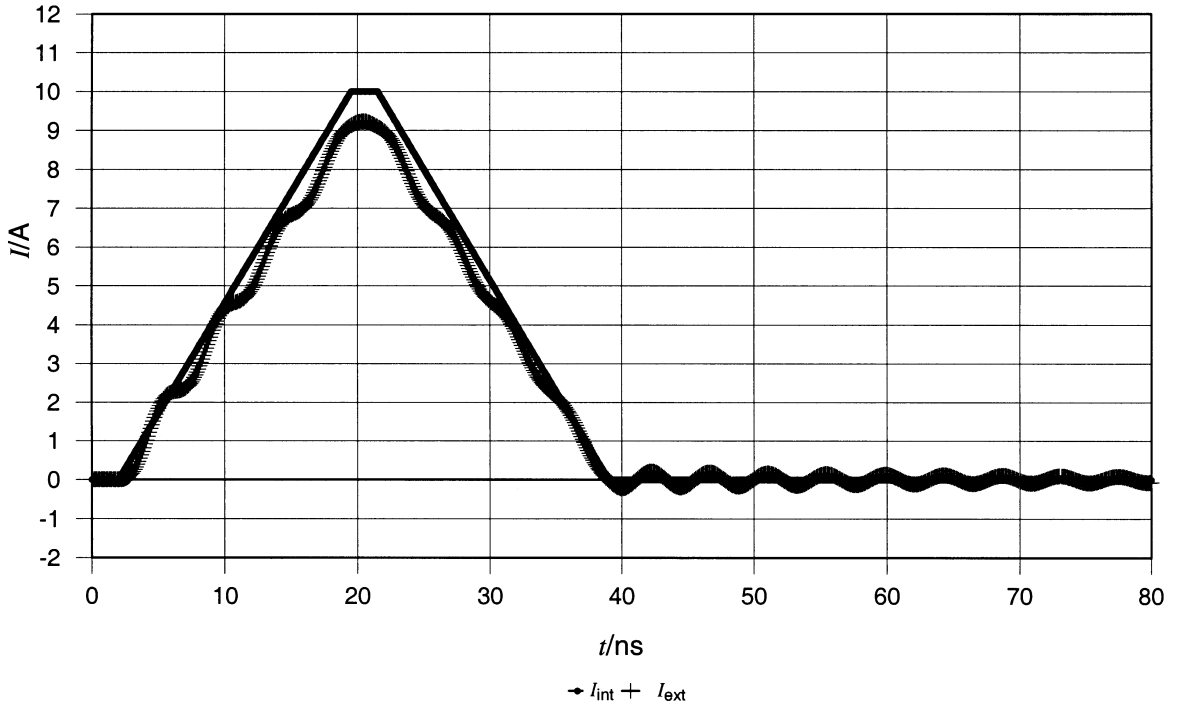
Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

D.2.2.3.2 Source de tension de DP par rapport à la source de courant de DP



IEC 1370/05

Figure D.7a – Source de tension de chocs de DP



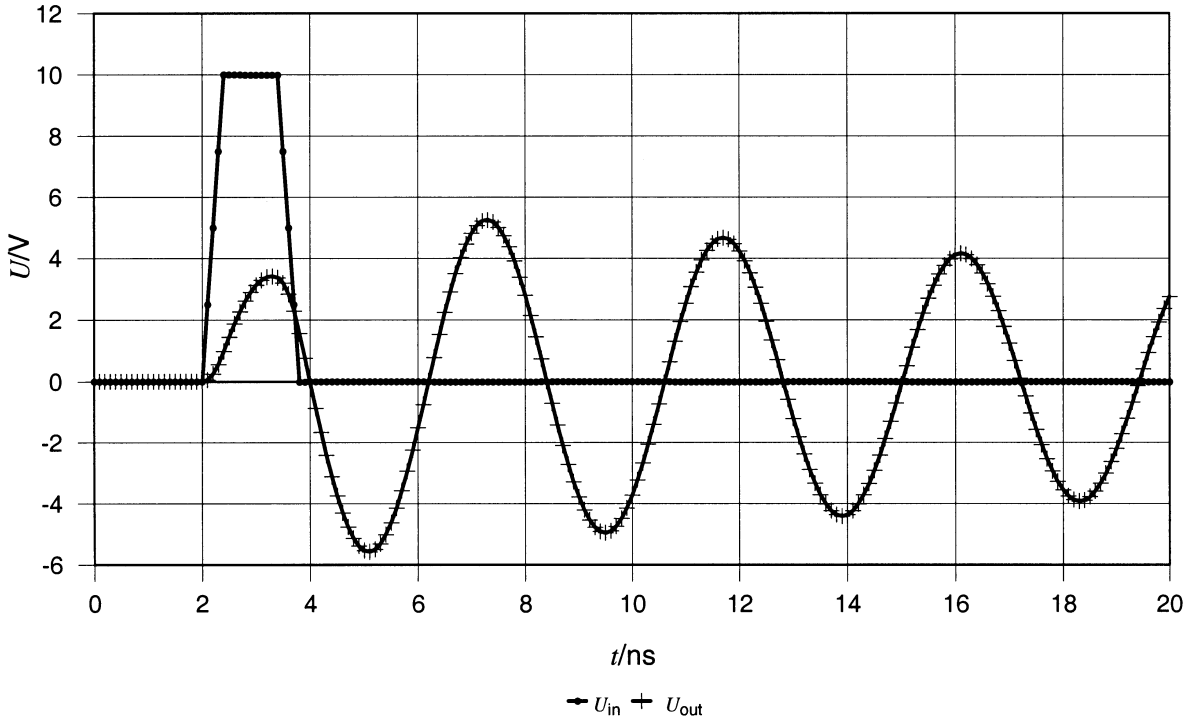
IEC 1371/05

Figure D.7b – Source de courant de choc de DP

Figure D.7 – Caractéristiques de transfert des circuits d'essai de DP en utilisant une source de tension de chocs de DP par rapport à une source de courant de choc de DP [5]

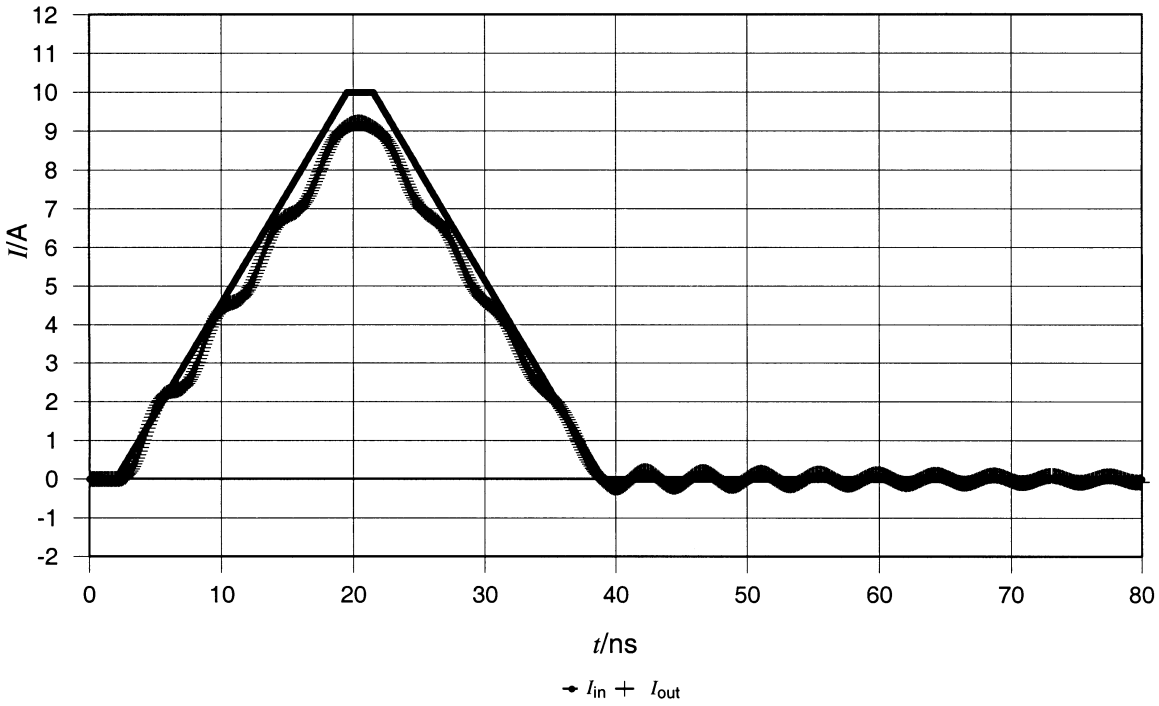
Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

D.2.2.3.2 PD voltage source versus PD current source



IEC 1370/05

Figure D.7a – PD impulse voltage source



IEC 1371/05

Figure D.7b – PD impulse current source

Figure D.7 – Transfer characteristics of PD test circuits when using a PD-impulse voltage source versus a PD impulse current source [5]

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

Le modèle le plus approprié pour la source d'impulsion de DP semble être une source de courant. Par ailleurs, dans la norme pour les essais de DP [23], une source de tension est utilisée pour l'étalonnage du circuit d'essai. On peut montrer que les caractéristiques de transfert du circuit d'essai de DP dépendent du type de source d'impulsion de DP utilisée pour l'étalonnage.

A la Figure D.7a, une source de tension de chocs de DP a été utilisée, qui ne permet pas une reproduction adéquate du signal de DP. Si, dans le même circuit d'essai, une source de courant de choc de DP est utilisée (Figure D.7b), les caractéristiques de transfert sont appropriées. Davantage de précisions sur les caractéristiques de transfert des circuits d'essai peuvent être trouvées en [5].

Dans ce qui suit, seules les sources de courant de choc de DP seront considérées afin de fournir des caractéristiques de transfert appropriées. Bien entendu, cela ne résout pas le conflit en étalonnant des circuits d'essai de DP à l'aide de la source de tension de chocs normalisée [23].

D.2.2.3.3 Analyse du circuit d'essai de DP

Les caractéristiques de transfert du circuit d'essai peuvent être analysées en utilisant le circuit équivalent représenté à la Figure D.6. Cela peut être réalisé par une analyse du réseau ou par une simulation du circuit, en utilisant les logiciels appropriés [28].

D.2.2.3.3.1 Analyse du réseau

L'analyse est réalisée pour une source de courant de choc de DP à l'aide d'un circuit équivalent capacitif de l'éprouvette (Figure D.6). Par rapport aux autres inductances, L_S peut être négligée pour le calcul de la fréquence de résonance en série. L_{W1} et L_{W2} sont ajoutées à L_W. Avec L_{Ck}, dans le cas où le condensateur de couplage C_k n'a pas une inductance faible ou a un câblage significatif, l'inductance totale L est obtenue.

$$L = L_W + L_{Ck} \tag{D.1}$$

En raison de la relation

$$C_3 >> C_1 >> C_2 \tag{D.2}$$

la capacité de l'éprouvette peut être approchée avec C_3. Par conséquent, la capacité effective pour une source de courant de choc de DP est

$$C = \frac{C_3\, C_k}{C_3 + C_k} \tag{D.3}$$

et la fréquence de résonance:

$$f_r = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC}} \tag{D.4}$$

En pratique, l'amortissement de ce circuit résonnant en série est provoqué par R_m seule. Le facteur de perte d est obtenu à partir de

$$d = \frac{R_m}{\sqrt{L/C}} \tag{D.5}$$

Pour une réponse apériodique, le facteur de perte doit être:

$$d \geq 2 \tag{D.6}$$

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

The most appropriate model for the PD-impulse source seems to be a current source. On the other hand in the standard for PD-testing [23], a voltage source is used for calibration of the test circuit. It can be shown, that the transfer characteristics of the PD-test circuit are dependent on the kind of PD-impulse source being used for calibration.

In Figure D.7a a PD-impulse voltage source has been used, which does not allow proper reproduction of the PD-signal. If in the same test circuit a PD-impulse current source is used (Figure D.7b), the transfer characteristics are appropriate. More details about the transfer characteristics of test circuits can be found in [5].

In the following, only PD-impulse current sources will be considered in order to provide appropriate transfer characteristics. Of course this does not solve the conflict when calibrating PD-test circuits by using the standard impulse voltage source [23].

D.2.2.3.3 Analysis of the PD-test circuit

The transfer characteristics of the test circuit can be analysed by using the equivalent circuit shown in Figure D.6. This can be done by network analysis or by circuit simulation using appropriate software [28].

D.2.2.3.3.1 Network analysis

The analysis is performed for a PD-impulse current source using a capacitive equivalent circuit of the test specimen (Figure D.6). Compared to the other inductances L_S can be neglected for the calculation of the series resonance frequency. L_{W1} and L_{W2} are added to L_W. Together with L_{Ck}, where the coupling capacitor C_k is not low inductive or has significant wiring, the total inductance L is obtained.

$$L = L_W + L_{Ck} \tag{D.1}$$

Due to the relation

$$C_3 >> C_1 >> C_2 \tag{D.2}$$

the capacitance of the test specimen can be approximated with C_3. Therefore the effective capacitance for a PD-impulse current source is

$$C = \frac{C_3\, C_k}{C_3 + C_k} \tag{D.3}$$

and the resonance frequency:

$$f_r = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC}} \tag{D.4}$$

In practice, the damping of this series resonant circuit is caused by R_m alone. The loss factor d is obtained from

$$d = \frac{R_m}{\sqrt{L/C}} \tag{D.5}$$

For aperiodic response, the loss factor shall be:

$$d \geq 2 \tag{D.6}$$

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Par conséquent, l'inductance doit être limitée à:

$$L \leq \frac{R_m{}^2 C}{4} \tag{D.7}$$

Dans ce cas, la fréquence de coupure supérieure f_c peut être approchée en supposant un circuit RC simple:

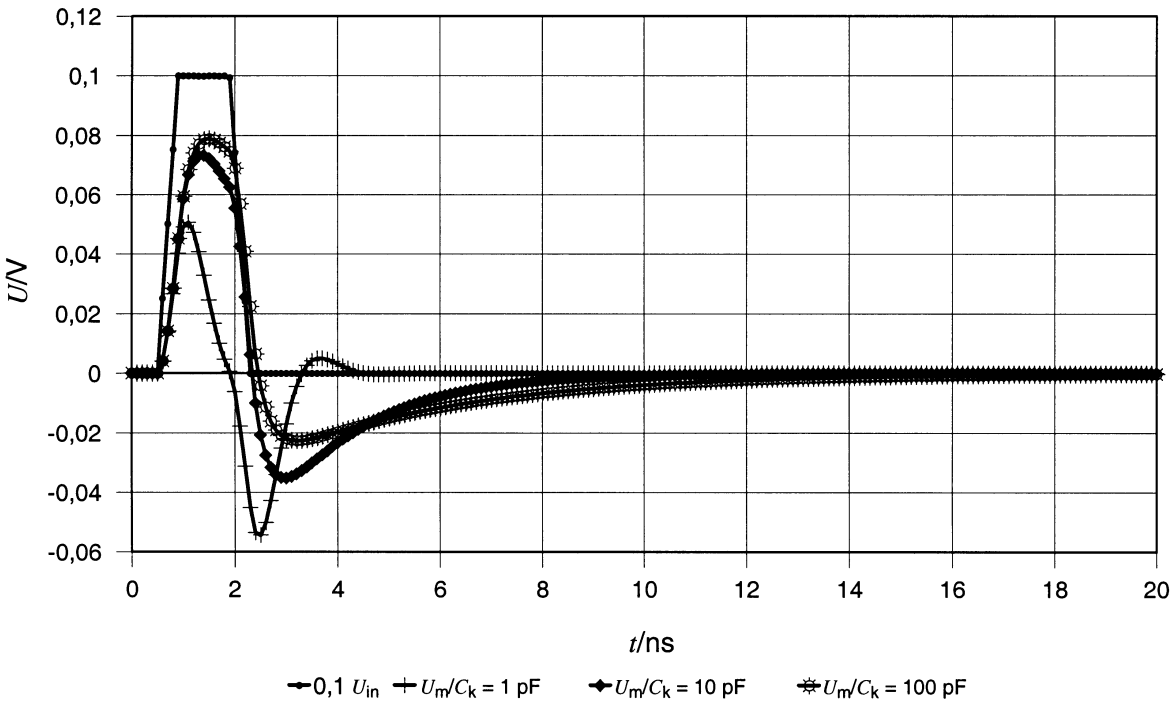
$$f_c = \frac{1}{2\pi R_m C} \tag{D.8}$$

La fréquence de coupure inférieure est de zéro.

D.2.2.3.3.2 Simulation du circuit

Une analyse plus détaillée du circuit d'essai est possible à l'aide de la simulation du circuit en utilisant un code approprié (PSPICE) [28]. Cette technique avait déjà été utilisée afin d'obtenir les résultats décrits en D.2.2.2.1. Elle est à présent appliquée, afin d'évaluer l'influence de la taille du condensateur de couplage sur les caractéristiques de transfert du circuit d'essai.

D.2.2.3.4 Influence du condensateur de couplage sur les caractéristiques de transfert



IEC 1372/05

Figure D.8 – Signal d'entrée U_{in} et signal de mesurage U_m en fonction de la capacité du condensateur de couplage C_k (capacité de l'éprouvette C_3 = 10 pF) [5]

L'influence de la taille du condensateur de couplage Ck sur les caractéristiques de transfert du circuit d'essai est démontrée à la Figure D.8 [5], qui montre clairement que cette influence est très forte et que les petits condensateurs de couplage par rapport à la capacité de l'éprouvette C3 ne sont pas appropriés [29].

