

# INTERNATIONAL STANDARD

## NORME INTERNATIONALE



BASIC EMC PUBLICATION

PUBLICATION FONDAMENTALE EN CEM

**Electromagnetic compatibility (EMC) –  
Part 4-24: Testing and measurement techniques – Test methods for protective  
devices for HEMP conducted disturbance**

**Compatibilité électromagnétique (CEM) –  
Partie 4-24: Techniques d'essai et de mesure – Méthodes d'essai pour les  
dispositifs de protection pour perturbations conduites IEMN-HA**



## THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2015 IEC, Geneva, Switzerland

All rights reserved. Unless otherwise specified, 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 either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester. If you have any questions about IEC copyright or have an enquiry about obtaining additional rights to this publication, please contact the address below or your local IEC member National Committee for further information.

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, 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'IEC ou du Comité national de l'IEC du pays du demandeur. Si vous avez des questions sur le copyright de l'IEC ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de l'IEC de votre pays de résidence.

IEC Central Office  
3, rue de Varembe  
CH-1211 Geneva 20  
Switzerland

Tel.: +41 22 919 02 11  
Fax: +41 22 919 03 00  
[info@iec.ch](mailto:info@iec.ch)  
[www.iec.ch](http://www.iec.ch)

### About the IEC

The International Electrotechnical Commission (IEC) is the leading global organization that prepares and publishes International Standards for all electrical, electronic and related technologies.

### About IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC. Please make sure that you have the latest edition, a corrigenda or an amendment might have been published.

#### IEC Catalogue - [webstore.iec.ch/catalogue](http://webstore.iec.ch/catalogue)

The stand-alone application for consulting the entire bibliographical information on IEC International Standards, Technical Specifications, Technical Reports and other documents. Available for PC, Mac OS, Android Tablets and iPad.

#### IEC publications search - [www.iec.ch/searchpub](http://www.iec.ch/searchpub)

The advanced search enables to find IEC publications by a variety of criteria (reference number, text, technical committee,...). It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

#### IEC Just Published - [webstore.iec.ch/justpublished](http://webstore.iec.ch/justpublished)

Stay up to date on all new IEC publications. Just Published details all new publications released. Available online and also once a month by email.

#### Electropedia - [www.electropedia.org](http://www.electropedia.org)

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing more than 30 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in 15 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

#### IEC Glossary - [std.iec.ch/glossary](http://std.iec.ch/glossary)

More than 60 000 electrotechnical terminology entries in English and French extracted from the Terms and Definitions clause of IEC publications issued since 2002. Some entries have been collected from earlier publications of IEC TC 37, 77, 86 and CISPR.

#### IEC Customer Service Centre - [webstore.iec.ch/csc](http://webstore.iec.ch/csc)

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre: [csc@iec.ch](mailto:csc@iec.ch).

### A propos de l'IEC

La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est la première organisation mondiale qui élabore et publie des Normes internationales pour tout ce qui a trait à l'électricité, à l'électronique et aux technologies apparentées.

### A propos des publications IEC

Le contenu technique des publications IEC est constamment revu. Veuillez vous assurer que vous possédez l'édition la plus récente, un corrigendum ou amendement peut avoir été publié.

#### Catalogue IEC - [webstore.iec.ch/catalogue](http://webstore.iec.ch/catalogue)

Application autonome pour consulter tous les renseignements bibliographiques sur les Normes internationales, Spécifications techniques, Rapports techniques et autres documents de l'IEC. Disponible pour PC, Mac OS, tablettes Android et iPad.

#### Recherche de publications IEC - [www.iec.ch/searchpub](http://www.iec.ch/searchpub)

La recherche avancée permet de trouver des publications IEC en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...). Elle donne aussi des informations sur les projets et les publications remplacées ou retirées.

#### IEC Just Published - [webstore.iec.ch/justpublished](http://webstore.iec.ch/justpublished)

Restez informé sur les nouvelles publications IEC. Just Published détaille les nouvelles publications parues. Disponible en ligne et aussi une fois par mois par email.

#### Electropedia - [www.electropedia.org](http://www.electropedia.org)

Le premier dictionnaire en ligne de termes électroniques et électriques. Il contient plus de 30 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 15 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

#### Glossaire IEC - [std.iec.ch/glossary](http://std.iec.ch/glossary)

Plus de 60 000 entrées terminologiques électrotechniques, en anglais et en français, extraites des articles Termes et Définitions des publications IEC parues depuis 2002. Plus certaines entrées antérieures extraites des publications des CE 37, 77, 86 et CISPR de l'IEC.

#### Service Clients - [webstore.iec.ch/csc](http://webstore.iec.ch/csc)

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions contactez-nous: [csc@iec.ch](mailto:csc@iec.ch).

# INTERNATIONAL STANDARD

## NORME INTERNATIONALE



BASIC EMC PUBLICATION

PUBLICATION FONDAMENTALE EN CEM

**Electromagnetic compatibility (EMC) –  
Part 4-24: Testing and measurement techniques – Test methods for protective  
devices for HEMP conducted disturbance**

**Compatibilité électromagnétique (CEM) –  
Partie 4-24: Techniques d'essai et de mesure – Méthodes d'essai pour les  
dispositifs de protection pour perturbations conduites IEMN-HA**

INTERNATIONAL  
ELECTROTECHNICAL  
COMMISSION

COMMISSION  
ELECTROTECHNIQUE  
INTERNATIONALE

ICS 33.100

ISBN 978-2-8322-2971-2

**Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor.  
Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.**

## CONTENTS

|                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FOREWORD.....                                                                                      | 5  |
| INTRODUCTION.....                                                                                  | 7  |
| 1 Scope.....                                                                                       | 8  |
| 2 Normative references .....                                                                       | 8  |
| 3 Terms, definitions and abbreviated terms .....                                                   | 8  |
| 3.1 Terms and definitions.....                                                                     | 8  |
| 3.2 Abbreviated terms.....                                                                         | 10 |
| 4 Test methods for protective devices (excluding filter) for conducted disturbance.....            | 10 |
| 4.1 General.....                                                                                   | 10 |
| 4.2 Test setup.....                                                                                | 11 |
| 4.3 Pulse generator .....                                                                          | 11 |
| 4.4 Launching line .....                                                                           | 11 |
| 4.5 Test fixtures.....                                                                             | 12 |
| 4.5.1 General .....                                                                                | 12 |
| 4.5.2 Type A fixtures .....                                                                        | 12 |
| 4.5.3 Type B fixtures .....                                                                        | 12 |
| 4.6 Termination.....                                                                               | 13 |
| 4.7 Oscilloscope .....                                                                             | 14 |
| 4.8 Test procedure.....                                                                            | 14 |
| 4.8.1 Adjustment of the pulse generator.....                                                       | 14 |
| 4.8.2 Verification procedures .....                                                                | 14 |
| 4.8.3 Test.....                                                                                    | 15 |
| 4.8.4 Final examination of the DUT.....                                                            | 15 |
| 4.9 Referring to this standard.....                                                                | 15 |
| 5 Measurement method for HEMP combination filters .....                                            | 16 |
| 5.1 Verification setup .....                                                                       | 16 |
| 5.2 Measurement setup .....                                                                        | 16 |
| 5.3 Measurement instrument.....                                                                    | 17 |
| 5.3.1 Pulse generators .....                                                                       | 17 |
| 5.3.2 Oscilloscope .....                                                                           | 19 |
| 5.3.3 Current sensors .....                                                                        | 19 |
| 5.3.4 Test loads.....                                                                              | 19 |
| 5.4 Test modes required .....                                                                      | 19 |
| 5.5 Measurement procedure .....                                                                    | 21 |
| 5.5.1 General .....                                                                                | 21 |
| 5.5.2 Verification of pulses .....                                                                 | 21 |
| 5.5.3 Measurement procedure .....                                                                  | 21 |
| 5.6 Evaluation of test results.....                                                                | 22 |
| 5.7 Test report .....                                                                              | 23 |
| Annex A (informative) Investigation for the establishment of a measurement setup.....              | 24 |
| A.1 General.....                                                                                   | 24 |
| A.2 Variation of the cable connected for the measurement of short-circuit current.....             | 24 |
| A.3 Variation of the length of the cable L2 connected for the measurement of residual current..... | 27 |
| A.4 Variation of load impedance and cable length for connection between load and ground .....      | 31 |

|                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| A.5 Variation of the cable length between load and ground .....                                                                           | 33 |
| Annex B (informative) Test method for the quantitative determination of the direct response behaviours of a coaxial surge protector ..... | 36 |
| Bibliography.....                                                                                                                         | 40 |
| Figure 1 – Test setup for testing protective devices .....                                                                                | 11 |
| Figure 2 – Example of a type B test fixture (universal) .....                                                                             | 14 |
| Figure 3 – Typical setup for verification of the pulse test level .....                                                                   | 16 |
| Figure 4 – Example of test setup using one or two shielded enclosures .....                                                               | 17 |
| Figure 5 – Example of test setup using a shielded enclosure .....                                                                         | 17 |
| Figure 6 – Double exponential waveform .....                                                                                              | 19 |
| Figure 7 – Example of wiring setup of a single line DUT.....                                                                              | 20 |
| Figure 8 – Example of wiring setup for a mutually coupled multi-line DUT.....                                                             | 20 |
| Figure A.1 – Setup for calibration.....                                                                                                   | 24 |
| Figure A.2 – Peak current calibration results with 9 mm <sup>2</sup> cables: 1 000 A ± 4 % .....                                          | 25 |
| Figure A.3 – Rise time calibration results with 9 mm <sup>2</sup> cables .....                                                            | 26 |
| Figure A.4 – FWHM calibration results with 9 mm <sup>2</sup> cables .....                                                                 | 26 |
| Figure A.5 – Peak current calibration results with 4 mm <sup>2</sup> cables: 1 000 A ± 8 % .....                                          | 26 |
| Figure A.6 – Rise time calibration results with 4 mm <sup>2</sup> cables .....                                                            | 27 |
| Figure A.7 – FWHM calibration results with 4 mm <sup>2</sup> cables .....                                                                 | 27 |
| Figure A.8 – Measurement setup for residual current.....                                                                                  | 28 |
| Figure A.9 – Measurement result of peak current with variation of measurement cable L2 ....                                               | 29 |
| Figure A.10 – Measurement result of peak rate of rise with variation of measurement cable L2.....                                         | 29 |
| Figure A.11 – Measurement result of root action with variation of measurement cable L2 ....                                               | 29 |
| Figure A.12 – Variation of the position of current sensor 2 on the measurement cable L2 ....                                              | 30 |
| Figure A.13 – Peak current with variation of cable L2 and at different positions .....                                                    | 30 |
| Figure A.14 – Peak rate of rise with variation of cable L2 and at different positions .....                                               | 31 |
| Figure A.15 – Root action with variation of cable L2 and at different positions .....                                                     | 31 |
| Figure A.16 – Measurement result of peak current with variation of load impedance. ....                                                   | 32 |
| Figure A.17 – Measurement result of peak rate of rise with variation of load impedance ....                                               | 32 |
| Figure A.18 – Measurement result of root action with variation of load impedance. ....                                                    | 33 |
| Figure A.19 – Variation of the length of cable L3 connected between load and ground plane .....                                           | 33 |
| Figure A.20 – Measurement result of peak current with variation of measurement cable L3.....                                              | 34 |
| Figure A.21 – Measurement result of peak rate of rise with variation of measurement cable L3.....                                         | 34 |
| Figure A.22 – Measurement result of root action with variation of measurement cable L3 ....                                               | 35 |
| Figure B.1 – Test setup with a power divider for testing protective devices .....                                                         | 36 |
| Figure B.2 – Waves propagating along the branches .....                                                                                   | 37 |
| Figure B.3 – Simplified test setup for testing protective devices .....                                                                   | 38 |
| Table 1 – Overview of conducted early-time HEMP (CEP) test requirements defined in other specifications.....                              | 18 |