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Therefore, the inductance shall be limited to:

$$L \leq \frac{R_m{}^2 C}{4} \tag{D.7}$$

In this case the upper cut-off frequency f_c can be approximated by assuming a simple RC-circuit:

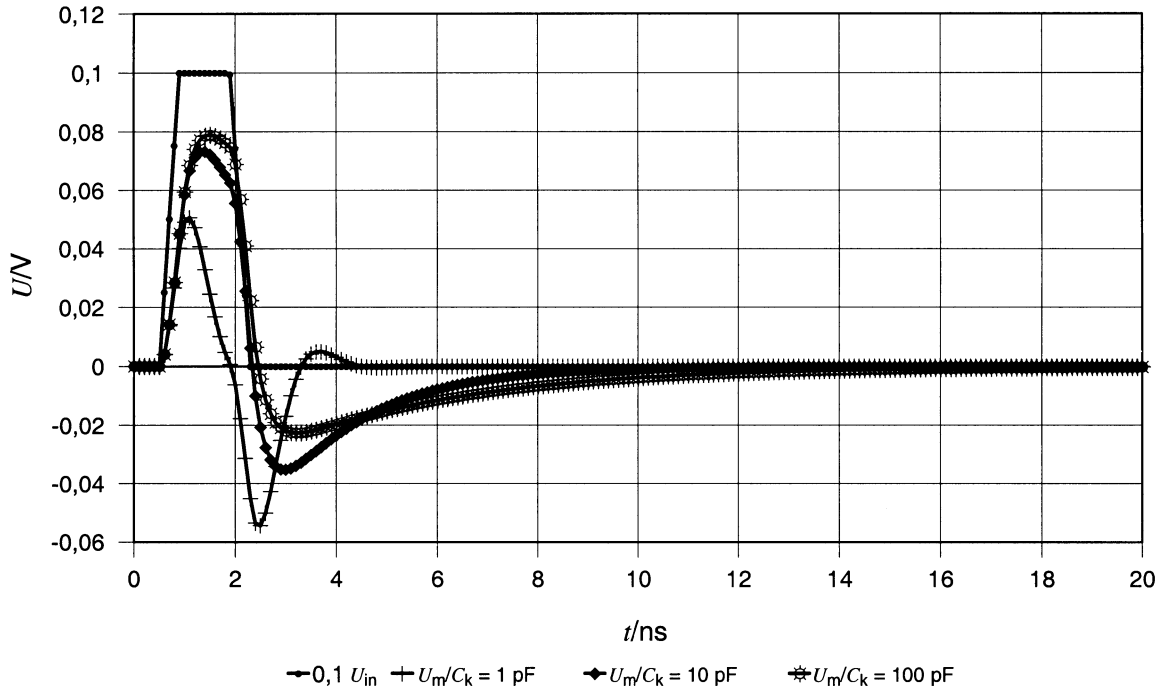
$$f_c = \frac{1}{2\pi R_m C} \tag{D.8}$$

The lower cut-off frequency is zero.

D.2.2.3.3.2 Circuit simulation

More detailed analysis of the test circuit is possible by means of circuit simulation using an appropriate code (PSPICE) [28]. This technique had already been used in order to obtain the results described in D.2.2.2.1. Now it is applied in order to evaluate the influence of the size of the coupling capacitor on the transfer characteristics of the test circuit.

D.2.2.3.4 Influence of the coupling capacitor on the transfer characteristics



IEC 1372/05

Figure D.8 – Input signal U_{in} and measuring signal U_m depending upon the capacitance of the coupling capacitor C_k (capacitance of the test specimen C_3 = 10 pF) [5]

The influence of the size of the coupling capacitor C_k on the transfer characteristics of the test circuit is demonstrated in Figure D.8 [5] which shows clearly that this influence is very strong and that small coupling capacitors compared to the capacitance of the test specimen C_3 are not appropriate [29].

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

De petits condensateurs de couplage réduiront le signal de mesurage, qui est pris en compte par étalonnage. Cependant, la sensibilité du circuit d'essai de DP sera également réduite. L'autre problème est la différenciation du signal de mesurage en utilisant de petits condensateurs de couplage. D'après la Figure D.8, on peut se rendre compte que la capacité minimale est de l'ordre de $C_k = C_3$. De préférence, $C_k \geq 10 \times C_3$.

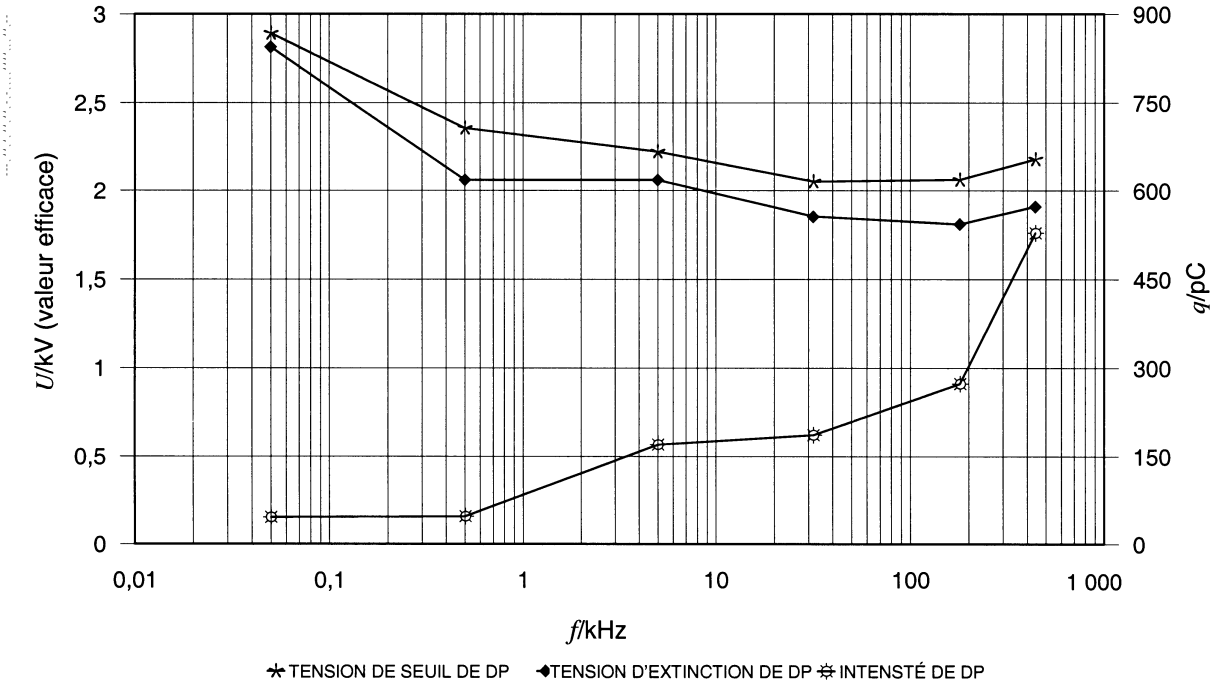
La valeur nécessaire pour la capacité de couplage est la plus élevée de cette valeur et la capacité qui est nécessaire pour la réponse apériodique du circuit d'essai (voir D.2.2.3.3.1, Equation (D.7)).

Il n'y a aucune limite supérieure théorique pour la taille de la capacité de couplage. En pratique, elle sera limitée par la forte réaction sur la source de tension d'essai, en particulier à des hautes fréquences de la tension d'essai. Ce problème particulier est décrit en [29]. Certaines données pratiques sont données au Tableau D.1.

D.3 Exemples des résultats d'essai

De nombreux composants pour le matériel à basse tension ont été soumis aux essais à l'aide d'une tension d'essai à haute fréquence. La plupart des données sont des données propriétaires. Certains résultats généraux ont été publiés récemment [30] et sont présentés ici en partie.

Pour les optocoupleurs, il peut y avoir une diminution significative des tensions de DP, comme représenté à la Figure D.9 [30]. L'augmentation importante de l'intensité de DP avec une augmentation de la fréquence de la tension est même plus contraignante. Dans la mesure où la fréquence de répétition des impulsions de DP augmentera presque proportionnellement à la fréquence de la tension, cela provoquera une contrainte extrêmement élevée sur l'isolation.



IEC 1373/05

Figure D.9 – Essais de DP des optocoupleurs sous une tension à haute fréquence [30]

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Small coupling capacitors will reduce the measuring signal, which is taken into account by calibration. However, the sensitivity of the PD-test circuit will also be reduced. The other problem is the differentiation of the measuring signal when using small coupling capacitors. From Figure D.8, it can be seen that the minimum capacitance is in the order of $C_k = C_3$. Preferably, $C_k \geq 10 \times C_3$.

The necessary value for the coupling capacitance is the greater of this value and the capacitance that is required for aperiodic response of the test circuit (see D.2.2.3.3.1, Equation (D.7)).

There is no theoretical upper limit for the size of the coupling capacitance. In practice it will be limited by the strong reaction on the test voltage source especially at high frequencies of the test voltage. This special problem is described in [29]. Some practical data are given in Table D.1.

D.3 Examples of test results

Many components for low-voltage equipment have been tested using a high-frequency test voltage. Most of the data are proprietary. Some general results have been published recently [30] and are shown here in part.

For optocouplers, there can be a significant decrease of the PD-voltages, as shown in Figure D.9 [30]. Even more onerous is the strong increase of the PD-intensity with increasing frequency of the voltage. As the repetition frequency of the PD-impulses will increase almost inproportion to the frequency of the voltage, this will cause an extremely high stress on the insulation.

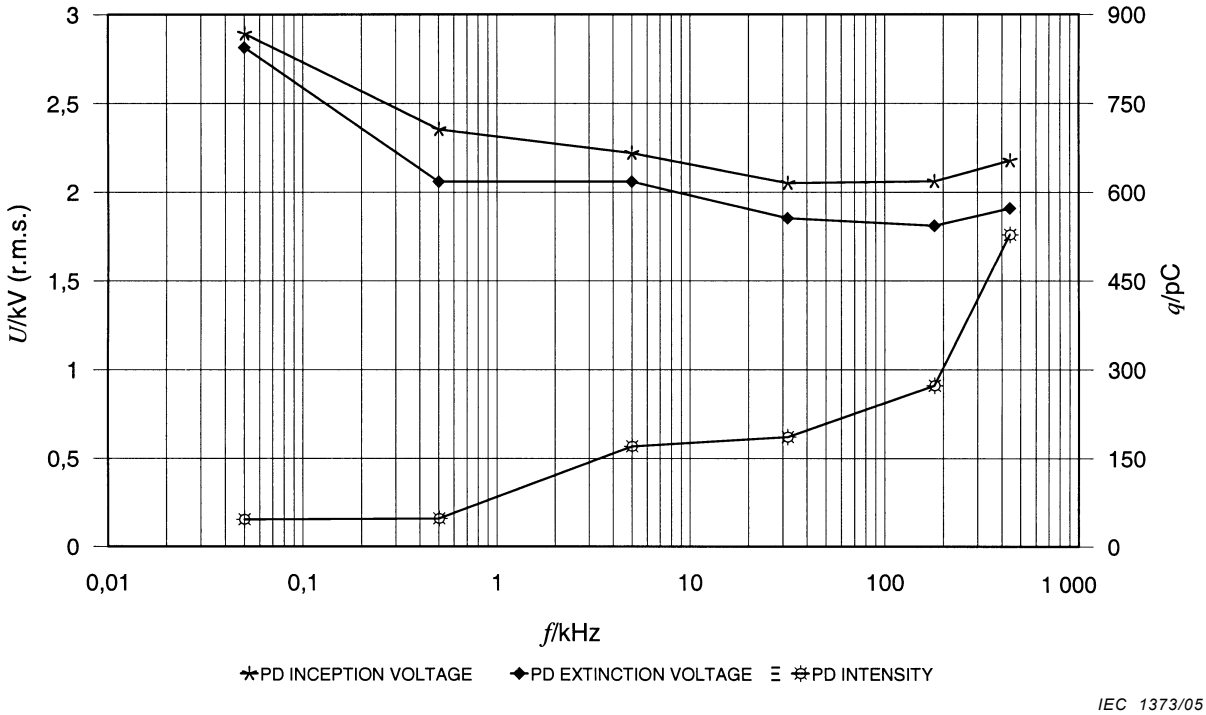
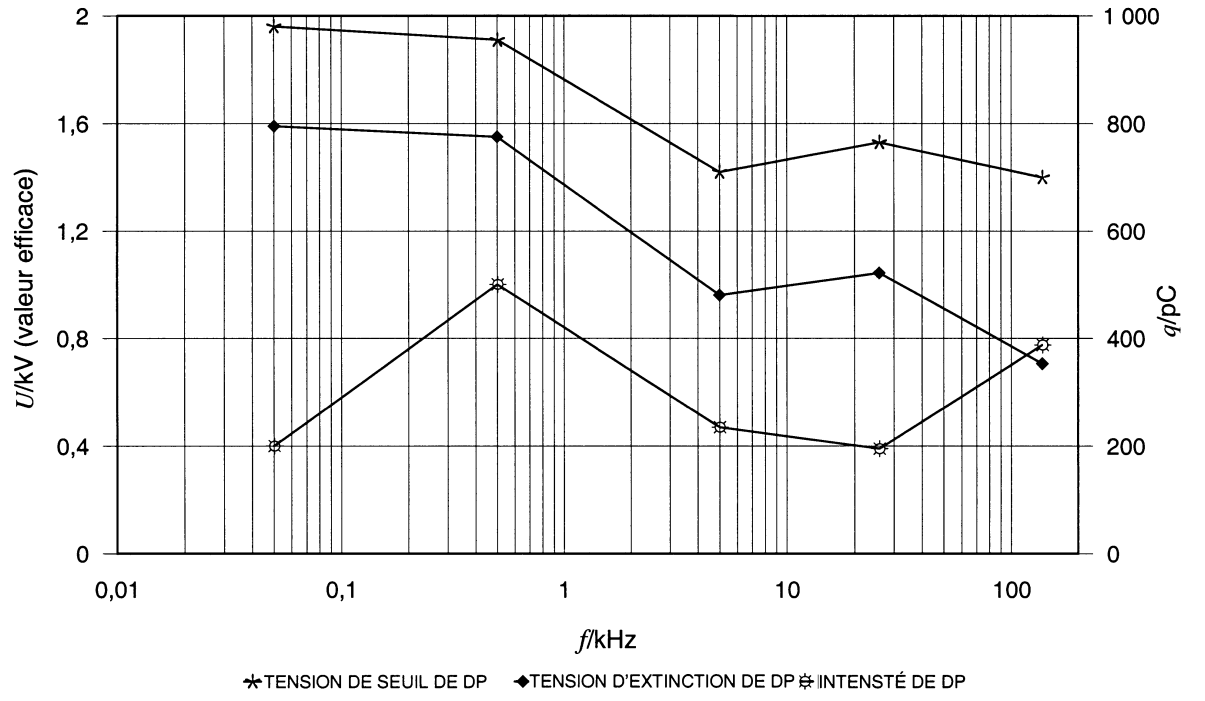


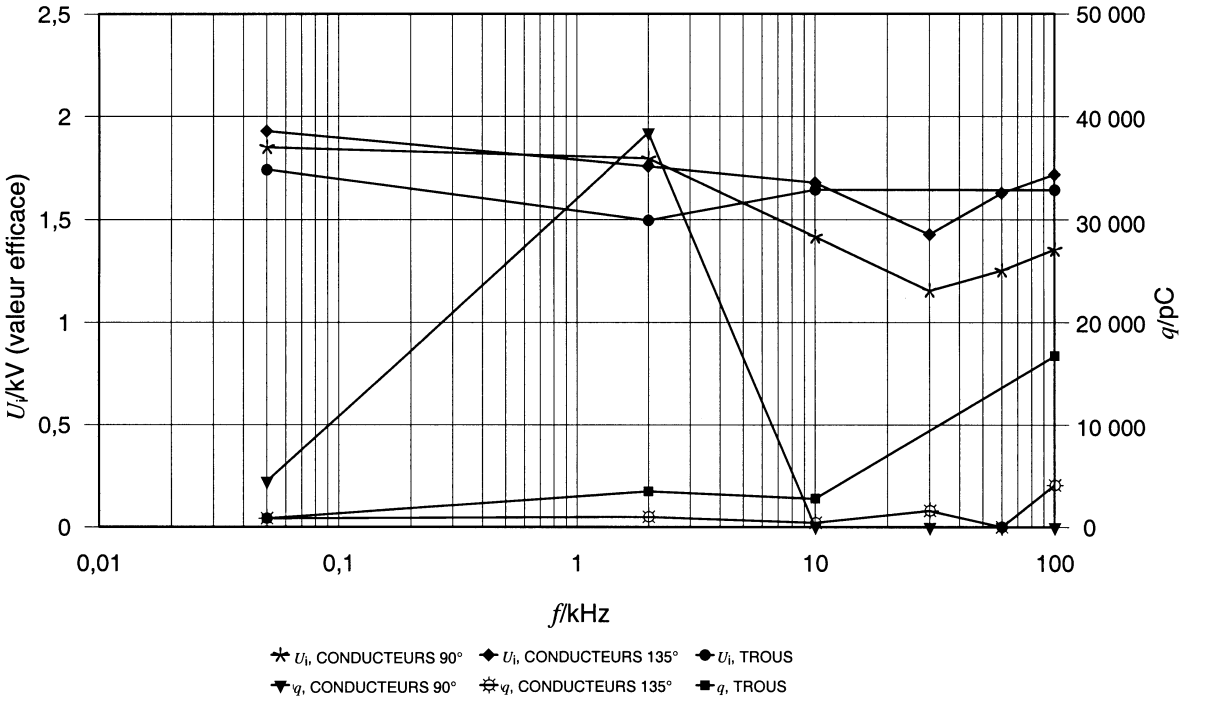
Figure D.9 – PD testing of optocouplers at high-frequency voltage [30]