|                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Table 2 – Overview of conducted intermediate-time HEMP (CIP) test requirements defined in other specifications.....                   | 18 |
| Table 3 – Test mode and DUT wiring setup.....                                                                                         | 21 |
| Table 4 – Performance criteria of filter against early-time HEMP – AC power port with nominal load $2\ \Omega$ .....                  | 22 |
| Table 5 – Performance criteria of filter against early-time HEMP – DC power port with nominal load $2\ \Omega$ .....                  | 22 |
| Table 6 – Performance criteria of filter against early-time HEMP – Signal, data and control port with nominal load $50\ \Omega$ ..... | 23 |
| Table A.1 – Measurement results for the waveform calibration of short-circuit current.....                                            | 25 |
| Table A.2 – Measurement results for variation of the cable length at the measurement points.....                                      | 28 |
| Table A.3 – Measurement results for variation of the load impedance.....                                                              | 32 |
| Table A.4 – Measurement results for variation of the cable length between load and ground.....                                        | 34 |

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61000-4-24:2015

## INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY (EMC) –****Part 4-24: Testing and measurement techniques –  
Test methods for protective devices  
for HEMP conducted disturbance**

## 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 itself does not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC is not responsible for any services carried out by independent certification bodies.
- 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 61000-4-24 has been prepared by subcommittee 77C: High power transient phenomena, of IEC technical committee 77: Electromagnetic compatibility.

It forms Part 4-24 of IEC 61000. It has the status of a basic EMC publication in accordance with IEC Guide 107.

This second edition cancels and replaces the first edition published in 1997. This edition constitutes a technical revision.

This edition includes the following significant technical changes with respect to the previous edition:

- a) A new Clause 5: Measurement method for HEMP combination filters, which contains 5.1 Verification setup, 5.2 Measurement setup, 5.3 Measurement instrument, 5.4 Test modes,

5.5 Measurement procedures, 5.6 Evaluation of test results, which introduced performance criteria of filter, and 5.7 Test report.

- b) A new informative Annex A: Investigation for the establishment of a measurement setup, which was based on Clause 5.
- c) A new informative Annex B: Test method for the quantitative determination of the direct response behaviours of a coaxial surge protector.

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

|              |                  |
|--------------|------------------|
| FDIS         | Report on voting |
| 77C/245/FDIS | 77C/250/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.

A list of all parts in the IEC 61000 series, published under the general title *Electromagnetic compatibility (EMC)*, can be found on the IEC website.

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC website 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.

**IMPORTANT – The 'colour inside' logo on the cover page of this publication indicates that it contains colours which are considered to be useful for the correct understanding of its contents. Users should therefore print this document using a colour printer.**

## INTRODUCTION

This standard is part of the IEC 61000 series of standards, according to the following structure:

### Part 1: General

- General considerations (introduction, fundamental principles)

- Definitions, terminology

### Part 2: Environment

- Description of the environment

- Classification of the environment

- Compatibility levels

### Part 3: Limits

- Emission limits

- Immunity limits

### Part 4: Testing and measurement techniques

- Measurement techniques

- Testing techniques

### Part 5: Installation and mitigation guidelines

- Installation guidelines

- Mitigation methods and devices

### Part 6: Generic standards

### Part 9: Miscellaneous

Each part is further subdivided into several parts, published either as international standards, as technical specifications or technical reports, some of which have already been published as sections. Others will be published with the part number followed by a dash and a second number identifying the subdivision (example: IEC 61000-6-1).

The IEC has initiated the preparation of standardized methods to protect civilian society from the effects of high power electromagnetic (HPEM) environments. Such effects could disrupt systems for communications, electric power, information technology, etc.

This part of IEC 61000 is an international standard that establishes the required test procedures for protective devices for HEMP conducted disturbance, such as gas discharge tubes, varistors, two-port SPDs and HEMP combination filters.

The application of this standard is, however, not dependent on access to other sections and parts of the IEC 61000, except for those specifically referred to.

## ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY (EMC) –

### Part 4-24: Testing and measurement techniques – Test methods for protective devices for HEMP conducted disturbance

#### 1 Scope

This part of IEC 61000 deals with methods for testing protective devices for HEMP conducted disturbance. It includes two-terminal elements, such as gas discharge tubes, varistors, and two-port SPDs, such as HEMP combination filters. It covers testing of voltage breakdown and voltage-limiting characteristics but also methods to measure the residual voltage and/or the residual current, peak rate of rise and root action for the case of very fast changes of voltage and current as a function of time.

This standard does not cover insertion loss measurement methods.

#### 2 Normative references

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

IEC 61000-2-10, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-10: Environment – Description of HEMP environment – Conducted disturbance*

#### 3 Terms, definitions and abbreviated terms

For the purposes of this document, the following terms, definitions and abbreviated terms apply.

##### 3.1 Terms and definitions

###### 3.1.1

###### **feed-through device**

two-port device, which is designed to feed a signal through an electromagnetic barrier (shield)

Note 1 to entry: Typically it is in good electrical contact with the barrier and has one port on each side of the barrier, thus maintaining the isolation of the barrier.

###### 3.1.2

###### **gas discharge tube**

device with two or three metal electrodes hermetically sealed so that gas mixture and pressure are under control, and designed to protect apparatus or personnel from high transient voltages

###### 3.1.3

###### **HEMP**

###### **high-altitude electromagnetic pulse**

electromagnetic pulse produced by a nuclear explosion outside the earth's atmosphere

Note 1 to entry: Typically above an altitude of 30 km.

[SOURCE: IEC 61000-1-3:2002, 3.10]

#### 3.1.4

##### **HEMP combination filter**

filter combined with voltage limiting devices, so that this combination can attenuate the residual current pulse passing through it

#### 3.1.5

##### **norms**

scalar quantities that characterise the features of a waveform

Note 1 to entry: Norms are used to characterise features of a waveform that relate to susceptibility mechanisms.

#### 3.1.6

##### **peak rate of rise**

maximum absolute value of the first derivative of a current waveform  $I(t)$  with respect to time,  $dI/dt$ , expressed in units of ampere per second

#### 3.1.7

##### **PCI**

##### **pulsed current injection.**

test method for measuring the performance of a protective device

Note 1 to entry: A HEMP threat-relatable transient is injected on the input of the protective device and the residual transient stress is measured on its output.

Note 2 to entry: This note applies to the French language only.

#### 3.1.8

##### **peak current**

maximum absolute value of a current waveform,  $I(t)$ , expressed in units of ampere

#### 3.1.9

##### **primary protection element**

first protective element seen from the unprotected side of a protection measure, diverting the main part of the surge current

#### 3.1.10

##### **protected side**

side of a protection measure where the equipment is situated that has to be protected

#### 3.1.11

##### **protective device**

electrical component such as a filter, gas discharge tube, metal oxide varistor (or other), for protection against conducted disturbance, or a shield, gasket, waveguide trap (or other), for protection against radiated disturbance, which is used to limit any conducted or radiated stress. Such an element or a combination of several of them thus forms part of the conceptual EM barrier for a system

[SOURCE: IEC 61000-5-5:1996, 3.20]

#### 3.1.12

##### **root action**

norm of a current waveform  $I(t)$  defined by

$$\sqrt{\int_0^{\infty} |I(t)|^2 dt}$$

Note 1 to entry: Where the load impedance is known, the energy in W/s or J can be calculated.

### 3.1.13

#### **SPD**

#### **surge protective device**

device that is intended to limit transient over-voltages and divert surge currents. It contains at least one non-linear component that is intended to limit surge voltages and divert surge currents

Note 1 to entry: This note applies to the French language only.

[SOURCE: IEC TR 61000-5-6:2002, 3.23, modified – a note has been added.]

### 3.1.14

#### **two-port SPD**

SPD which is not only a shunting device, but consists of a separated input port on the unprotected side and an output port on the protected side

Note 1 to entry: Typically two-port SPDs are “black boxes” with non-linear shunting devices to ground and a circuit between input and output ports.

### 3.1.15

#### **two-terminal element**

electrical element where a current enters in one terminal and leaves through a second terminal

Note 1 to entry: A two-terminal element is a one-port device. Typically two-terminal SPD's are devices shunting to ground.