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale



IEC 1374/05

Figure D.10 – Essais de DP des transformateurs d'impulsion; influence de la fréquence de la tension [30]



IEC 1375/05

d distance d'isolement

U_i tension de seuil de DP

Figure D.11 – Essais de DP des circuits imprimés revêtus; U_i, d = 0,2 mm [30]

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

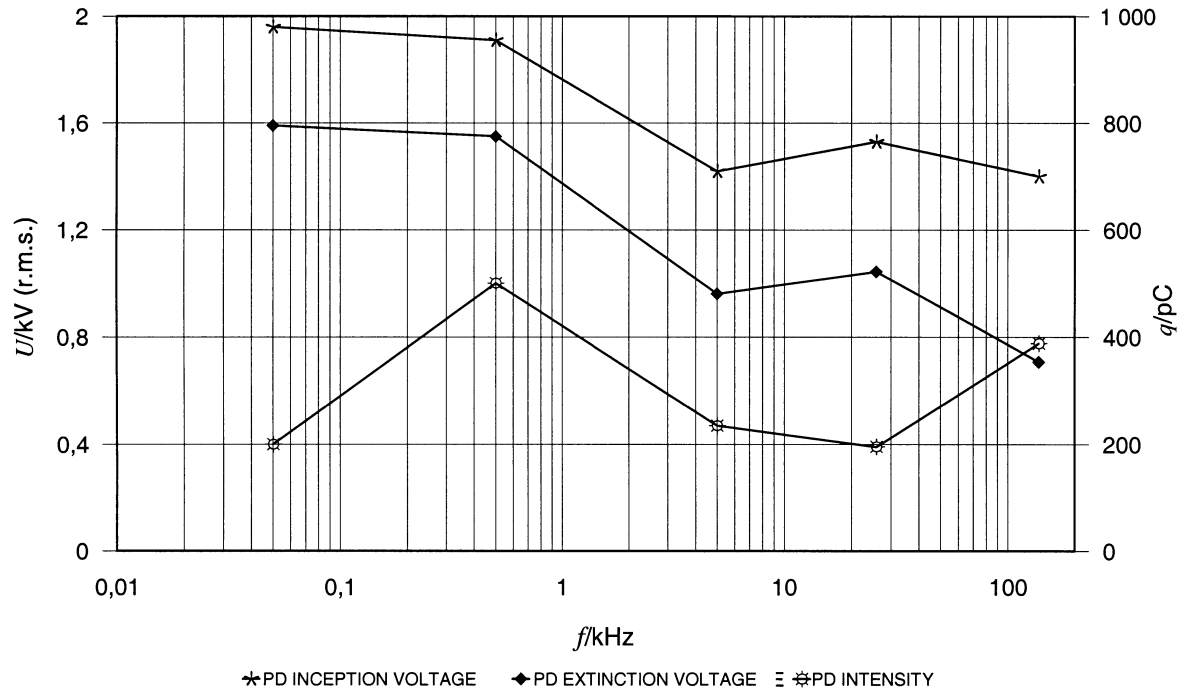
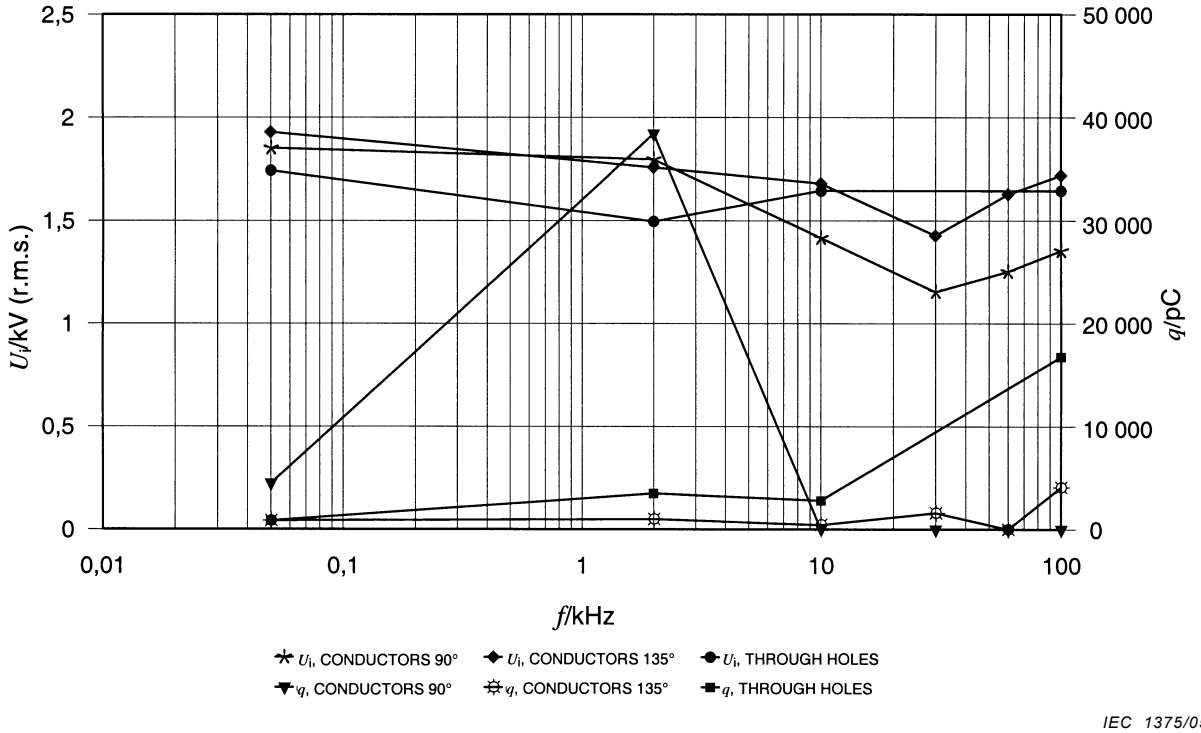


Figure D.10 – PD testing of impulse transformers; influence of the frequency of the voltage [30]



d clearance

U_i PD inception voltage

Figure D.11 – PD testing of coated printed circuit boards; U_i, d = 0,2 mm [30]

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---
Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

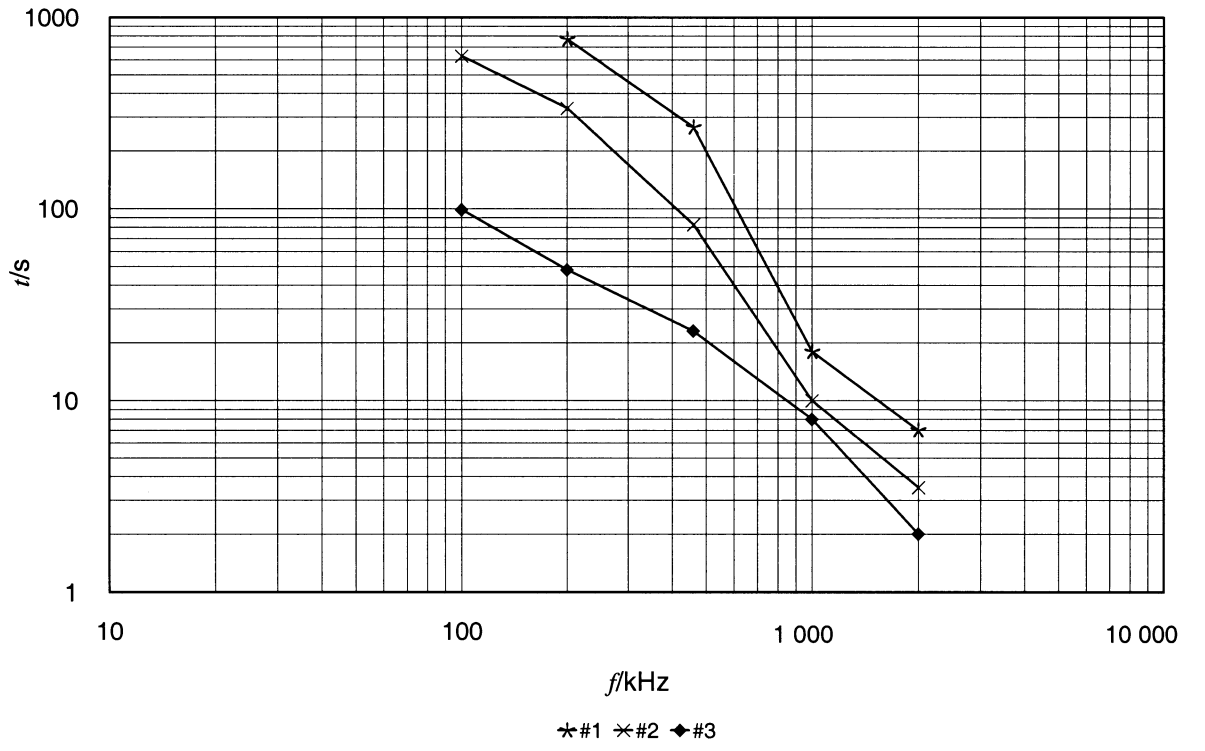


Figure D.12 – Durée de vie *t* des fils émaillés (paire torsadée) sous une tension à haute fréquence; la contrainte est de 10 % au-dessus de la tension de seuil de DP [31]

Pour les transformateurs d'impulsion, la fréquence de la tension est un facteur d'influence important. En augmentant la fréquence au-dessus de la fréquence industrielle, les caractéristiques de DP sont dégradées significativement. Comme représenté à la Figure D.10 [30], les tensions d'extinction de DP sont réduites. L'intensité de DP n'est pas particulièrement élevée, mais la fréquence de répétition des impulsions de DP augmente proportionnellement à la fréquence d'essai, ce qui entraîne une augmentation du potentiel de dégradation.

Pour les circuits imprimés revêtus, les caractéristiques d'isolation ne sont pas tant affectées par la fréquence de la tension. Comme représenté à la Figure D.11 [30] pour différents schémas conducteurs, la tension de seuil de DP n'est que légèrement réduite avec la fréquence de la tension. Cependant, en raison de l'intensité de DP élevée et de la haute fréquence, seule une durée de vie très courte peut être attendue si les DP apparaissent. Par conséquent, même l'essai de DP, qui est habituellement considéré comme non destructeur, peut dégrader l'éprouvette sévèrement.

Une certaine idée de la durée de vie t des films isolants de faible épaisseur en cas de DP sous une contrainte de tension à haute fréquence peut être obtenue à partir de la Figure D.12 [31]. Bien que la tension ne soit que de 10 % au-dessus de la tension de seuil de DP, la durée de vie peut être de l'ordre de quelques minutes ou moins, de telle sorte que cette éprouvette ne puisse même pas subir avec succès un essai à haute tension d'1 min avec une tension à haute fréquence.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

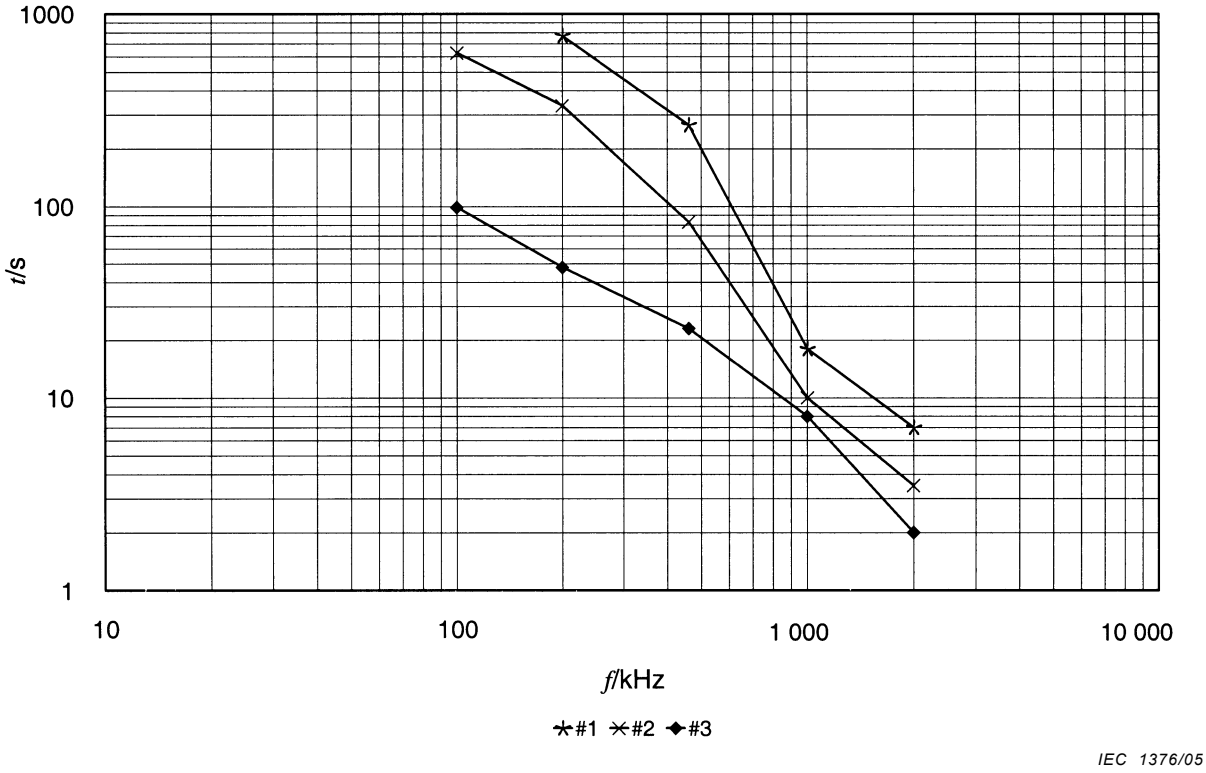


Figure D.12 – Lifetime t of enamelled wires (twisted pair) at high-frequency voltage; stress is 10 % above the PD inception voltage [31]

For impulse transformers, the frequency of the voltage is an important influencing factor. By increasing the frequency above power frequency, the PD-characteristics are degraded significantly. As shown in Figure D.10 [30], the PD-extinction voltages are reduced. The PD-intensity is not particularly high, but the repetition frequency of the PD-impulses increases in proportion to the test frequency, which results in an increasing potential of degradation.

For coated printed circuit boards the insulation characteristics are not so much affected by the frequency of the voltage. As shown in Figure D.11 [30] for different conductor patterns the PD-inception voltage is only slightly reduced with the frequency of the voltage. However due to the high PD-intensity and the high frequency only a very short life time can be expected if PD occurs. Therefore even the PD-test, which is usually regarded as non destructive, can degrade the test specimen severely.

Some idea of the lifetime t of thin insulating films in case of PD under high-frequency voltage stress can be obtained from Figure D.12 [31]. Although the voltage is only 10 % above the PD-inception voltage, the lifetime can be in the order of minutes or less so that this specimen even cannot pass a 1 min high-voltage test with high-frequency voltage.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Annexe E
(informative)

Isolation subissant des contraintes avec des tensions à haute fréquence non sinusoïdales

E.1 Objectif

La présente norme traite de l'influence des tensions à haute fréquence sinusoïdales sur le dimensionnement et les essais de l'isolation. Dans de nombreux cas pratiques, la contrainte de tension réelle est loin d'être sinusoïdale. Des impulsions périodiques avec des formes d'ondes variant fortement peuvent être trouvées dans de nombreuses applications.

Dans ce cas, une analyse harmonique de la forme d'impulsion est nécessaire, et les fréquences sinusoïdales correspondantes doivent être identifiées.

La considération suivante ne prend pas en compte l'effet de la forme d'onde de tension sur la distribution de tension à travers l'isolation des enroulements.

E.2 Analyse harmonique

Aux Figures E.1 à E.8, l'analyse harmonique des tensions de chocs périodiques est réalisée. Aux Figures E.1 et E.2, une forme d'onde rectangulaire symétrique n'est analysée que pour des besoins de comparaison. Aux Figures E.3 et E.4, un cas plus pratique est analysé, qui a été tiré de l'Amendement 2 de la Partie 1. Cette forme d'onde a déjà été représentée à la Figure 4.

Dans les deux cas, conformément aux Figures E.2 et E.4, le spectre est dominé par l'onde fondamentale. La relation entre la fondamentale et la 3ème harmonique plus importante n'est pas beaucoup modifiée par le claquage.

Cela est également vrai si, conformément aux Figures E.5 et E.6, une forme d'onde oscillante avec un claquage similaire à celui de la Figure E.3 est considérée. Dans ce cas, la 3ème harmonique est même réduite, mais en raison de l'oscillation à 1 MHz, la 9ème et la 11ème harmoniques sont améliorées de façon significative.

Même si le claquage est augmenté considérablement, comme représenté aux Figures E.7 et E.8, le résultat est en principe le même. Il convient de noter que cet exemple est rarement rencontré dans des cas pratiques.

Le spectre est dominé par la fondamentale. La relation entre la fondamentale et la 3ème harmonique n'est pas beaucoup modifiée par le claquage. Il semble par conséquent possible de concevoir et de soumettre aux essais l'isolation solide pour la fréquence fondamentale de la tension de chocs. De plus, la valeur de crête de la tension non sinusoïdale est prise en compte en ajustant l'amplitude de l'onde fondamentale à cette valeur de crête.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Annex E
(informative)

Insulation stressed with non-sinusoidal high-frequency voltages

E.1 Objective

This standard addresses the influence of sinusoidal high-frequency voltages on the dimensioning and testing of insulation. In many practical cases, the actual voltage stress is far from sinusoidal. Periodic pulses with greatly varying waveshape can be found in many applications.