### 3.1.16

#### **unprotected side**

side of a protection measure from which the surge event is expected

### 3.1.17

#### **waveform norm**

parameter that is determined from a mathematically well-defined operation on a waveform or signal (such as an integration of the waveform), which yields a scalar number that permits a comparison of various waveforms or their effects

[SOURCE: IEC 61000-4-33:2005, 3.10]

## 3.2 Abbreviated terms

DUT

Device under test

## 4 Test methods for protective devices (excluding filter) for conducted disturbance

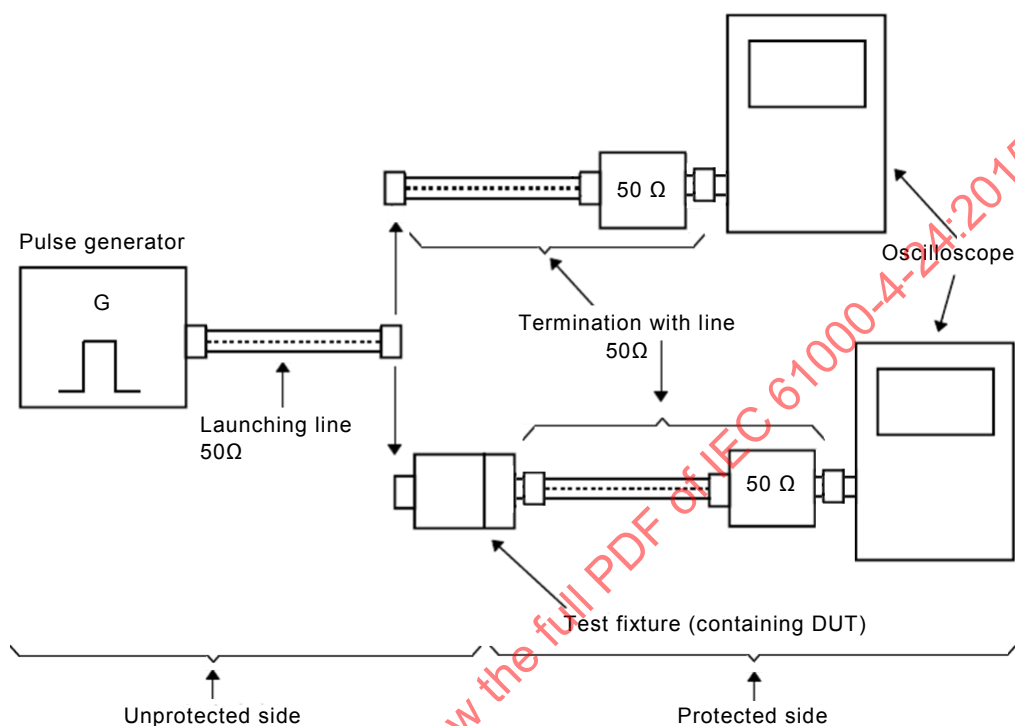
### 4.1 General

The actual behaviour of a protective device under HEMP conditions depends very much on how it is integrated into its place of use and other attendant circumstances (e.g. quality of shielding between the protected and unprotected side of a protection element). The following test methods take this into account. They are defined so that the results obtained are as far as possible related to the qualities of the device under test (DUT), and the test arrangement does not differ too much from practical protection arrangements.

NOTE Clause 4 is intended to apply for a protective device such as gas discharge tubes, varistors and two-port SPDs, excluding the HEMP combination filter. For a HEMP combination filter, Clause 5 applies.

## 4.2 Test setup

The test setup consists of a pulse generator (G), a launching line, a test fixture for the DUT, and a termination with a connecting line and oscilloscope (see Figure 1). Various source impedances may be used, but the example shown in Figure 1 uses  $50\ \Omega$ . Other values could be specified.



**Figure 1 – Test setup for testing protective devices**

To prevent parasitic coupling between the pulse generator and the oscilloscope, both the unprotected and protected side of the setup shall be entirely shielded. It is recommended to use cables with multiple braided wire shields or solid shields. The cable and connectors shall be capable of withstanding the high voltage pulse without a breakdown. Grounding loops shall be avoided.

## 4.3 Pulse generator

The pulse generator shall produce a normally rectangular voltage pulse into a matched termination. The output voltage (into a matched termination) shall be adjustable to a value 2 times higher than the expected limiting voltage of the DUT. Both polarities shall be available. The characteristics of a pulse generator are as follows:

- characteristic impedance:  $50\ \Omega$  or an alternative value
- pulse wavefront,  $du/dt$ : at least  $1\ \text{kV/ns}$
- pulse duration: at least  $20\ \text{ns}$

## 4.4 Launching line

The launching line consists of a coaxial cable with a characteristic impedance of  $50\ \Omega$  or the value specified. The cable between the pulse generator and the DUT shall be long enough so that reflections from the DUT do not arrive at the pulse generator during the pulse front. To achieve this condition, the one-way propagation time along the cable shall be greater than half the front time of the pulse. Due to the frequency-dependent attenuation of the cable, the

steepness of the pulse front may be lowered and thus adjusted to the desired value, by further extending the launching line.

## 4.5 Test fixtures

### 4.5.1 General

Test fixtures are mechanical setups with coaxial connectors on both the unprotected and the protected terminals. Their task is to hold the DUT. Two different types of test fixtures may be used. They are referred to as type A and type B as described below.

### 4.5.2 Type A fixtures

Gas discharge tubes intended to be used for protection of coaxial high-frequency applications may be tested in corresponding, commercially available holders. The protective device is inserted between the inner and outer conductor of the coaxial setup, with a minimum of influence on the characteristic impedance. Such holders allow the inherent properties of the device to be measured explicitly and with good repeatability.

### 4.5.3 Type B fixtures

#### 4.5.3.1 General

Type B fixtures are universal and apply in principle to all kinds of two-terminal or two-port protective devices, whether they have a feed-through or non-feed-through configuration. However, measurements on low-voltage devices like protective diodes and varistors may be strongly influenced by inductive overshoot due to high  $dI/dt$ .

NOTE By ensuring the test fixture lead lengths are as short as practically possible, the risk of inductive influence can be mitigated.

The fixture is composed of three parts: the unprotected shell, the partition screen and the protected shell (see Figure 2).

#### 4.5.3.2 Unprotected shell

The dimensions and cross-section shape may be adapted to the size of the DUT. The shell may be cut into two parts in the axial direction for better access to the solder points. If not otherwise stated, the length of the wire from the unprotected connector ( $P_1$ ) to the input-contact of the DUT ( $P_2$ ) shall not be longer than the length of the current path in the DUT between points  $P_2$  and the grounding contact of the DUT ( $P_3$ ).

#### 4.5.3.3 Partition screen

Feed-through protective devices shall be inserted in the partition screen in the same way as in actual application.

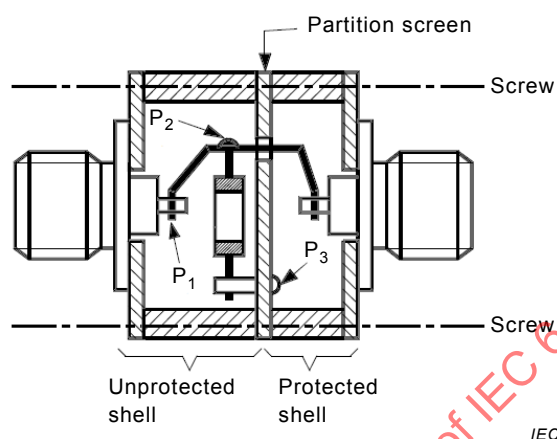
Non-feed-through devices shall be passed through a hole in the partition screen as shown in Figure 2a) and 2b). The wire passing through the partition screen shall be insulated. A feed-through capacitor or other feed-through element shall not be used. A non-feed-through DUT may be placed close to the screen but shall not touch it, except if it is to be installed on to a metal wall in actual applications (as shown in Figure 2c)).

#### 4.5.3.4 Protected shell

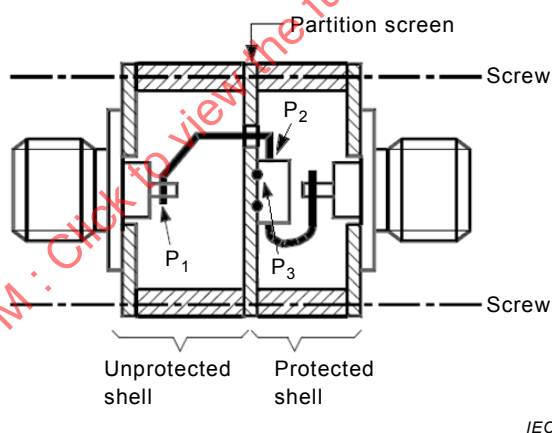
The protected shell serves as transition to the protected connector. The protected shell shall be made as short as possible. The length of the connection between point  $P_2$  and the protected connector shall be as short as possible.

#### 4.6 Termination

The termination shall be matched to the characteristic impedance of the test setup within the 3 dB-bandwidth of the oscilloscope. It shall be of the feed-through type, followed by a high-impedance, voltage-dividing probe of the oscilloscope or be part of the first stage of an attenuator in front of the oscilloscope. The line between the test fixture and termination shall have the same impedance as the termination. It shall be as short as possible. Its attenuation shall be less than 0,5 dB at the upper 3 dB cut-off frequency of the oscilloscope. Make sure that the termination withstands the test pulses without degradation.

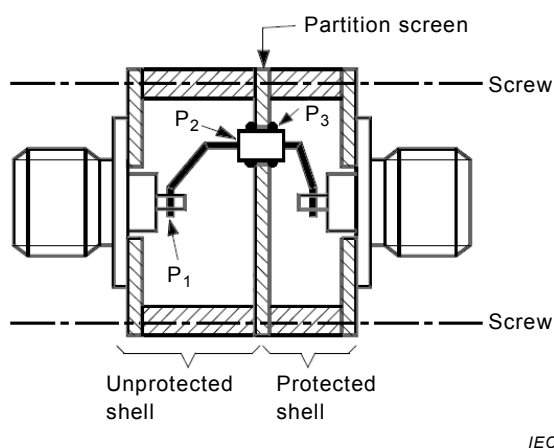


a) Example of a type B test fixture with a two-terminal DUT in non-feed-through configuration



The DUT may alternatively be in the unprotected shell.

b) Example of a test fixture with a two-port DUT in non-feed-through configuration



c) Example of a test fixture with a DUT in a feed-through configuration

Figure 2 – Example of a type B test fixture (universal)

#### 4.7 Oscilloscope

The bandwidth of the oscilloscope and the other components of the test setup shall be wide enough that the overall tolerance of the peak values of  $u$  and  $duldt$  due to bandwidth limitations and other system errors is not higher than  $\pm 20\%$ .

#### 4.8 Test procedure

##### 4.8.1 Adjustment of the pulse generator

The launching line is first connected directly to the line leading to the termination (see Figure 1).

The pulse generator is adjusted as follows:

- if the DUT, or the primary protection element of a four-terminal DUT, is a gas discharge tube, the steepness of the leading front of the prospective pulse shall be at least 1 kV/ns at the impulse spark-over voltage of the gas discharge tube during the test;
- if the DUT, or the primary protection element of a four-terminal DUT, is a voltage-limiting device (e.g. protective diode or varistor), the highest tangential steepness of the leading front of the prospective pulse is as described by

$$duldt = (1/2) \times Z_c \times dildt \quad (1)$$

where  $Z_c$  is the characteristic impedance and  $dildt$  is the specified value.

NOTE The specified  $dildt$  corresponds to the actual  $dildt$  in the DUT during the test. As the DUT has a very low impedance compared with  $50\ \Omega$  or the specified impedance, the current  $i$  and therefore also  $dildt$  is doubled during the test.

##### 4.8.2 Verification procedures

The launching line is then connected to the test fixture (see Figure 1).

If a test fixture type B is used, the internal connection between the protected and the unprotected connector shall be tested for transmission characteristics.

For this purpose the DUT is removed and the same pulse as under 4.8.1 (adjustment of the pulse generator) is applied. The measured output shall not differ from the output measured under 4.8.1 by more than 10 %. If it differs by more than 10 %, the diameter of the connecting

wire should be increased (a higher capacity will lower the characteristic impedance and improve the match between the pulse generator and the load).

To make sure that no undesired coupling between the unprotected and the protected side of the test setup is present, verification tests shall be made with the following modifications on the test setup:

If the DUT is a two-terminal element, it shall be replaced by a short-circuit connection of the same length and form as the current path through the DUT. The connection between  $P_2$  and the centre-pin of the protected connector (see Figure 2) shall be removed. One test shall be made with the centre-pin of the protected connector left open and another one with this pin connected to the ground (within the protected shell).

If the DUT is a feed-through device, it shall be replaced by a device of the same dimensions (dummy DUT) made entirely of well-conducting metal and thus representing an ideal short-circuit. The centre-pin of the protected connector shall be connected to the output pin of the dummy DUT.

The peak value of the residual voltage measured under these conditions shall be less than 5 % of the peak value measured in the final test.

### 4.8.3 Test

The dummy DUT is replaced by the DUT, and the residual voltage is measured and compared to the verification criteria.

### 4.8.4 Final examination of the DUT

After the test, the DUT shall be examined for visible damage. If visible damage is observed, the DUT will be deemed to fail the test. If there is no visible damage a functional test shall be performed to verify that the DUT is within its specification.

## 4.9 Referring to this standard

When reference is made to this standard, the following additional information shall be given.

Standard procedure:

- |                                                          |                                                                                     |
|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| – for gas discharge tubes:                               | type of test fixture used (4.5)                                                     |
| – for measurement on two-terminal elements in fixture B: | length of connection wires, see overall length of DUT between solder points (4.5.3) |

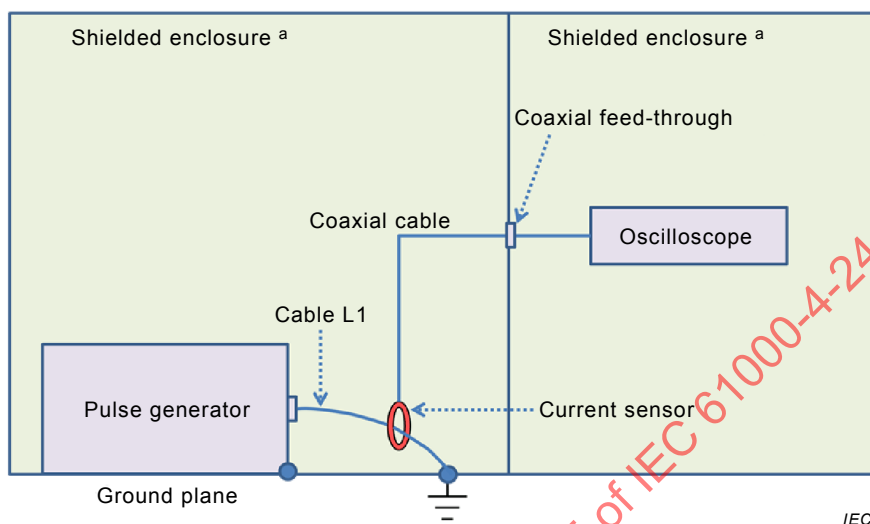
Modifications from standard procedure:

- |                                             |                                                                                           |
|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| – characteristic impedance:                 | if other than 50 $\Omega$ (4.2)                                                           |
| – steepness of prospective pulse, $dI/dt$ : | if higher than 1 kV/ns (4.3)                                                              |
| – actual $dI/dt$ :                          | if higher than 40 A/ns (4.8.1)                                                            |
| – modification of DUT:                      | if connecting wires of gas discharge tubes are cut away for measurement in type A fixture |
| – additional components to the DUT          | for example additional circuit components; different wire lengths to those specified.     |

## 5 Measurement method for HEMP combination filters

### 5.1 Verification setup

The output of the pulse generator shall be verified prior to applying a pulse to a DUT. The typical setup for verification of the pulse test level is illustrated in Figure 3.



<sup>a</sup> At least one of the two enclosures shall be shielded. Care should be taken to minimize radiated and conducted interference.

**Figure 3 – Typical setup for verification of the pulse test level**

The pulse generator shall be connected to the ground plane. The output cable L1 shall also be connected to the ground plane to enable the short-circuit pulse current to be measured. The length and geometry of cable L1 shall be chosen to minimize the inductance and shall be the same as when the DUT is connected (see Annex A). The insulation of the cable to the ground should be sufficient to avoid breakdown for all impulse voltages.

If the size or setup of the DUT requires a long cable L1, then the cable may be coaxial to achieve the required pulse rise time at the DUT. If the cable selected is coaxial, the shield should be pared back, and the inner conductor shall be exposed and bonded to the ground. The current probe shall be placed around the exposed inner conductor. Alternatively a coaxial current shunt can be used.

The position of the current sensor shall be within 0,15 m from the ground connection. Care shall be taken to electrically isolate the body of the current sensor from metallic surfaces to avoid ground loops.

### 5.2 Measurement setup

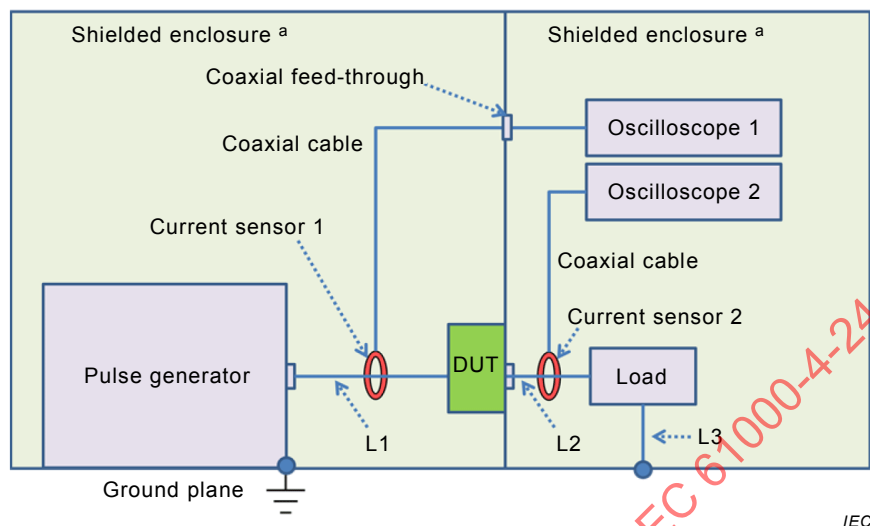
Two typical measurement setups are illustrated in Figure 4 and Figure 5. The pulse generator output shall be directly connected to the input terminal of the DUT through the same cable as used for verification.

The current sensor 1 and oscilloscope 1 can be used optionally to monitor the injected current into the DUT.

The current sensor 2 for the measurement of residual current into the dummy load shall preferably be within 0,15 m of the output terminal of the DUT. Alternatively a grounded measuring shunt can be used in series with the load impedance. The load shall be a dummy resistor as described in 5.3.4.

The cables L2 and L3 shall be as short as possible.

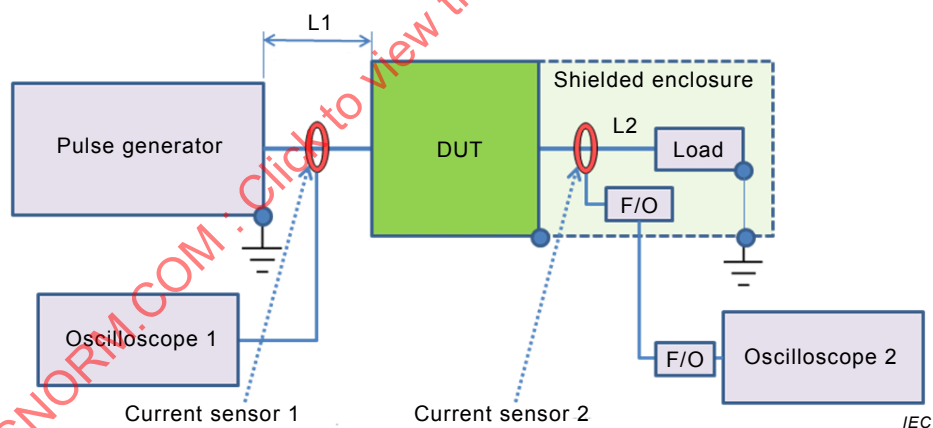
It may be necessary to shield the measurement instrument and to isolate the power supply to avoid interference due to ground loops.



If a voltage probe is used it should be connected across the load resistor.

<sup>a</sup> At least one of the two enclosures shall be shielded. Care should be taken to minimize radiated and conducted interference.

**Figure 4 – Example of test setup using one or two shielded enclosures**



F/O means fibre optic converter. Fibre links may be used as an option to provide a degree of isolation so that the pulse generator and oscilloscopes can be physically separated to minimize interference.

If pulse generator and injection cable L1 are not shielded, then oscilloscopes 1 and 2 should be in a shielded enclosure to avoid pick-up. Care should be taken to minimize radiated and conducted interference.

**Figure 5 – Example of test setup using a shielded enclosure**

### 5.3 Measurement instrument

#### 5.3.1 Pulse generators

Short-circuit current is defined as current driven through a short-circuit connected to the generator output. Source impedance is defined as the generator peak open circuit voltage divided by the peak short-circuit current. The tolerance is  $\pm 10\%$ .