In this case, a harmonic analysis of the impulse shape is required, and the relevant sinusoidal frequencies have to be identified.

The following consideration does not take into account the effect of the voltage waveshape on the voltage distribution across the insulation of windings.

E.2 Harmonic analysis

In Figures E.1 to E.8, the harmonic analysis of periodic impulse voltages is performed. In Figures E.1 and E.2 a symmetrical rectangular waveshape is analysed only for comparison purposes. In Figures E.3 and E.4 a more practical case is analysed, which was taken from Amendment 2 to Part 1. This waveshape was already shown in Figure 4.

In both cases, according to Figures E.2 and E.4, the spectrum is dominated by the fundamental wave. The relation between the fundamental and the most important 3rd harmonic is not much changed by the overshoot.

This is also true, if according to Figures E.5 and E.6, a ringing waveshape with similar overshoot as in Figure E.3 is assumed. In that case the 3rd harmonic is even reduced, but due to the 1 MHz oscillation the 9th and the 11th harmonic are significantly enhanced.

Even if the overshoot is greatly increased, as shown in Figures E.7 and E.8, the result in principle is the same. It should be noted that this example is rarely encountered in practical cases.

The spectrum is dominated by the fundamental. The relation between the fundamental and the 3rd harmonic is not much changed by the overshoot. Therefore it seems to be possible to design and test solid insulation for the fundamental frequency of the impulse voltage. In addition, the peak value of the non-sinusoidal voltage is taken into account by adjusting the amplitude of the fundamental wave to this peak value.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

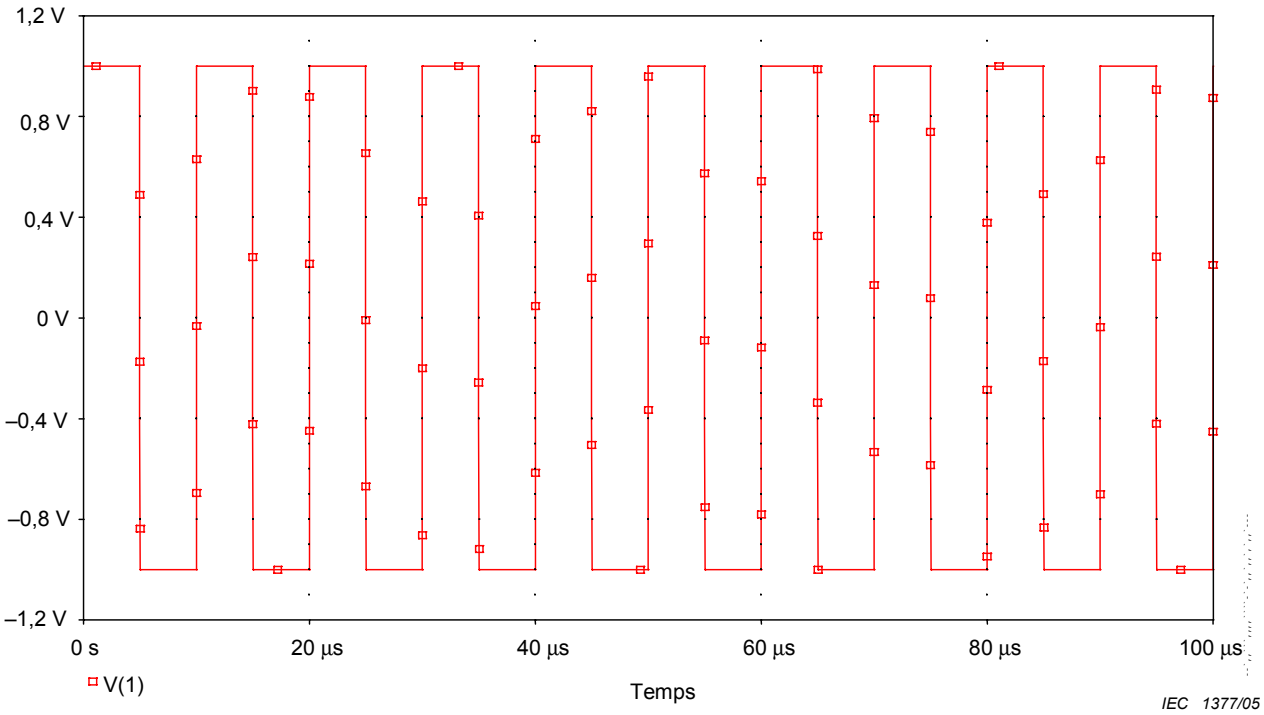


Figure E.1 – Tension de chocs périodique, forme d'onde rectangulaire

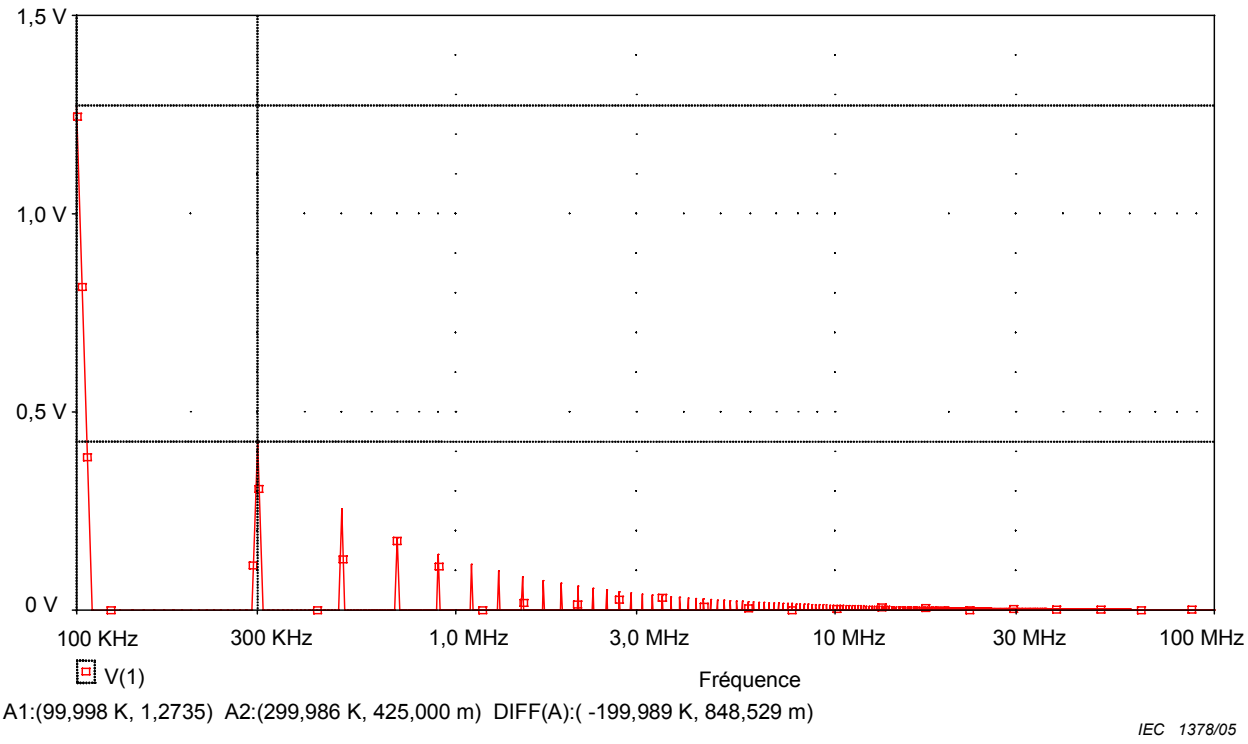


Figure E.2 – Tension de chocs périodique, forme d'onde rectangulaire, spectre

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

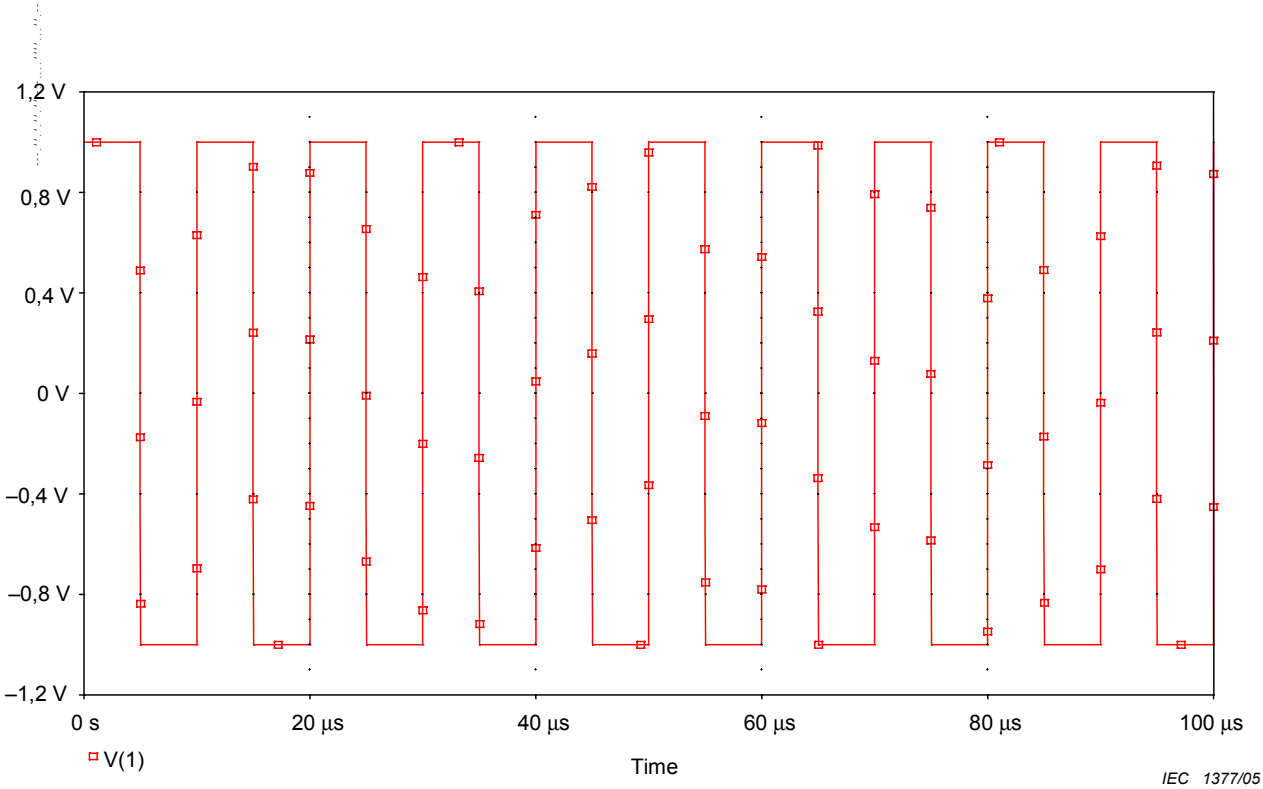


Figure E.1 – Periodic impulse voltage, rectangular waveshape

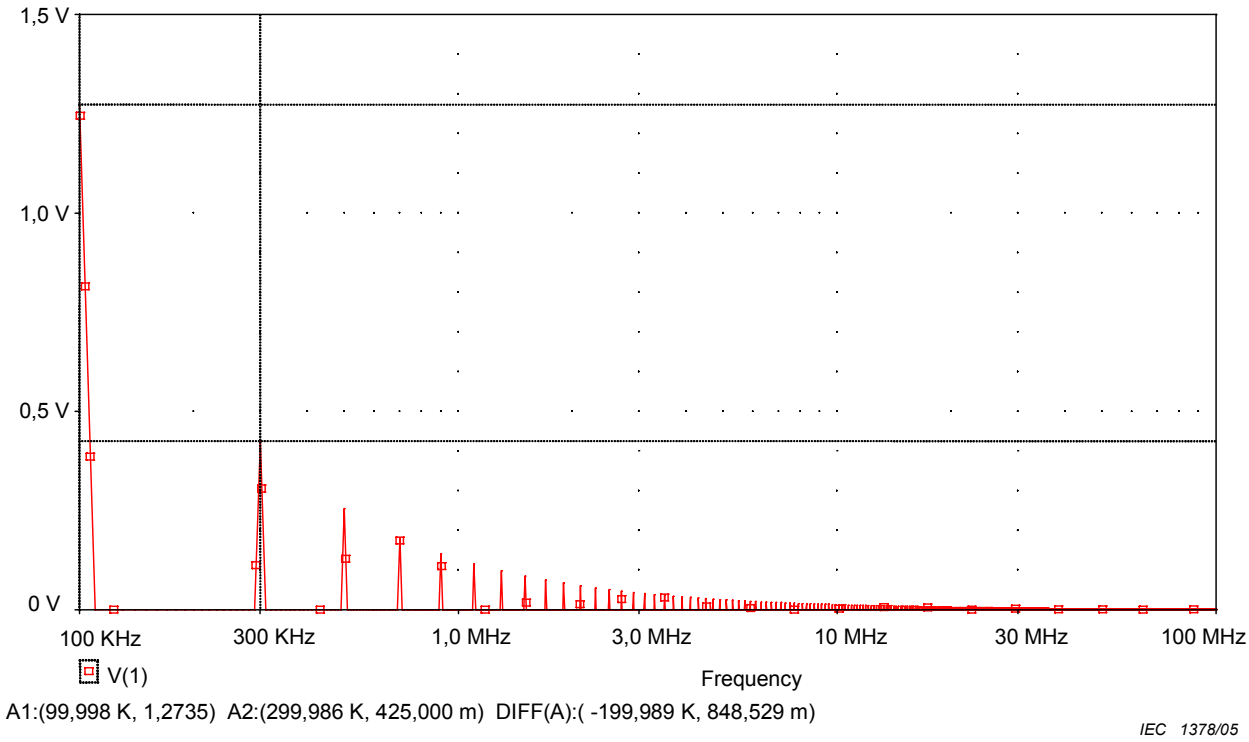


Figure E.2 – Periodic impulse voltage, rectangular waveshape, spectrum

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

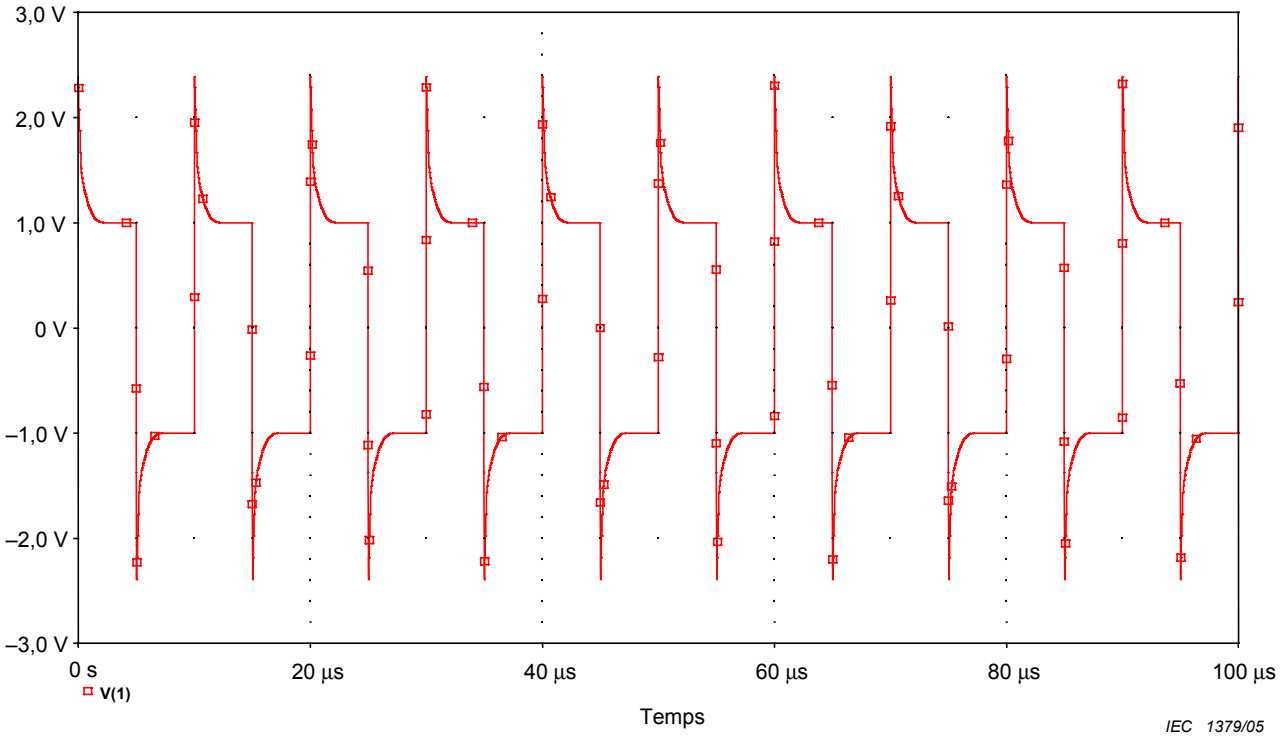


Figure E.3 – Tension de chocs périodique, forme d'onde rectangulaire avec claquage (voir Figure 4)

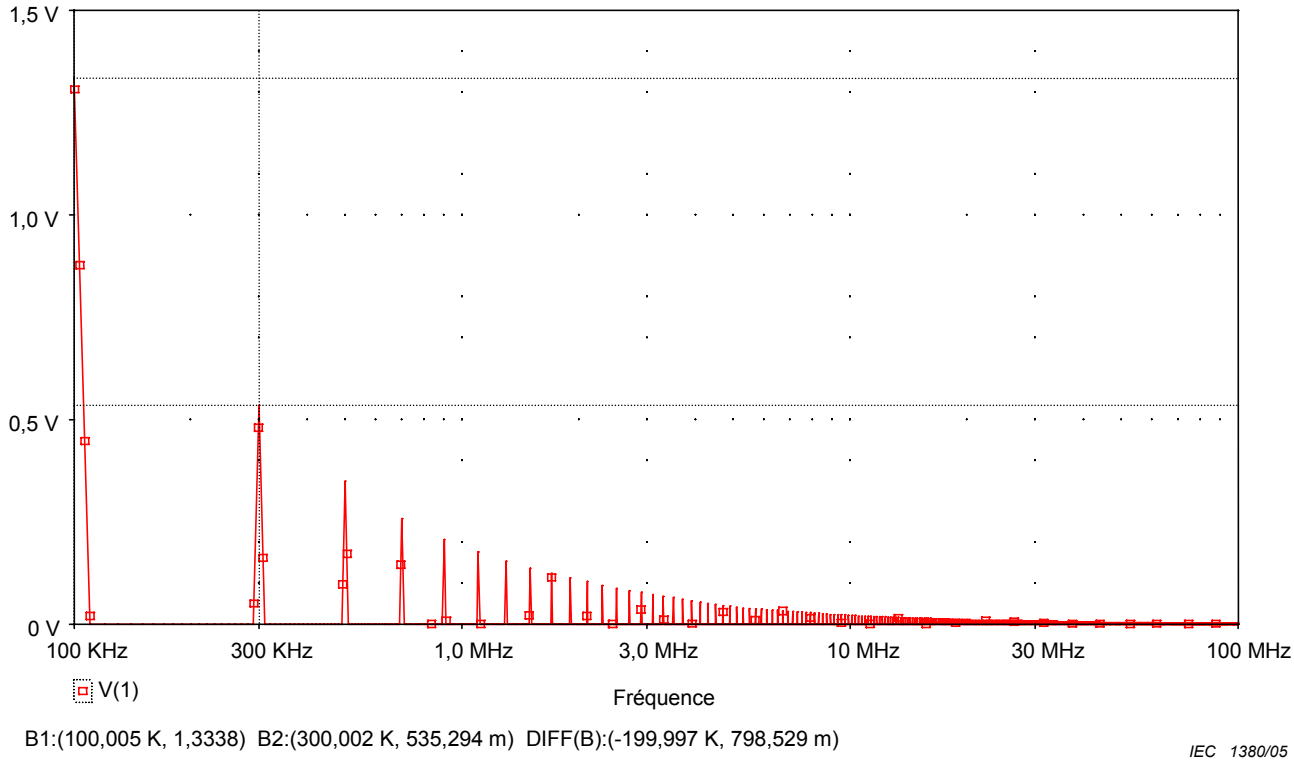


Figure E.4 – Tension de chocs périodique, forme d'onde rectangulaire avec claquage, spectre

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

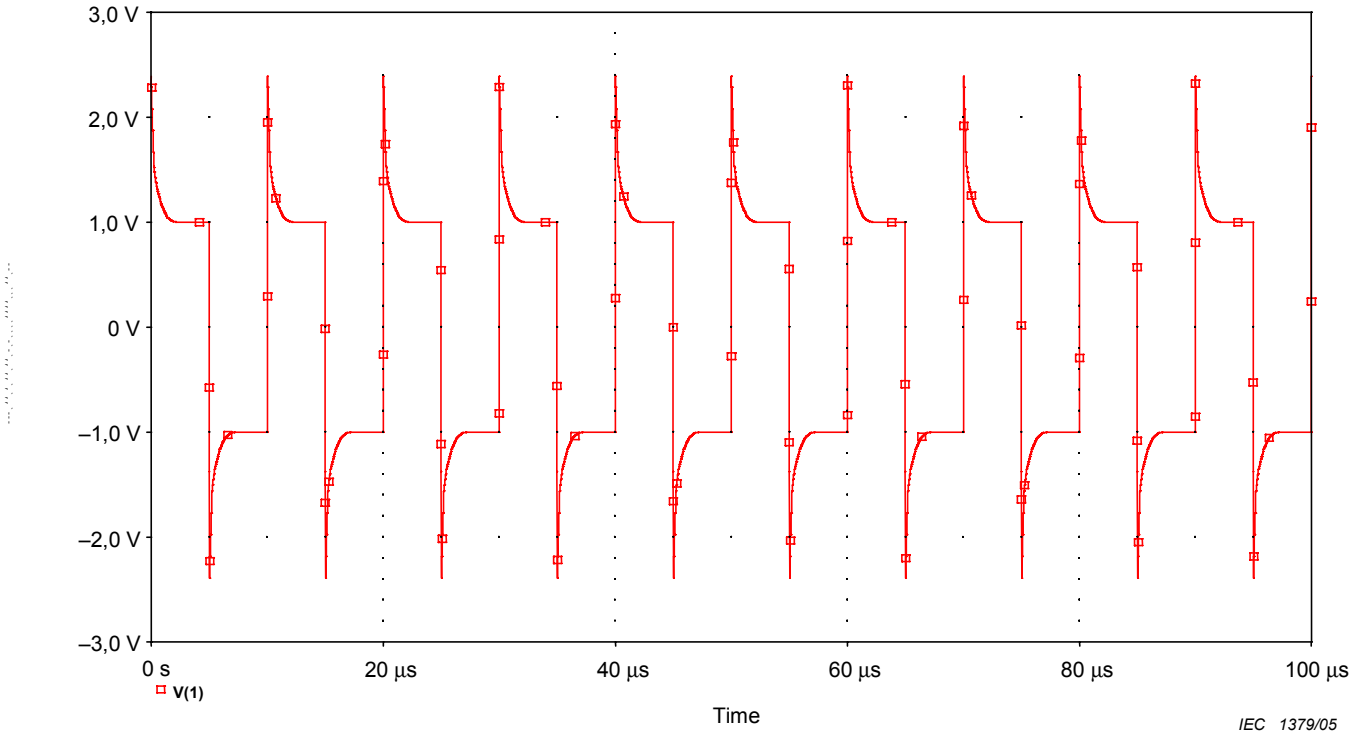


Figure E.3 – Periodic impulse voltage, rectangular waveshape with overshoot (see Figure 4)

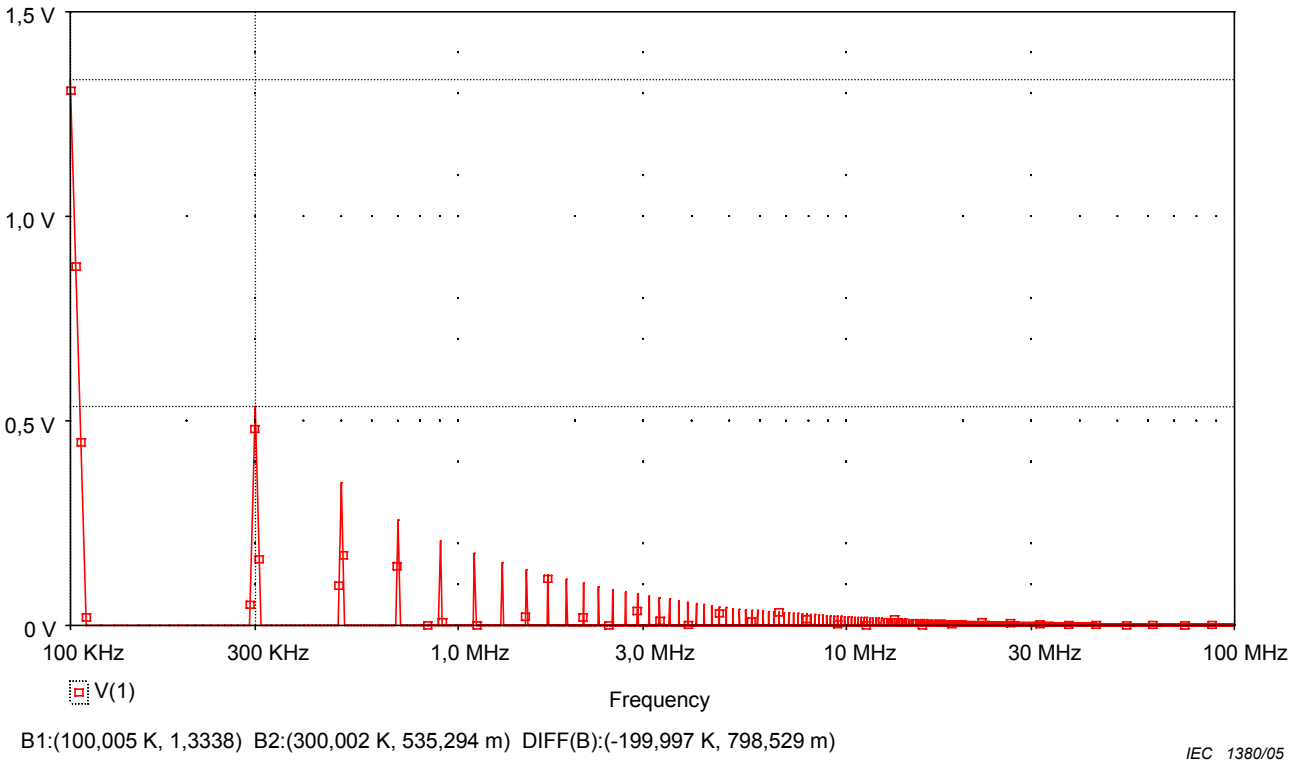


Figure E.4 – Periodic impulse voltage, rectangular waveshape with overshoot, spectrum

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

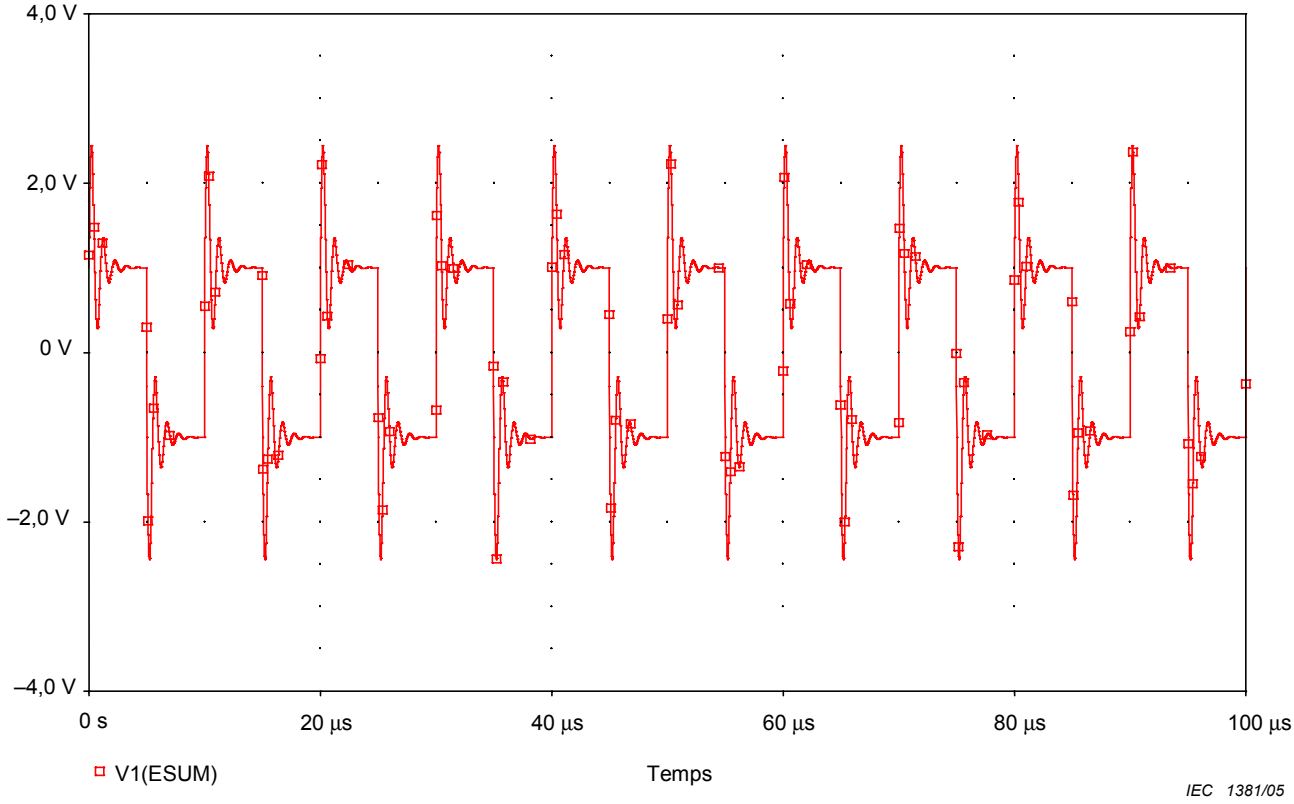


Figure E.5 – Tension de chocs périodique, forme d'onde rectangulaire avec oscillation (1 MHz)

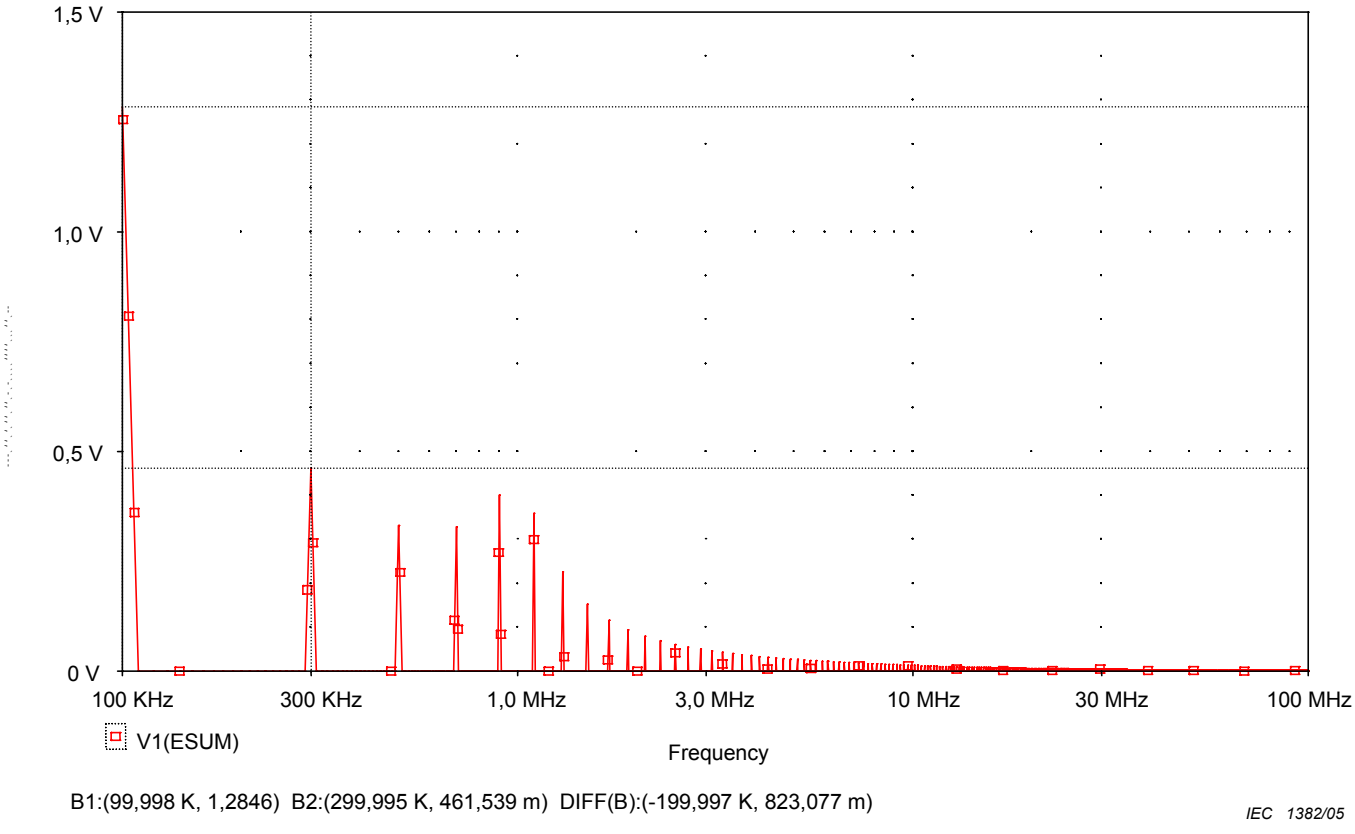


Figure E.6 – Tension de chocs périodique, forme d'onde rectangulaire avec oscillation (1 MHz), spectre