Pulse test requirements can be selected from Table 1 and Table 2, for early-time HEMP and intermediate-time HEMP respectively.

**Table 1 – Overview of conducted early-time HEMP (CEP) test requirements defined in other specifications**

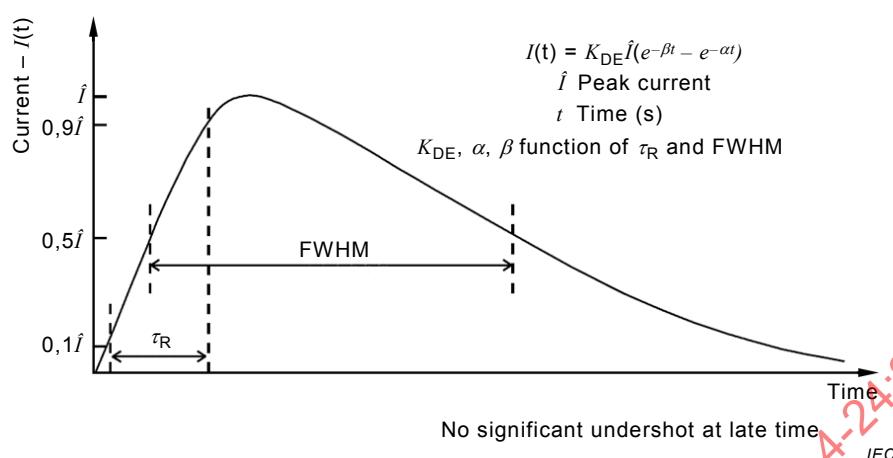
| Type                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Rise time | FWHM <sup>a</sup> | Source impedance <sup>b</sup> | Peak short-circuit current | Specifications                                                                                                          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-------------------|-------------------------------|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CEP <sub>1</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | < 10 ns   | 100 ns<br>±30 %   | 400 Ω<br>±15 Ω                | 4 000 A<br>±10 %           | IEC 61000-2-10, 99 % severity for elevated conductor, for cable length longer than 200 m                                |
| CEP <sub>2</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | < 10 ns   | 100 ns<br>±30 %   | 400 Ω<br>±15 Ω                | 1 500 A<br>±10 %           | IEC 61000-2-10, 90 % severity for elevated conductor, for cable length longer than 200 m                                |
| CEP <sub>3</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | < 10 ns   | 100 ns<br>±30 %   | 400 Ω<br>±15 Ω                | 500 A<br>±10 %             | IEC 61000-2-10, 50 % severity for elevated conductor, for cable length longer than 200 m                                |
| CEP <sub>4</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | < 25 ns   | 500 ns<br>±30 %   | 50 Ω<br>±5 Ω                  | 400 A<br>±10 %             | IEC 61000-2-10, for buried conductor in the ground conductivity of 10 <sup>-4</sup> , for cable length longer than 10 m |
| CEP <sub>5</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | ≤ 20 ns   | 500 ns<br>+10 %   | ≥ 60 Ω                        | 2 500 A<br>±10 %           | According to [1] <sup>1</sup> , wire-to- ground                                                                         |
| CEP <sub>6</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | ≤ 20 ns   | 500 ns<br>+10 %   | ≥ 60 Ω                        | 5 000 A<br>±10 %           | According to [1], common-mode, under installed conditions only                                                          |
| <sup>a</sup> FWHM is an acronym for full-width at half-maximum (amplitude).<br><sup>b</sup> In all cases, for practical reasons lower source impedance may be used. However the source impedance should not be less than typically 10 Ω to ensure that the applied pulse voltage is greater than the breakdown voltage of the non-linear components in the DUT. |           |                   |                               |                            |                                                                                                                         |

**Table 2 – Overview of conducted intermediate-time HEMP (CIP) test requirements defined in other specifications**

| Type                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Rise time      | FWHM <sup>a</sup>    | Source impedance <sup>b</sup> | Peak short-circuit current | Specifications <sup>c</sup>                                                   |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------------|-------------------------------|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| CEP <sub>1</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 25 µs<br>±30 % | 1 500 µs<br>±30 %    | 400 Ω<br>±15 Ω                | 600 A<br>±10 %             | IEC 61000-2-10, for elevated conductors, for cable lengths longer than 1 km   |
| CEP <sub>2</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 25 µs<br>±30 % | 1 500 µs<br>±30 %    | 400 Ω<br>±15 Ω                | 75 A<br>±10 %              | IEC 61000-2-10, for elevated conductors, for cable lengths from 200 m to 1 km |
| CEP <sub>3</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 25 µs<br>±30 % | 1 500 µs<br>±30 %    | 50 Ω<br>±5 Ω                  | 450 A<br>±10 %             | IEC 61000-2-10, for buried conductors, for cable lengths longer than 1 km     |
| CEP <sub>4</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 25 µs<br>±30 % | 1 500 µs<br>±30 %    | 50 Ω<br>±5 Ω                  | 50 A<br>±10 %              | IEC 61000-2-10, for buried conductors, for cable lengths from 200 m to 1 km   |
| CEP <sub>5</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | ≤ 1,5 µs       | 3 000 µs to 5 000 µs | ≥ 10 Ω                        | 250 A<br>±10 %             | According to [1], for cable lengths longer than 200 m                         |
| <sup>a</sup> FWHM is an acronym for full-width at half-maximum (amplitude).<br><sup>b</sup> In all cases for practical reasons lower source impedance may be used. However the source impedance should not be less than typically 10 Ω to ensure that the applied pulse voltage is greater than the breakdown voltage of the non-linear components in the DUT.<br><sup>c</sup> No test is required for line lengths shorter than 200 m. |                |                      |                               |                            |                                                                               |

<sup>1</sup> Numbers in square brackets refer to the Bibliography.

The short-circuit current of the pulse generator has a double exponential waveform (see Figure 6).



**Figure 6 – Double exponential waveform**

### 5.3.2 Oscilloscope

The bandwidth of the oscilloscope shall be wide enough to resolve the fastest rise time ( $< 10$  ns, DC to  $> 100$  MHz for the early-time HEMP and DC to  $> 1$  MHz for the intermediate-time HEMP) and shall have minimum sensitivity as required for measurement sensitivity. The required input impedance of the scope amplifier depends on the type of voltage or current probe and shall be selected accordingly (typically  $50 \Omega$  or  $1 \text{ M}\Omega$ ).

### 5.3.3 Current sensors

The measurement bandwidth of the current sensors should cover the frequency range of 100 kHz to 100 MHz for the early-time HEMP and DC to 1 MHz for the intermediate pulse. The total measurement range in combination with the scope's vertical amplifier range shall be 0 A to 5 000 A for the early-time HEMP and 0 A to 250 A for the intermediate-time HEMP. For the measurement of currents to ground a resistive current shunt might give the most accurate results.

### 5.3.4 Test loads

During all tests a DUT test load according to the test mode and a DUT wiring setup as defined in Table 3 shall be used. The tolerance of the test load shall be  $\pm 10 \%$  if not stated otherwise.

## 5.4 Test modes required

The test modes can be selected from the following list, depending on the application of the DUT. As a minimum, the nominal load mode(s) shall be performed.

- ETM1: Early-time HEMP / open-circuit
- ETM2: Early-time HEMP / nominal load
- ETM3: Early-time HEMP / short-circuit
- ITM1: Intermediate-time HEMP / open-circuit
- ITM2: Intermediate-time HEMP / nominal load
- ITM3: Intermediate-time HEMP / short-circuit

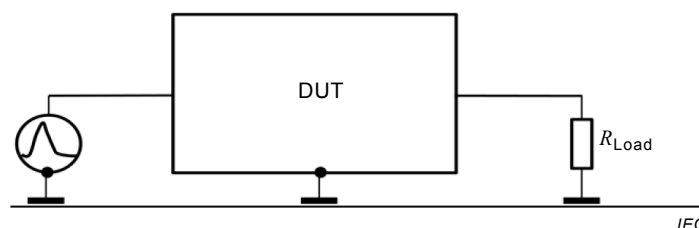
NOTE Test pulses can be selected from Table 1 and Table 2.

Since open-circuit measurements are difficult, a  $\geq 1 \text{ M}\Omega$  load might be a good choice since typical voltage probes of oscilloscopes have a  $\geq 1 \text{ M}\Omega$  input impedance.

Table 3 shows the test modes as required for different types of DUTs. The termination load impedances of the DUT for the early-time HEMP shall be chosen according to Table 3.

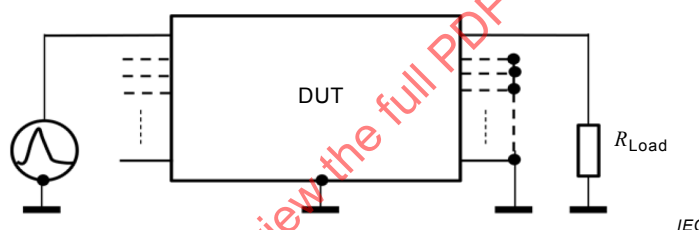
The DUT wiring setups (WSs) are as follows:

- WS1: Single line or multiple single lines DUT (see Figure 7)



**Figure 7 – Example of wiring setup of a single line DUT**

- WS2: One example of a wiring setup for a mutually coupled or symmetric multi-line DUT (see Figure 8)



**Figure 8 – Example of wiring setup for a mutually coupled multi-line DUT**

WS2 is an example of wiring setup, which may be used for a multi-line DUT with lines which are coupled to each other either electrically or magnetically (e.g. by current-compensated inductors or if there are differential mode protection components). One line is tested at a time and the second and all other lines (dashed lines) are connected together at the output side and grounded. The lines that are not tested should remain open at the input side to avoid mutual coupling issues.

This setup is optional and other setups may be more applicable depending on the DUT circuit.

**Table 3 – Test mode and DUT wiring setup**

| DUT application                                            | Required test modes | Wiring setup           | DUT load, $R_{Load}$                     |
|------------------------------------------------------------|---------------------|------------------------|------------------------------------------|
| AC/DC power line                                           | ETM1                | WS 1/WS 2 <sup>a</sup> | Open circuit ( $\geq 1\text{ M}\Omega$ ) |
|                                                            | ETM2                | WS 1/WS 2 <sup>a</sup> | 2 $\Omega$                               |
|                                                            | ETM3                | WS 1/WS 2 <sup>a</sup> | Short-circuit ( $< 50\text{ m}\Omega$ )  |
|                                                            | ITM1                | WS 1/WS 2 <sup>a</sup> | Open circuit ( $\geq 1\text{ M}\Omega$ ) |
|                                                            | ITM2                | WS 1/WS 2 <sup>a</sup> | 50 $\Omega$                              |
|                                                            | ITM3                | WS 1/WS 2 <sup>a</sup> | Short-circuit ( $< 50\text{ m}\Omega$ )  |
| Symmetric data line (Ethernet, etc.)                       | ETM1                | WS 2                   | Open circuit ( $\geq 1\text{ M}\Omega$ ) |
|                                                            | ETM2                | WS 2                   | 50 $\Omega$                              |
|                                                            | ETM3                | WS 2                   | Short-circuit ( $< 50\text{ m}\Omega$ )  |
|                                                            | ITM1                | WS 2                   | Open circuit ( $\geq 1\text{ M}\Omega$ ) |
|                                                            | ITM2                | WS 2                   | 50 $\Omega$                              |
|                                                            | ITM3                | WS 2                   | Short-circuit ( $< 50\text{ m}\Omega$ )  |
| Non-symmetric or individual data/signal/control/audio line | ETM1                | WS 1                   | Open circuit ( $\geq 1\text{ M}\Omega$ ) |
|                                                            | ETM2                | WS 1                   | 50 $\Omega$                              |
|                                                            | ETM3                | WS 1                   | Short-circuit ( $< 50\text{ m}\Omega$ )  |
| Coaxial line                                               | ETM2                | WS 1                   | 50 $\Omega$ (or coax-cable impedance)    |
|                                                            | ITM2                | WS 1                   | 50 $\Omega$ (or coax-cable impedance)    |

<sup>a</sup> Depending on the DUT design, either WS1 or WS2 shall be applied. The 2  $\Omega$  load has been defined in MIL-STD-188-125-1 for power lines. Short-circuit and open-circuit load conditions are optional, therefore no requirement is defined in this standard.

## 5.5 Measurement procedure

### 5.5.1 General

To minimize the possibility of DUT damage, a series of pulses at increasing amplitudes shall be applied for all applicable test modes ETM1 to ETM3 and ITM1 to ITM3.

CAUTION: The DUT may have limited pulse life. It should be checked for degradation before using in service or further test.

### 5.5.2 Verification of pulses

Perform the verification of the test level with 10 %, 20 %, 40 %, 80 % and 100 % of the maximum test current (see Figure 3) and record the verified levels, the charging voltage and generators settings required to achieve these test levels.

NOTE The amplitude of 10 % and 20 % of the maximum test level may not be possible for certain pulse generators.

### 5.5.3 Measurement procedure

The measurement procedures shall be as follows:

- Set up a DUT and measurement instruments according to 5.2.
- Set up the test circuit configuration in the desired test modes (see 5.4).
- Inject a pulse into the DUT with the verified generator charging voltages in 5.5.2.
- Record the measurement results of the residual waveform. Either the current waveform or voltage waveform shall be measured.
- Compare the results to the performance criteria (see 5.6).

## 5.6 Evaluation of test results

The pass/fail results shall be classified in terms of the peak current or voltage, the peak rate of rise and root action at the output of a HEMP combination filter. The required performance criteria are given in Table 4, Table 5 and Table 6 for the early-time HEMP test.

**Table 4 – Performance criteria of filter against early-time HEMP –  
AC power port with nominal load  $2\ \Omega$**

| Severity Level                                                                                                                   | Protection Concepts                 | Peak residual current or voltage    |                                           | Peak rate of rise | Root action               |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------|---------------------------|
|                                                                                                                                  |                                     | $I_{\text{Load}}, \text{ A}$        | $U_{\text{Load}}, \text{ V}$              | $\text{A/s}$      | $\text{A}\sqrt{\text{s}}$ |
| Level 1                                                                                                                          | IEC 61000-6-2 (industrial)          | $U_{\text{Load}} / R_{\text{Load}}$ | $2 \cdot \hat{U}_{\text{Nom}}^{\text{a}}$ | $2 \times 10^8$   | 3,2                       |
| Level 2                                                                                                                          | Critical infrastructures            | 50                                  | 100                                       | $5 \times 10^7$   | $8,0 \times 10^{-1}$      |
| Level 3                                                                                                                          | Special case<br>(Mil-Std-188-125-1) | 10                                  | 20                                        | $10^7$            | $1,6 \times 10^{-1}$      |
| Level X                                                                                                                          | User defined                        | UD <sup>b</sup>                     | UD                                        | UD                | UD                        |
| <sup>a</sup> $\hat{U}_{\text{Nom}}$ is the peak value of the nominal operating voltage.<br><sup>b</sup> UD means “user defined”. |                                     |                                     |                                           |                   |                           |

**Table 5 – Performance criteria of filter against early-time HEMP –  
DC power port with nominal load  $2\ \Omega$**

| Severity Level                                                                                                                                                                                                                 | Protection Concepts                 | Peak residual current or voltage    |                                   | Peak rate of rise | Root action               |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------|---------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                |                                     | $I_{\text{Load}}, \text{ A}$        | $U_{\text{Load}}, \text{ V}$      | $\text{A/s}$      | $\text{A}\sqrt{\text{s}}$ |
| Level 1                                                                                                                                                                                                                        | IEC 61000-6-2 (industrial)          | $U_{\text{Load}} / R_{\text{Load}}$ | $\hat{U}_{\text{Nom}}^{\text{a}}$ | $2 \times 10^8$   | 3,2                       |
| Level 2                                                                                                                                                                                                                        | Critical infrastructures            | 50                                  | 100                               | $5 \times 10^7$   | $8,0 \times 10^{-1}$      |
| Level 3                                                                                                                                                                                                                        | Special case<br>(Mil-Std-188-125-1) | ND <sup>b</sup>                     | ND                                | ND                | ND                        |
| Level X                                                                                                                                                                                                                        | User defined                        | UD <sup>c</sup>                     | UD                                | UD                | UD                        |
| <sup>a</sup> $\hat{U}_{\text{Nom}}$ is the peak value of the nominal operating voltage.<br><sup>b</sup> ND means that a value is not defined within the protection concept reference.<br><sup>c</sup> UD means “user defined”. |                                     |                                     |                                   |                   |                           |

**Table 6 – Performance criteria of filter against early-time HEMP –  
Signal, data and control port with nominal load 50  $\Omega$**

| Severity Level                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Protection Concepts                 | Peak residual current or voltage    |                                   | Peak rate of rise | Root action                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------|---------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                     | $I_{\text{Load}}, \text{ A}$        | $U_{\text{Load}}, \text{ V}$      | $\text{A/s}$      | $A\sqrt{s}$                     |
| Level 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | IEC 61000-6-2 (industrial)          | $U_{\text{Load}} / R_{\text{Load}}$ | $\hat{U}_{\text{Nom}}^{\text{a}}$ | $2 \times 10^8$   | $3,2 \times 10^{-1}$            |
| Level 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Critical infrastructures            | 1                                   | 50                                | $5 \times 10^7$   | $8,0 \times 10^{-2}$            |
| Level 3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Special case<br>(Mil-Std-188-125-1) | 0,1 <sup>b</sup>                    | 5 <sup>b</sup>                    | $10^7$            | $1,6 \times 10^{-3}^{\text{b}}$ |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                     | 1 <sup>c</sup>                      | 50 <sup>c</sup>                   |                   | $1,6 \times 10^{-2}^{\text{c}}$ |
| Level X                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | User defined                        | UD <sup>d</sup>                     | UD                                | UD                | UD                              |
| <p><sup>a</sup> <math>\hat{U}_{\text{Nom}}</math> is the peak value of the nominal operating voltage.</p> <p><sup>b</sup> Applies to the device with an operating voltage less than 90 V.</p> <p><sup>c</sup> Applies to the device with an operating voltage of 90 V and greater.</p> <p><sup>d</sup> UD means “user defined”.</p> |                                     |                                     |                                   |                   |                                 |

For the intermediate-time HEMP test, residuals are not defined. However the test shall be performed to ensure that the HEMP combination filter is not damaged during the test. This shall be checked by ensuring that the HEMP combination filter operates normally after the test.

## 5.7 Test report

For each step in the testing sequence, the following parameters should be included in the test report:

- Waveform, peak current and source impedance of verified pulse.
- Test mode, wiring set up (including connection diagram if different from examples given).
- Test load resistance.
- Peak current or voltage of residual pulse.
- Measured waveform of residual pulse.
- Maximum  $dI/dt$ , and root integral of residual pulse, if required.
- Comparison of results with required performance criteria.

The total number of pulses applied to the DUT during the test sequence should be recorded.

## Annex A (informative)

### Investigation for the establishment of a measurement setup

#### A.1 General

With the measurement setup some variations were investigated for improvement of the repeatability and reproducibility of the measurement result. Annex A summarises this investigation to illustrate the sensitivity of the test procedure to the test setup.

#### A.2 Variation of the cable connected for the measurement of short-circuit current

The output of the pulse generator shall be calibrated prior to applying a pulse to a protective device. The setup for calibration is illustrated in Figure A.1.

For the calibration of the short-circuit current waveform, the output of the pulse generator shall be shorted to the ground of the generator through a cable, L1. The current on the cable shall be measured using a current sensor and an oscilloscope.

It was investigated how the wave shape is affected by the variation of the size and the length of the cable. Measurements were performed with the cables having a cross-section of 9 mm<sup>2</sup> and 4 mm<sup>2</sup>, and varying the length of the cable L1 as follows: 0,2 m, 0,3 m, 0,4 m, 0,5 m, 0,6 m, 0,7 m, 0,8 m, 0,9 m, 1,0 m, 1,2 m, 1,4 m, 1,6 m, 1,8 m and 2,0 m.

The measurement results are shown in Table A.1 and Figure A.2 to Figure A.7.

It was concluded that cable L1 for the waveform calibration of short-circuit current shall be as thick and short as possible. It is recommended that the cable L1 shall have a cross-section of 4 mm<sup>2</sup> or more and a length of 0,8 m or less. The cable L1 used in calibration shall be also used in the measurement setup.