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

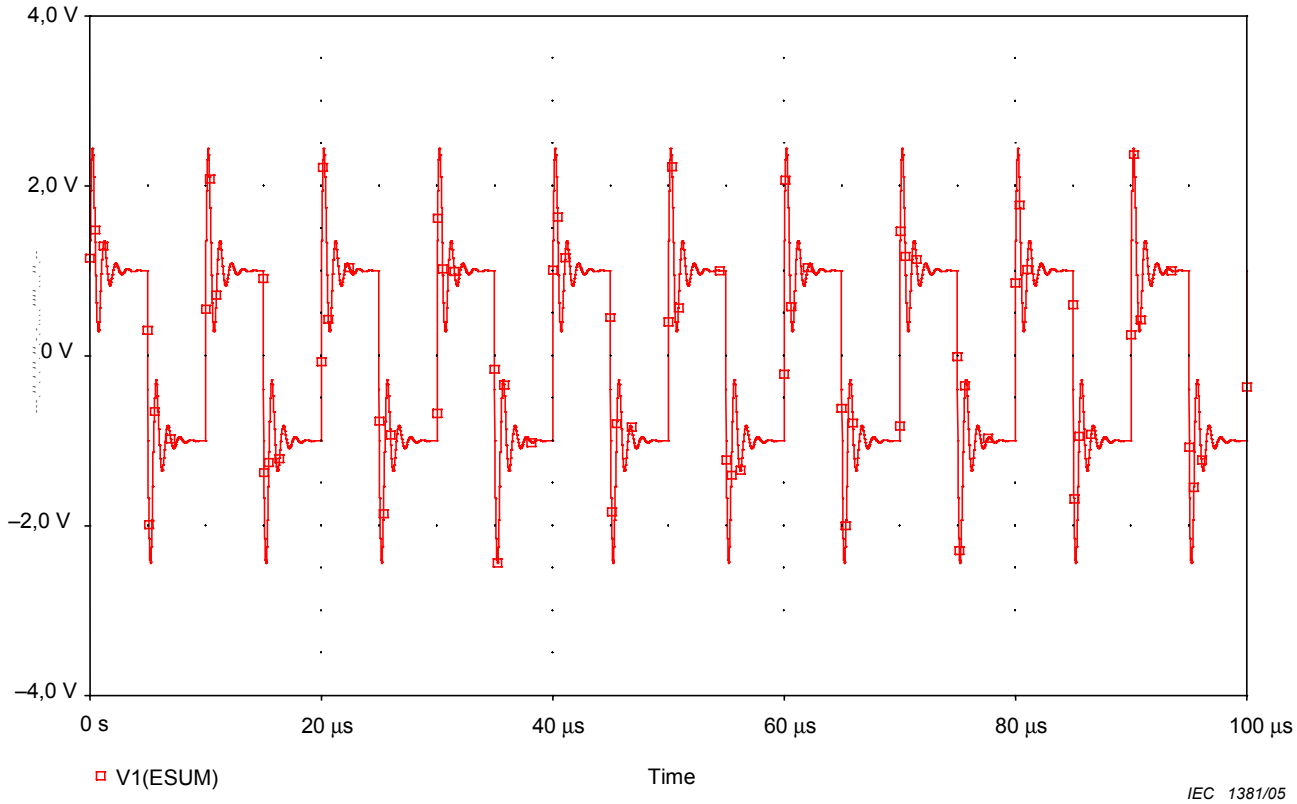


Figure E.5 – Periodic impulse voltage, rectangular waveshape with ringing (1 MHz)

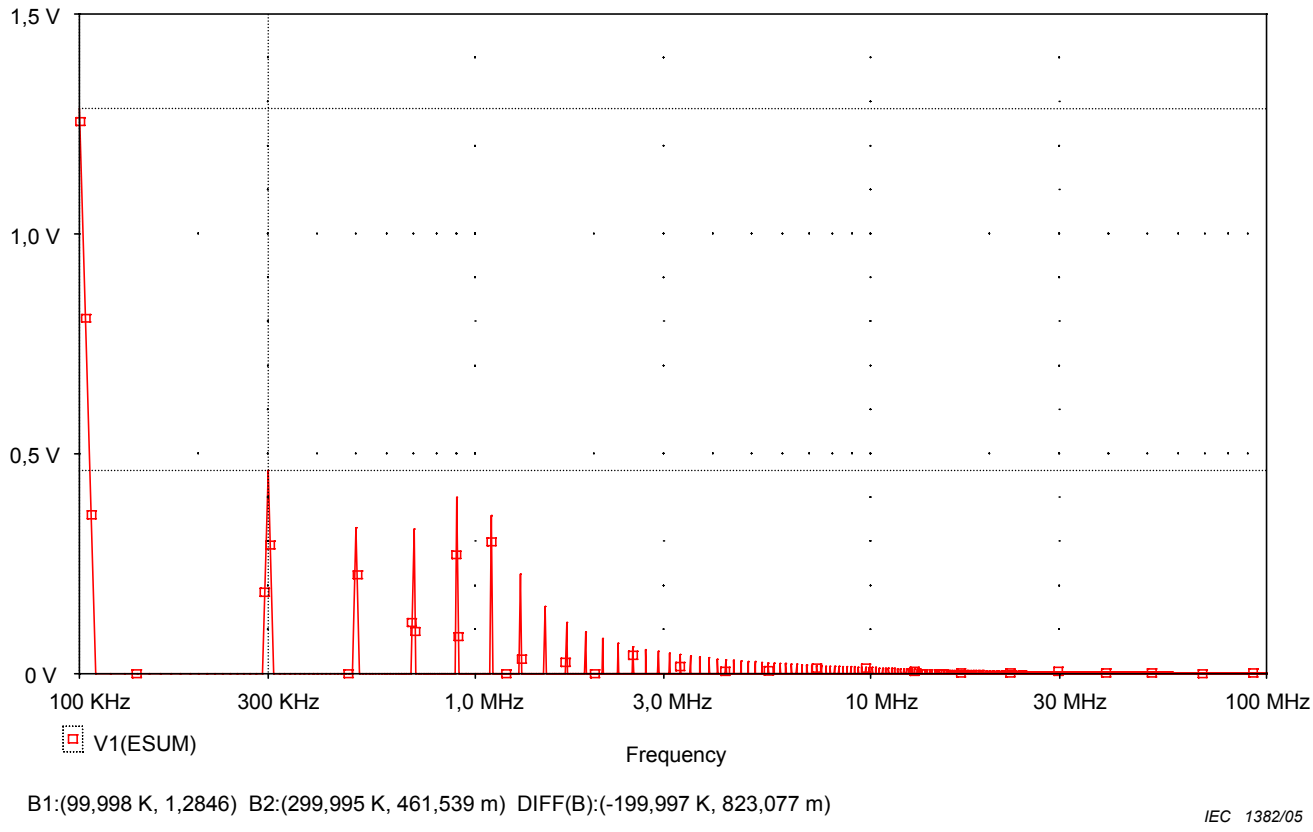


Figure E.6 – Periodic impulse voltage, rectangular waveshape with ringing (1 MHz), spectrum

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

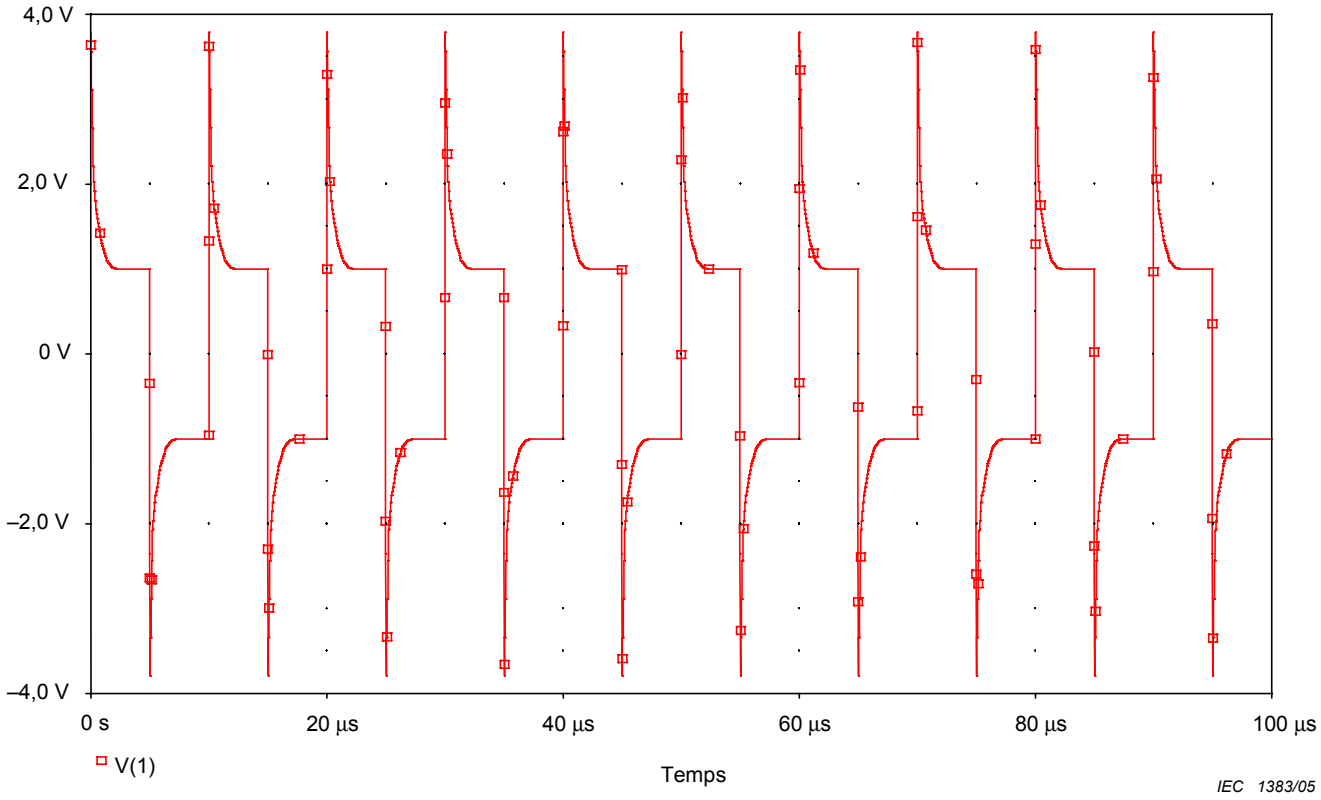


Figure E.7 – Tension de chocs périodique, forme d'onde rectangulaire avec claquage élevé

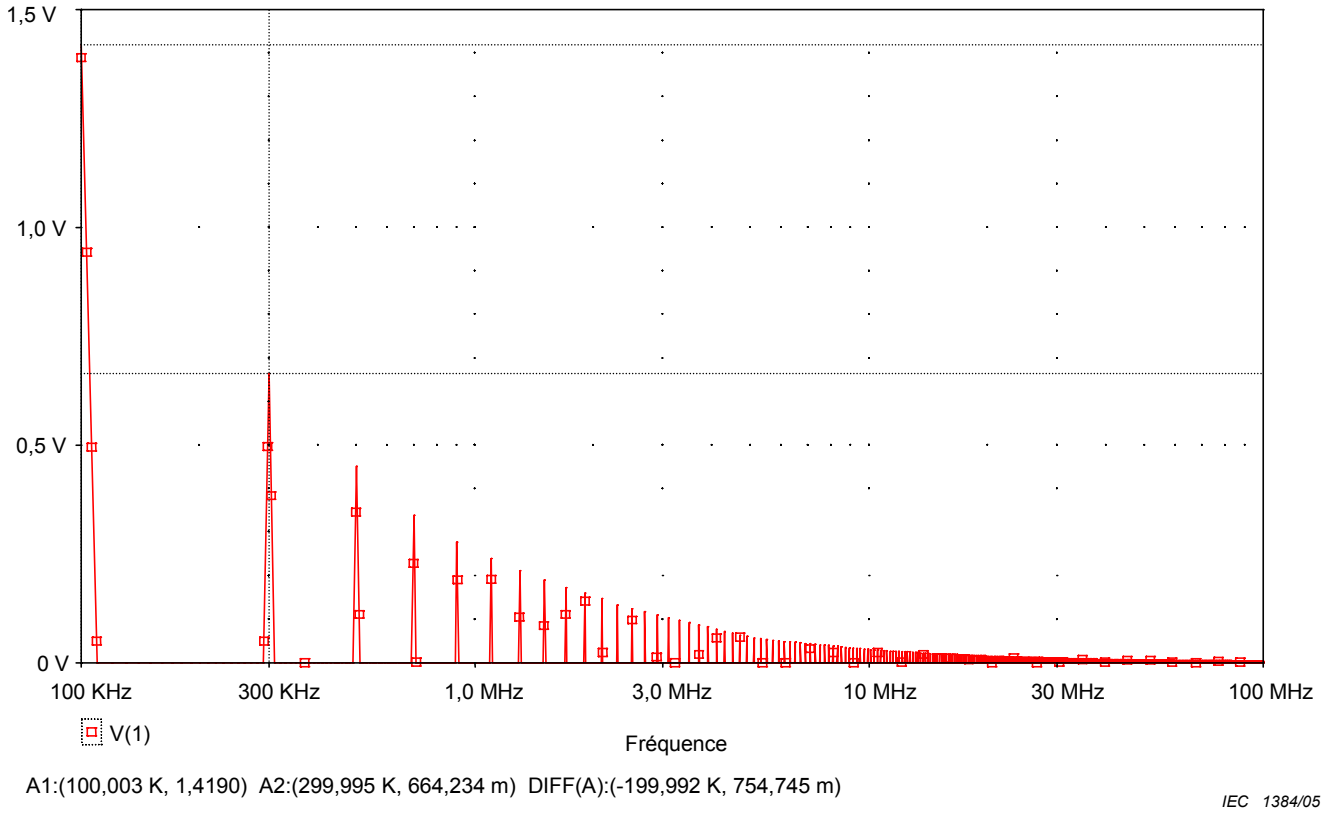


Figure E.8 – Tension de chocs périodique, forme d'onde rectangulaire avec claquage élevé, spectre

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

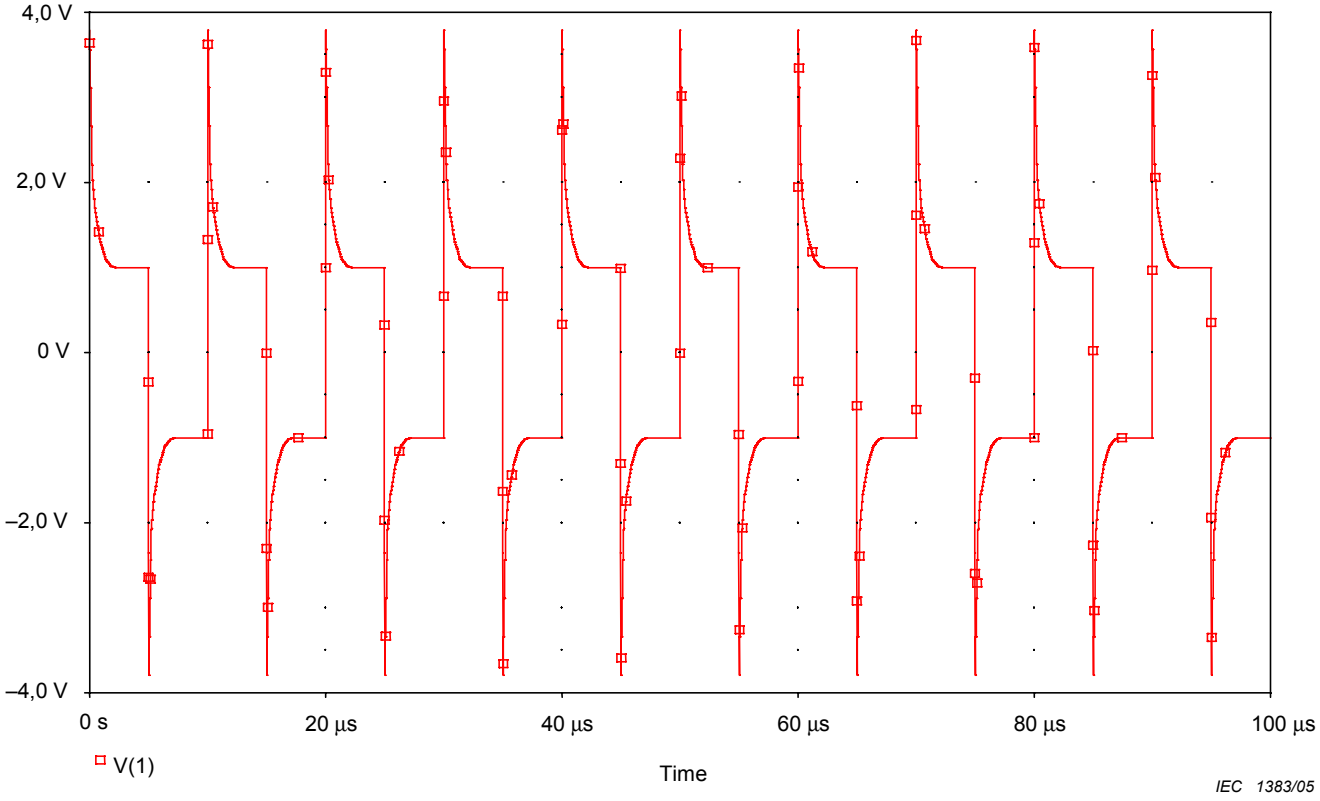


Figure E.7 – Periodic impulse voltage, rectangular waveshape with high overshoot

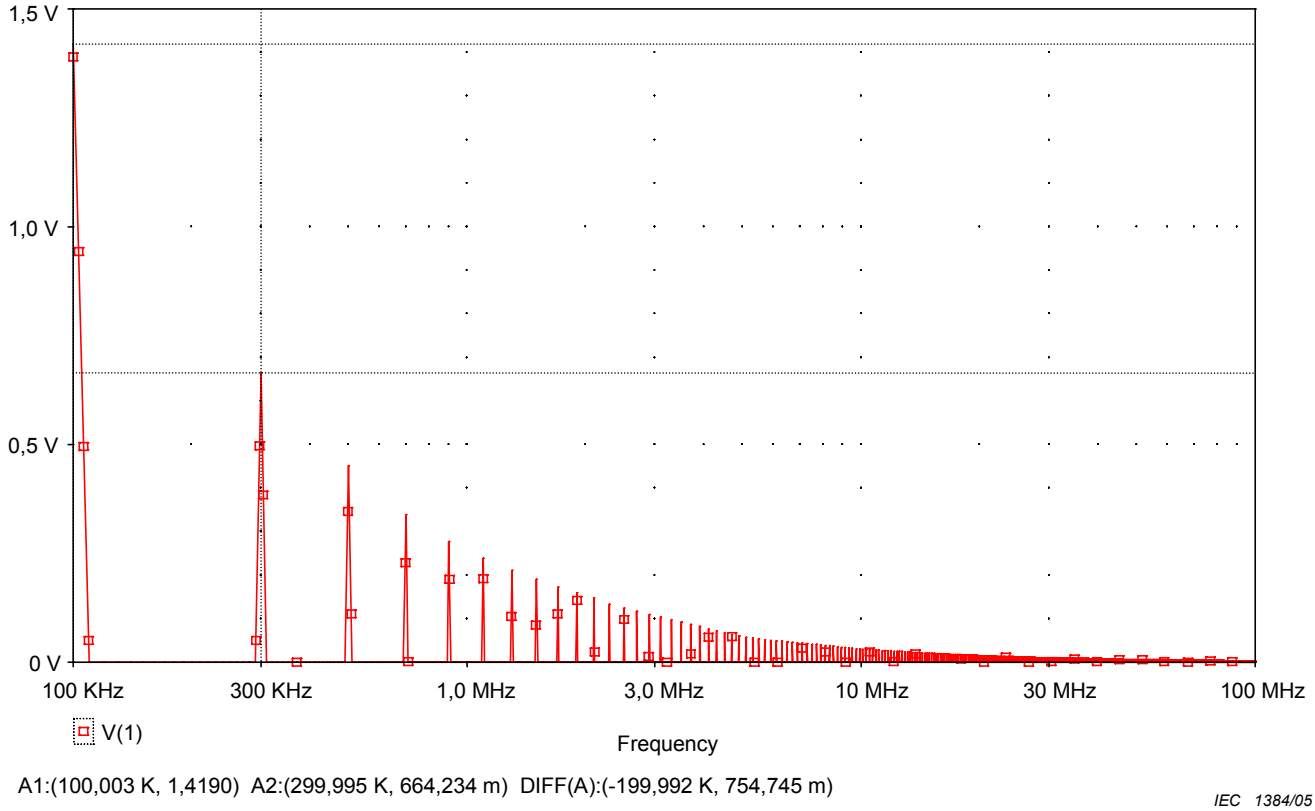


Figure E.8 – Periodic impulse voltage, rectangular waveshape with high overshoot, spectrum