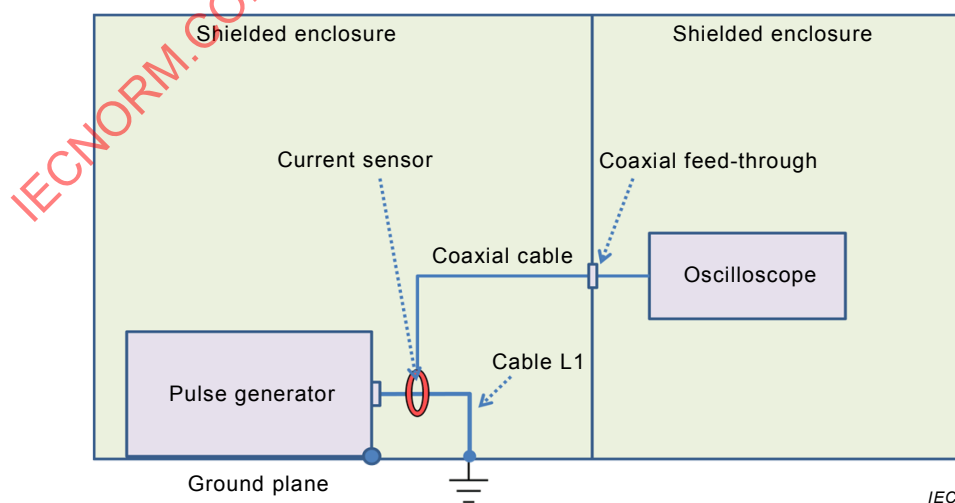
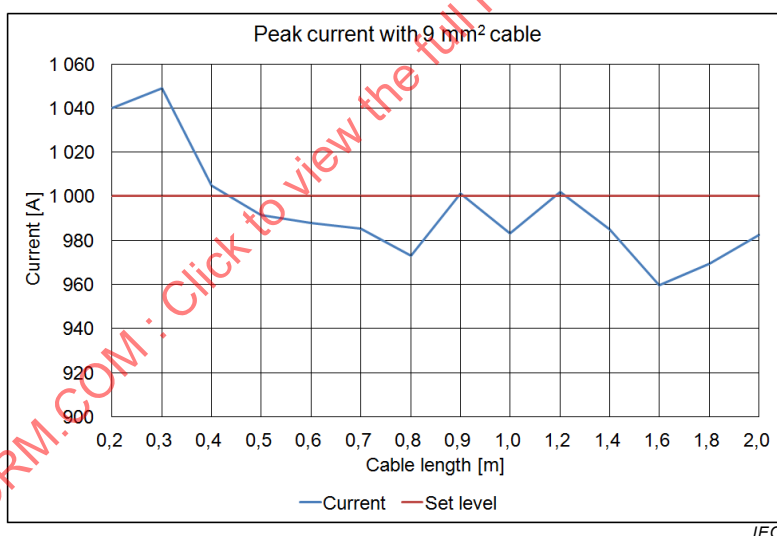


Figure A.1 – Setup for calibration

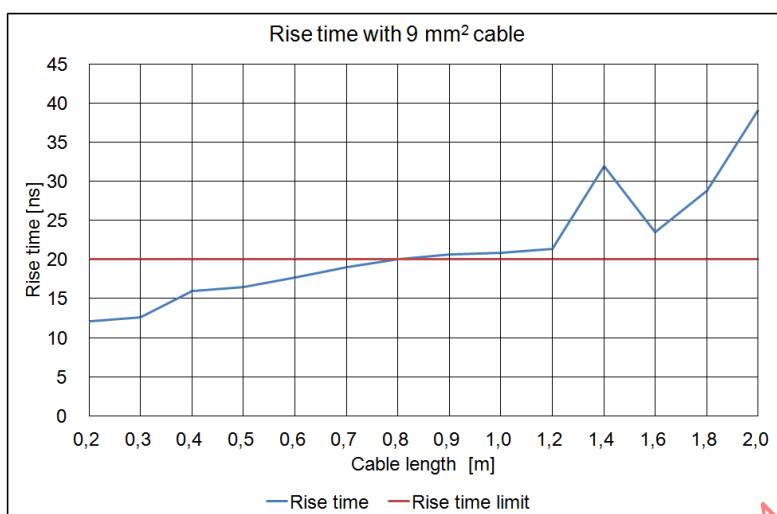
**Table A.1 – Measurement results for the waveform calibration of short-circuit current**

| Cross-section, 9 mm <sup>2</sup> |                    |                         |                               | Cross-section, 4 mm <sup>2</sup> |                         |                               |
|----------------------------------|--------------------|-------------------------|-------------------------------|----------------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| L1,<br>m                         | Peak<br>current, A | Rise time,<br>(< 20 ns) | FWHM,<br>(500 ns ~<br>550 ns) | Peak<br>current, A               | Rise time,<br>(< 20 ns) | FWHM,<br>(500 ns ~<br>550 ns) |
| 0,2                              | 1 040,0            | 12,1                    | 505,8                         | 1 005,0                          | 12,6                    | 497,8                         |
| 0,3                              | 1 049,0            | 12,6                    | 525,2                         | 999,6                            | 13,8                    | 506,5                         |
| 0,4                              | 1 004,8            | 16,0                    | 525,8                         | 1 030,0                          | 14,4                    | 522,3                         |
| 0,5                              | 991,4              | 16,5                    | 521,9                         | 981,4                            | 17,1                    | 532,8                         |
| 0,6                              | 987,8              | 17,7                    | 531,6                         | 1 000,4                          | 17,5                    | 531,1                         |
| 0,7                              | 985,2              | 19,1                    | 539,9                         | 978,4                            | 18,3                    | 536,8                         |
| 0,8                              | 973,2              | 20,1                    | 544,6                         | 989,6                            | 19,0                    | 546,4                         |
| 0,9                              | 1 001,4            | 20,6                    | 549,5                         | 964,6                            | 22,4                    | 555,0                         |
| 1,0                              | 983,2              | 20,9                    | 544,7                         | 960,0                            | 23,1                    | 552,1                         |
| 1,2                              | 1002,0             | 21,4                    | 546,1                         | 959,2                            | 21,7                    | 547,2                         |
| 1,4                              | 985,0              | 31,9                    | 564,8                         | 952,2                            | 25,2                    | 563,5                         |
| 1,6                              | 959,6              | 23,5                    | 564,8                         | 948,8                            | 32,6                    | 571,9                         |
| 1,8                              | 969,4              | 28,8                    | 566,4                         | 937,2                            | 35,8                    | 579,0                         |
| 2,0                              | 982,6              | 39,1                    | 582,1                         | 927,0                            | 41,7                    | 585,4                         |

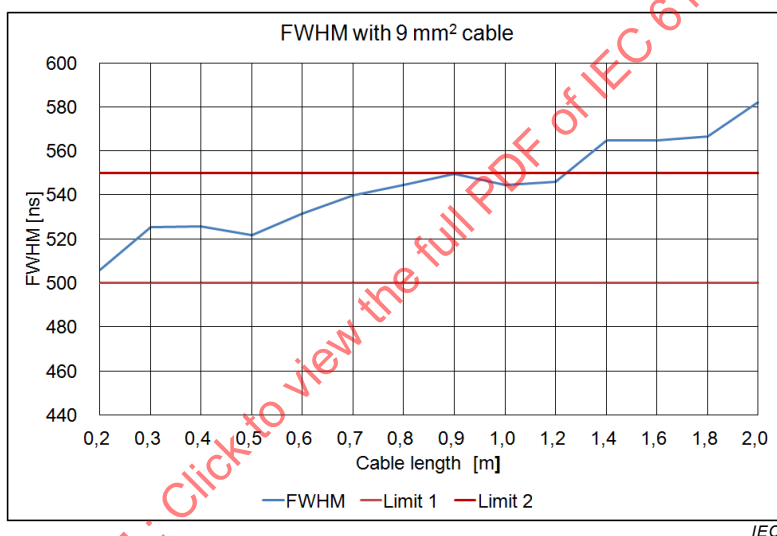


IEC

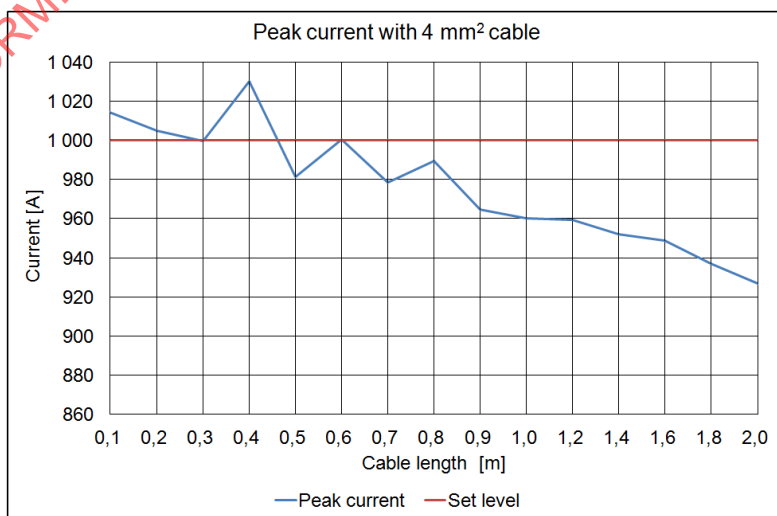
**Figure A.2 – Peak current calibration results with 9 mm<sup>2</sup> cables: 1 000 A ± 4 %**



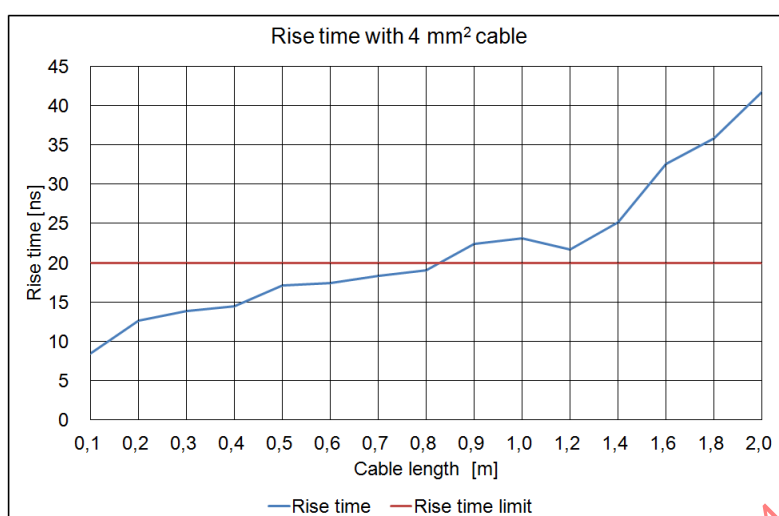
**Figure A.3 – Rise time calibration results with 9 mm<sup>2</sup> cables**