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

Annexe F
(informative)

Schémas de dimensionnement

Les schémas suivants montrent les relations entre les facteurs qui influencent le dimensionnement des distances d'isolement et des lignes de fuite pour la coordination de l'isolement. Les schémas mettent en valeur les facteurs essentiels et ne sont pas destinés à remplacer la lecture complète des paragraphes correspondants. En particulier, ils ne prennent pas en compte la situation de champ homogène (valeurs du cas B), un dimensionnement plus précis des distances d'isolement pour des fréquences entre f_{crit} et f_{min} et un dimensionnement de l'isolation solide afin d'éviter les essais avec des tensions à haute fréquence.

Il est à noter que les procédures de dimensionnement des distances d'isolement et des lignes de fuite sont indépendantes. C'est pourquoi, lorsqu'une distance d'isolement et une ligne de fuite coïncident sur la même surface isolante, on doit utiliser celle qui est la plus importante, soit la distance d'isolement soit la ligne de fuite.

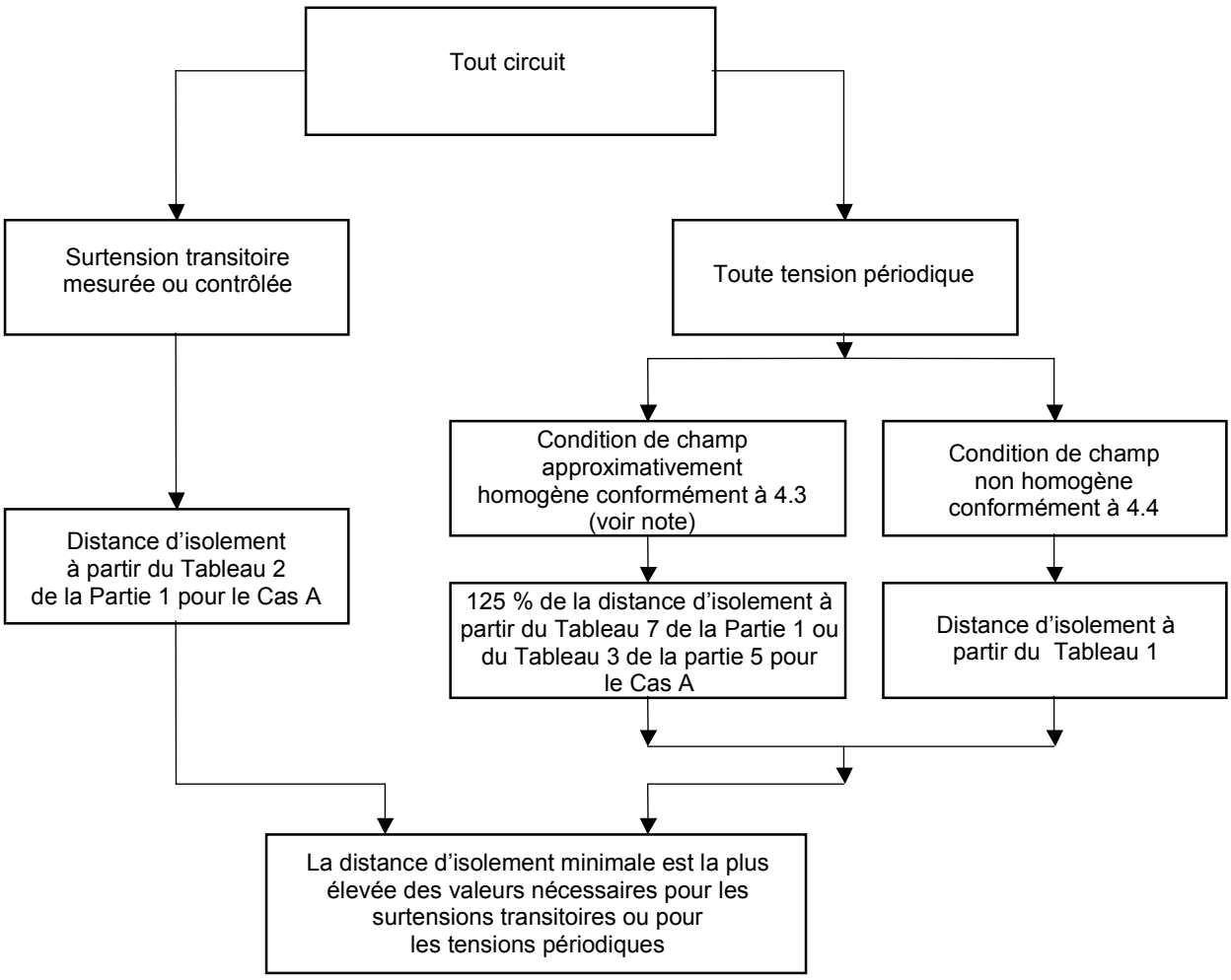


Figure F.1 – Schéma pour le dimensionnement des distances d'isolement

NOTE Pour les fréquences dépassant 30 kHz, un champ approximativement homogène est considéré exister lorsque le rayon de courbure des parties conductrices est supérieur ou égal à 20 % de la distance d'isolement. Le rayon de courbure nécessaire ne peut être spécifié qu'à la fin de la procédure de dimensionnement.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Annex F
(informative)

Dimensioning diagrams

The following diagrams show the relationships between the factors influencing the dimensioning of clearances and creepage distances for insulation coordination. The diagrams highlight the major factors and are not intended to substitute for a full review of the relevant subclauses. In particular they do not take into account the homogeneous field situation (case B values), more precise dimensioning of clearances for frequencies between f_{crit} and f_{min} and dimensioning of solid insulation in order to avoid testing with HF-voltages.

It is to be noted that the dimensioning procedures for clearances and creepage are independent. Therefore, where a clearance and a creepage distance are coincidental over the same insulating surface, the larger of the clearance or the creepage distance is to be used.

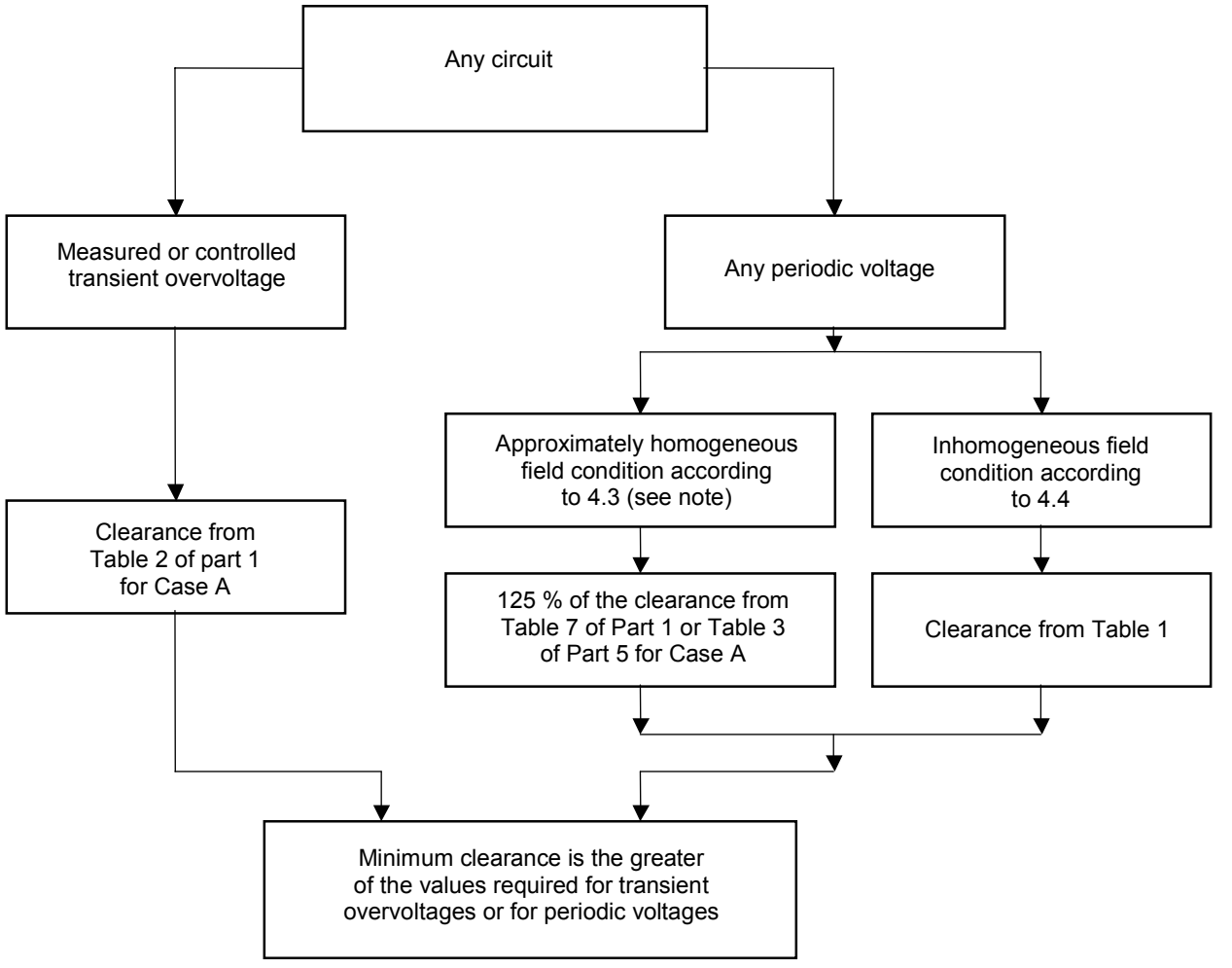


Figure F.1 – Diagram for dimensioning of clearances

NOTE For frequencies exceeding 30 kHz, an approximately homogeneous field is considered to exist when the radius of curvature of the conductive parts is equal or greater than 20 % of the clearance. The necessary radius of curvature can only be specified at the end of the dimensioning procedure.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

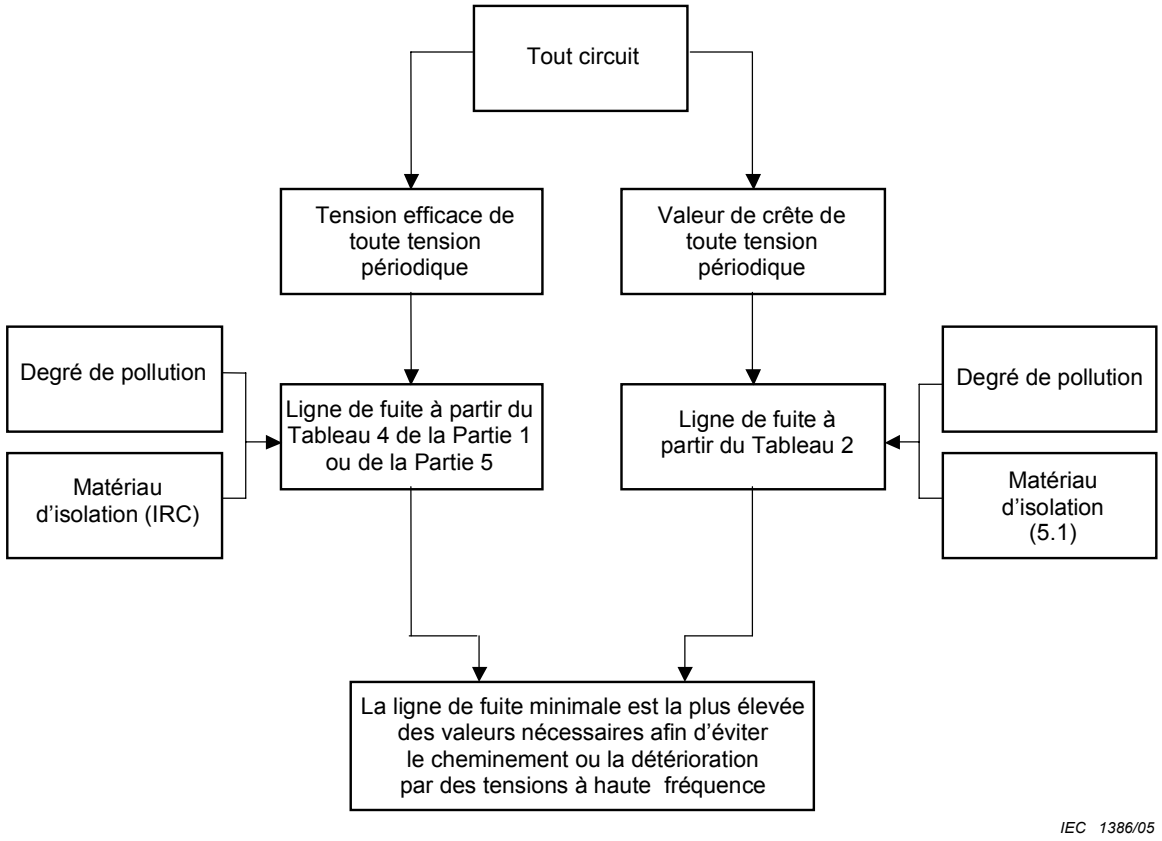


Figure F.2 – Schéma pour le dimensionnement des lignes de fuite

Pour le dimensionnement de l'isolation renforcée, il est nécessaire de satisfaire à des exigences supplémentaires, conformément à la Partie 1.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

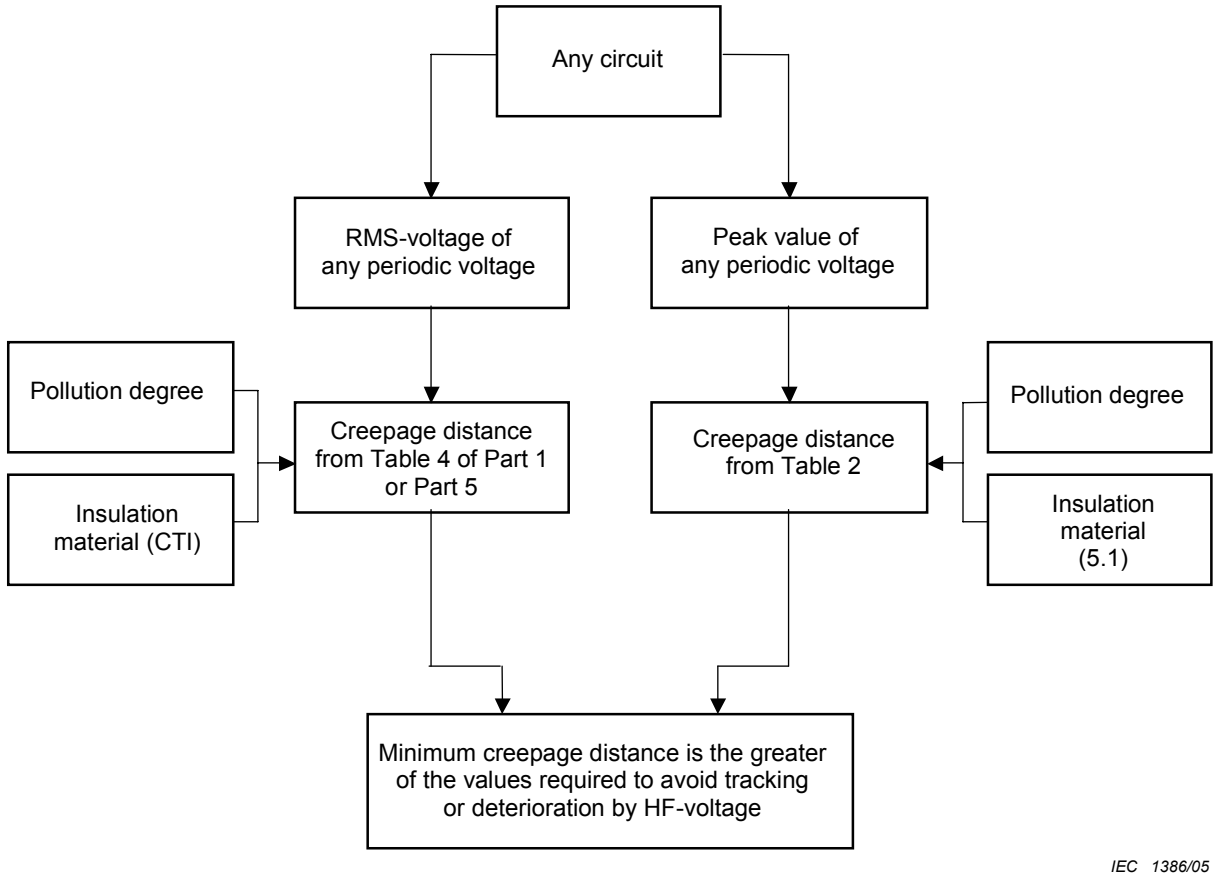


Figure F.2 – Diagram for dimensioning of creepage distances

For dimensioning of reinforced insulation additional requirements need to be fulfilled according to Part 1.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Bibliographie

[1] B. Gänger: „Electrical breakdown of gases“ (in German), Springer Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1953, pp. 422-450.

[2] W. Boeck, W. Pfeiffer: „Conduction and Breakdown in Gases“ in Vol. 4 of the „Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering“; John Wiley, New York, 2000.

[3] F. Müller: „Electrical breakdown of air at very high frequency“ (in German), Archiv für Elektrotechnik, Vol. 28, pp. 341-348, 1934.

[4] H. Lassen: „Frequency dependence of the breakdown voltage in air“ (in German), Archiv für Elektrotechnik, Vol. 25, pp. 322-332, 1931.

[5] R. Plessow: „Requirements and possibilities of PD measuring techniques at high-frequency voltage, Application for clearances and creepage distances“ (in German), Dissertation, TU Darmstadt, 1997.

[6] M. Paede, W. Pfeiffer: „Investigation of the insulation characteristics of clearances and creepage distances for high-frequency voltage stress“ (in German), Final Report to the German Research Foundation, 1999.

[7] ISO 7864: Aiguilles hypodermiques stériles, non réutilisables, 1993.

[8] W. Pfeiffer, R. Plessow, N. Kolev, P. Darjanov, D. Darjanova: „About the dimensioning of a needle plane electrode arrangement for comparative investigations of partial discharges in air“, Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, 1997, pp. 301–307.

[9] F. Uhlemann: „Evaluation of new dimensioning criteria for creepage distances in low-voltage equipment“ (in German), Dissertation, TH Darmstadt, 1990.

[10] A. Roth: High-voltage engineering, Springer Verlag, Wien 1959.

[11] T. Tanaka: „Internal partial discharge and material degradation“, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 21(1986), pp. 899-905.

[12] H. Koch, W. Pfeiffer: „Computer aided partial discharge testing of thin solid insulation systems“, ETEP Vol. 2(1992), pp. 51-57.

[13] L. Simoni: „A general approach to the endurance of electrical insulation under temperature and voltage“, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 16(1981), pp. 277-289.

[14] W. Pfeiffer, R. Plessow: „Analysis of the insulation material degradation process in correlation to the temporal course of the partial discharge phenomena at high frequency voltage stress“, 1997 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Minneapolis, pp. 554-557.

[15] J.J. Chapman, L.J. Frisco: „Dielectric strength of solid insulation“, Electrical Manufacturing, Vol. 51(1954), pp. 136-143.

[16] A. Wichmann, P. Grünewald: „Lifetime evaluation of high-voltage insulation by acceleration with the frequency of the test voltage“ (in German), ETZ-A Vol. 95(1974), pp. 318-322.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Bibliography

[1] B. Gänger: „Electrical breakdown of gases“ (in German), Springer Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1953, pp. 422-450.

[2] W. Boeck, W. Pfeiffer: „Conduction and Breakdown in Gases“ in Vol. 4 of the „Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering“; John Wiley, New York, 2000.

[3] F. Müller: „Electrical breakdown of air at very high frequency“ (in German), Archiv für Elektrotechnik, Vol. 28, pp. 341-348, 1934.

[4] H. Lassen: „Frequency dependence of the breakdown voltage in air“ (in German), Archiv für Elektrotechnik, Vol. 25, pp. 322-332, 1931.

[5] R. Plessow: „Requirements and possibilities of PD measuring techniques at high-frequency voltage, Application for clearances and creepage distances“ (in German), Dissertation, TU Darmstadt, 1997.

[6] M. Paede, W. Pfeiffer: „Investigation of the insulation characteristics of clearances and creepage distances for high-frequency voltage stress“ (in German), Final Report to the German Research Foundation, 1999.

[7] ISO 7864: Sterile hypodermic needles for single use, 1993.

[8] W. Pfeiffer, R. Plessow, N. Kolev, P. Darjanov, D. Darjanova: „About the dimensioning of a needle plane electrode arrangement for comparative investigations of partial discharges in air“, Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, 1997, pp. 301–307.

[9] F. Uhlemann: „Evaluation of new dimensioning criteria for creepage distances in low-voltage equipment“ (in German), Dissertation, TH Darmstadt, 1990.

[10] A. Roth: High-voltage engineering, Springer Verlag, Wien 1959.

[11] T. Tanaka: „Internal partial discharge and material degradation“, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 21(1986), pp. 899-905.

[12] H. Koch, W. Pfeiffer: „Computer aided partial discharge testing of thin solid insulation systems“, ETEP Vol. 2(1992), pp. 51-57.

[13] L. Simoni: „A general approach to the endurance of electrical insulation under temperature and voltage“, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 16(1981), pp. 277-289.

[14] W. Pfeiffer, R. Plessow: „Analysis of the insulation material degradation process in correlation to the temporal course of the partial discharge phenomena at high frequency voltage stress“, 1997 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Minneapolis, pp. 554-557.

[15] J.J. Chapman, L.J. Frisco: „Dielectric strength of solid insulation“, Electrical Manufacturing, Vol. 51(1954), pp. 136-143.

[16] A. Wichmann, P. Grünewald: „Lifetime evaluation of high-voltage insulation by acceleration with the frequency of the test voltage“ (in German), ETZ-A Vol. 95(1974), pp. 318-322.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

[17] F. Daniels, R.A. Alberty: Physical Chemistry, Wiley, New York, 1961.

[18] H.S. Endicott, B.D. Hatch, R.G. Sohmer: „Application of the Eyring model to capacitor ageing data“, IEEE Transactions on Component Parts, Vol. 12(1965), pp. 34-41.

[19] J.J. Chapman, L.J. Frisco, J.S. Smith: „Dielectric failure of volume and surface types“, AIEE Trans., Vol. 74, pp. 349-354, 1955.

[20] H. Suhr: "Evaluation of the influencing factors on the breakdown voltage of thin insulating films" (in German), Dissertation, Technische Universität Berlin, 1961.

[21] Y. Ikeda, T. Tanaka: „Frequency acceleration characteristics in internal discharge endurance tests by a glass-covered electrode system“, IEEE Trans. Electric. Insulation, Vol. 17, pp. 64-69, 1982.

[22] F. Scheuerer: „Investigation of the insulation characteristics of solid insulation at high periodic voltage stress“ (in German), Dissertation, TH Darmstadt, 1993.

[23] CEI 60270:2000, Mesures des décharges partielles.

[24] R. Hund, W. Pfeiffer, H. Reinhard and F. Scheuerer: „Partial discharge testing of components for low-voltage equipment at high frequencies“, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1990, pp. 261-266.

[25] CEI 60851:1994, Méthodes d’essai des fils de bobinage.

[26] P.H.F. Morshuis: „Partial Discharge Mechanisms, Mechanisms Leading to Breakdown, Analyzed by Fast Electrical and Optical Measurements“, Dissertation, Delft University of Technology, 1993.

[27] T. Brosche: „Extended partial discharge measuring techniques by inclusion of new impulse parameters“ (in German), Dissertation, TU Darmstadt, 1998.

[28] W. Pfeiffer: Simulation of measuring circuits – calculation of practical examples with PSPICE“ (in German), Springer Verlag; Berlin, Heidelberg, New York, 1994.

[29] W. Pfeiffer, R. Plessow: „The influence of the coupling capacitance and the frequency of the voltage stress with respect to a partial discharge“, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1997, pp. 558-561.

[30] W. Pfeiffer: „Dielectric testing of solid insulation with respect to insulation coordination of low-voltage equipment“, IEEE Electrical Insulation Magazine, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.17(2001), P. 34-47.

[31] M. Paede, W. Pfeiffer: „About the influence of the frequency on the partial discharge characteristics of enamelled wires“, Electrical Insulation Conference 1999, pp. 485-488.

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

[17] F. Daniels, R.A. Alberty: Physical Chemistry, Wiley, New York, 1961.

[18] H.S. Endicott, B.D. Hatch, R.G. Sohmer: „Application of the Eyring model to capacitor ageing data“, IEEE Transactions on Component Parts, Vol. 12(1965), pp. 34-41.

[19] J.J. Chapman, L.J. Frisco, J.S. Smith: „Dielectric failure of volume and surface types“, AIEE Trans., Vol. 74, pp. 349-354, 1955.

[20] H. Suhr: "Evaluation of the influencing factors on the breakdown voltage of thin insulating films" (in German), Dissertation, Technische Universität Berlin, 1961.

[21] Y. Ikeda, T. Tanaka: „Frequency acceleration characteristics in internal discharge endurance tests by a glass-covered electrode system“, IEEE Trans. Electric. Insulation, Vol. 17, pp. 64-69, 1982.

[22] F. Scheuerer: „Investigation of the insulation characteristics of solid insulation at high periodic voltage stress“ (in German), Dissertation, TH Darmstadt, 1993.

[23] IEC 60270:2000, Partial Discharge Measurements.

[24] R. Hund, W. Pfeiffer, H. Reinhard and F. Scheuerer: „Partial discharge testing of components for low-voltage equipment at high frequencies“, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1990, pp. 261-266.

[25] IEC 60851:1994, Methods of test for winding wires.

[26] P.H.F. Morshuis: „Partial Discharge Mechanisms, Mechanisms Leading to Breakdown, Analyzed by Fast Electrical and Optical Measurements“, Dissertation, Delft University of Technology, 1993.

[27] T. Brosche: „Extended partial discharge measuring techniques by inclusion of new impulse parameters“ (in German), Dissertation, TU Darmstadt, 1998.

[28] W. Pfeiffer: Simulation of measuring circuits – calculation of practical examples with PSPICE“ (in German), Springer Verlag; Berlin, Heidelberg, New York, 1994.

[29] W. Pfeiffer, R. Plessow: „The influence of the coupling capacitance and the frequency of the voltage stress with respect to a partial discharge“, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1997, pp. 558-561.

[30] W. Pfeiffer: „Dielectric testing of solid insulation with respect to insulation coordination of low-voltage equipment“, IEEE Electrical Insulation Magazine, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.17(2001), P. 34-47.

[31] M. Paede, W. Pfeiffer: „About the influence of the frequency on the partial discharge characteristics of enamelled wires“, Electrical Insulation Conference 1999, pp. 485-488.

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

Standards Survey

The IEC would like to offer you the best quality standards possible. To make sure that we continue to meet your needs, your feedback is essential. Would you please take a minute to answer the questions overleaf and fax them to us at +41 22 919 03 00 or mail them to the address below. Thank you!

Customer Service Centre (CSC)

International Electrotechnical Commission
3, rue de Varembé
1211 Genève 20
Switzerland

or

Fax to: **IEC**/CSC at +41 22 919 03 00

Thank you for your contribution to the standards-making process.

Nicht frankieren
Ne pas affranchir

Non affrancare
No stamp required

A Prioritaire

RÉPONSE PAYÉE

SUISSE

Customer Service Centre (CSC)
International Electrotechnical Commission
3, rue de Varembé
1211 GENEVA 20
Switzerland

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

Q1 Please report on **ONE STANDARD** and **ONE STANDARD ONLY**. Enter the exact number of the standard: *(e.g. 60601-1-1)*

.....

Q2 Please tell us in what capacity(ies) you bought the standard *(tick all that apply).* I am the/a:

purchasing agent ❑
librarian ❑
researcher ❑
design engineer ❑
safety engineer ❑
testing engineer ❑
marketing specialist ❑
other.....

Q3 I work for/in/as a: *(tick all that apply)*

manufacturing ❑
consultant ❑
government ❑
test/certification facility ❑
public utility ❑
education ❑
military ❑
other.....

Q4 This standard will be used for: *(tick all that apply)*

general reference ❑
product research ❑
product design/development ❑
specifications ❑
tenders ❑
quality assessment ❑
certification ❑
technical documentation ❑
thesis ❑
manufacturing ❑
other.....

Q5 This standard meets my needs: *(tick one)*

not at all ❑
nearly ❑
fairly well ❑
exactly ❑

Q6 If you ticked NOT AT ALL in Question 5 the reason is: *(tick all that apply)*

standard is out of date ❑
standard is incomplete ❑
standard is too academic ❑
standard is too superficial ❑
title is misleading ❑
I made the wrong choice ❑
other .....

Q7 Please assess the standard in the following categories, using the numbers:
(1) unacceptable,
(2) below average,
(3) average,
(4) above average,
(5) exceptional,
(6) not applicable

timeliness.....
quality of writing.....
technical contents.....
logic of arrangement of contents .....
tables, charts, graphs, figures.....
other .....

Q8 I read/use the: *(tick one)*

French text only ❑
English text only ❑
both English and French texts ❑

Q9 Please share any comment on any aspect of the IEC that you would like us to know:

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

Enquête sur les normes

La CEI ambitionne de vous offrir les meilleures normes possibles. Pour nous assurer que nous continuons à répondre à votre attente, nous avons besoin de quelques renseignements de votre part. Nous vous demandons simplement de consacrer un instant pour répondre au questionnaire ci-après et de nous le retourner par fax au +41 22 919 03 00 ou par courrier à l'adresse ci-dessous. Merci !

Centre du Service Clientèle (CSC)

Commission Electrotechnique Internationale
3, rue de Varembé
1211 Genève 20
Suisse

ou

Télécopie: **CEI**/CSC +41 22 919 03 00

Nous vous remercions de la contribution que vous voudrez bien apporter ainsi à la Normalisation Internationale.

Nicht frankieren
Ne pas affranchir

Non affrancare
No stamp required

A Prioritaire

RÉPONSE PAYÉE

SUISSE

Centre du Service Clientèle (CSC)
Commission Electrotechnique Internationale
3, rue de Varembé
1211 GENÈVE 20
Suisse

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS Not for Resale

Q1 Veuillez ne mentionner qu'**UNE SEULE NORME** et indiquer son numéro exact: (*ex. 60601-1-1)*

.....

Q2 En tant qu'acheteur de cette norme, quelle est votre fonction?
(cochez tout ce qui convient)
Je suis le/un:

agent d'un service d'achat ❑
bibliothécaire ❑
chercheur ❑
ingénieur concepteur ❑
ingénieur sécurité ❑
ingénieur d'essais ❑
spécialiste en marketing ❑
autre(s).....

Q3 Je travaille:
(cochez tout ce qui convient)

dans l'industrie ❑
comme consultant ❑
pour un gouvernement ❑
pour un organisme d'essais/ certification ❑
dans un service public ❑
dans l'enseignement ❑
comme militaire ❑
autre(s).....

Q4 Cette norme sera utilisée pour/comme
(cochez tout ce qui convient)

ouvrage de référence ❑
une recherche de produit ❑
une étude/développement de produit ❑
des spécifications ❑
des soumissions ❑
une évaluation de la qualité ❑
une certification ❑
une documentation technique ❑
une thèse ❑
la fabrication ❑
autre(s).....

Q5 Cette norme répond-elle à vos besoins:
(une seule réponse)

pas du tout ❑
à peu près ❑
assez bien ❑
parfaitement ❑

Q6 Si vous avez répondu PAS DU TOUT à Q5, c'est pour la/les raison(s) suivantes:
(cochez tout ce qui convient)

la norme a besoin d'être révisée ❑
la norme est incomplète ❑
la norme est trop théorique ❑
la norme est trop superficielle ❑
le titre est équivoque ❑
je n'ai pas fait le bon choix ❑
autre(s) .....

Q7 Veuillez évaluer chacun des critères ci-dessous en utilisant les chiffres
(1) inacceptable,
(2) au-dessous de la moyenne,
(3) moyen,
(4) au-dessus de la moyenne,
(5) exceptionnel,
(6) sans objet

publication en temps opportun .....
qualité de la rédaction.....
contenu technique .....
disposition logique du contenu .....
tableaux, diagrammes, graphiques, figures.....
autre(s) .....

Q8 Je lis/utilise: *(une seule réponse)*

uniquement le texte français ❑
uniquement le texte anglais ❑
les textes anglais et français ❑

Q9 Veuillez nous faire part de vos observations éventuelles sur la CEI:

.....
.....
.....
.....
.....
.....

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS
Not for Resale

ISBN 2-8318-8197-8



ICS 29.080.30

Typeset and printed by the IEC Central Office
GENEVA, SWITZERLAND

Copyright International Electrotechnical Commission
Provided by IHS under license with IEC
No reproduction or networking permitted without license from IHS

Not for Resale