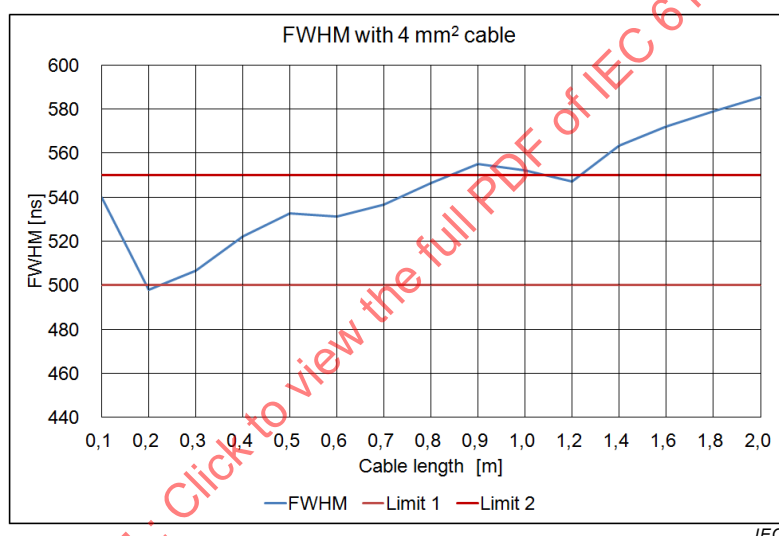
**Figure A.4 – FWHM calibration results with 9 mm<sup>2</sup> cables**



**Figure A.5 – Peak current calibration results with 4 mm<sup>2</sup> cables: 1 000 A ± 8 %**



**Figure A.6 – Rise time calibration results with 4 mm<sup>2</sup> cables**



**Figure A.7 – FWHM calibration results with 4 mm<sup>2</sup> cables**

### A.3 Variation of the length of the cable L2 connected for the measurement of residual current

The setup for the residual current measurement is shown in Figure A.8. Residual current is measured on the cable L2 at the output of the protective device using current sensor 2 when a pulse is injected to the input of the protective device.

It is generally required to measure the peak current, peak rate of rise and root action of the residual current waveform when the protective device performance is measured.

It was investigated how the wave shape is affected by the variation of the cable length L2.

A short pulse of 1 kA current is injected to a HEMP combination filter using a 0,4 m cable L1; the measurement was performed with the cables having a cross-section of 4 mm<sup>2</sup>, and varying the length of the cable L2 as follows: 0,2 m, 0,3 m, 0,4 m, 0,5 m, 0,6 m, 0,7 m, 0,8 m, 0,9 m and 1,0 m. In this case, the load impedance was 2 Ω.

The measurement results are shown in Table A.2 and Figure A.9 to Figure A.11.

It was concluded that the length of cable L2 for residual current measurement was not so much affected with the variation of the length in this measurement, because the rise time of the residual current was already slowed by the action of the protective device.

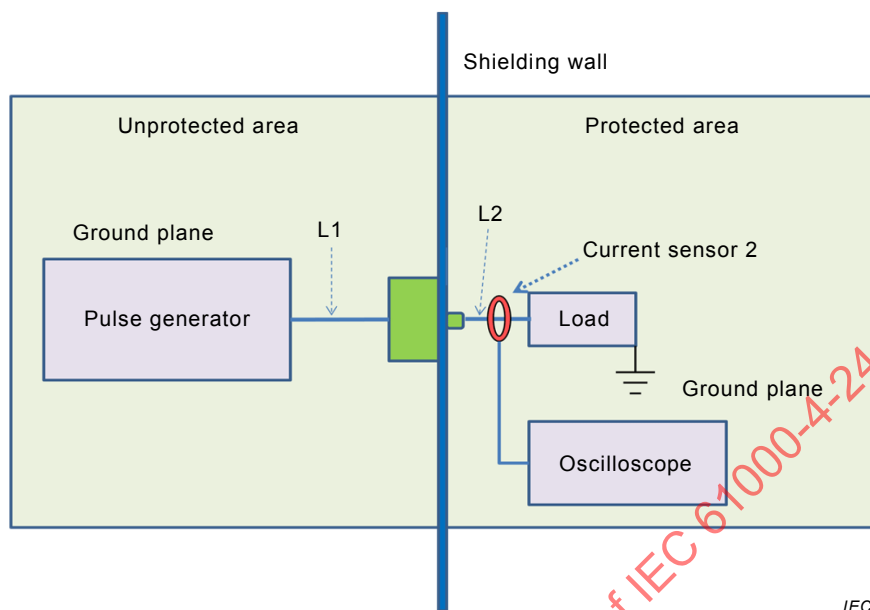
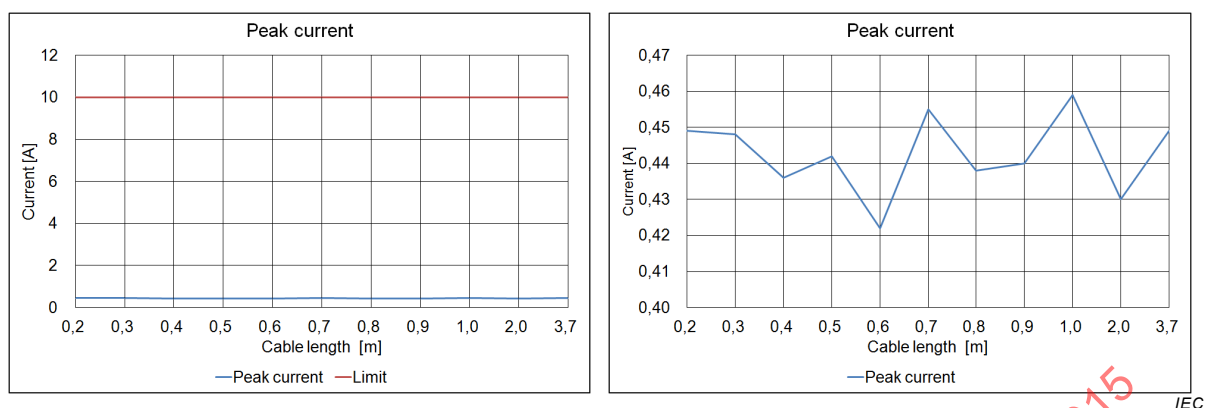


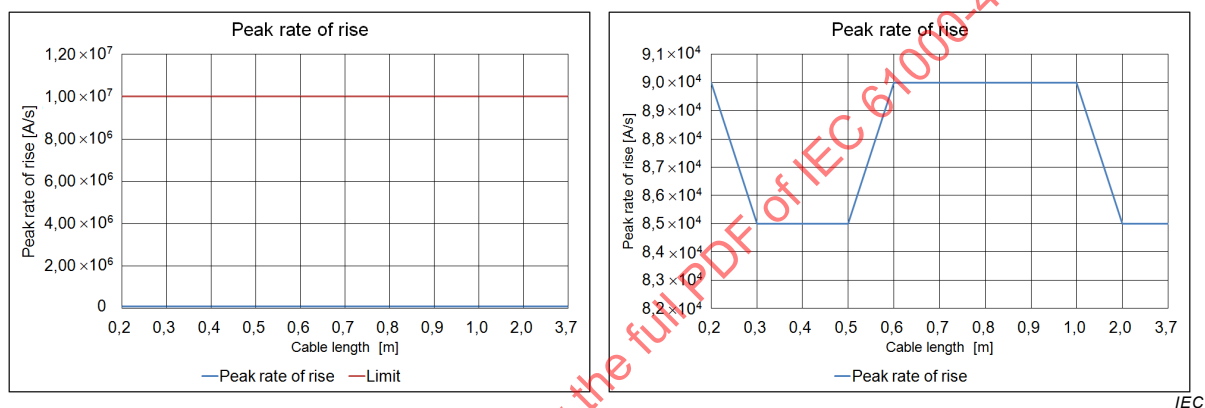
Figure A.8 – Measurement setup for residual current

Table A.2 – Measurement results for variation of the cable length at the measurement points

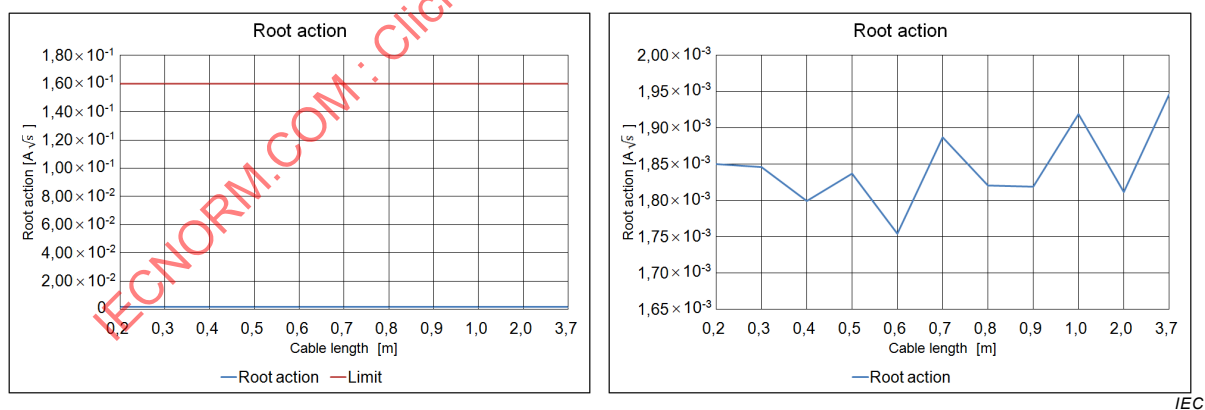
| Cross-section, 4 mm <sup>2</sup> |                      |                      |                       |                      |                        |                           |
|----------------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|------------------------|---------------------------|
| L2,<br>m                         | Measurement results  |                      |                       | Limit                |                        |                           |
|                                  | Peak<br>current<br>A | Peak rate of<br>rise | Root action           | Peak<br>current<br>A | Peak rate of<br>rise   | Root action               |
| 0,2                              | 0,45                 | $9,0 \times 10^4$    | $1,85 \times 10^{-3}$ | $\leq 10$            | $\leq 1,0 \times 10^7$ | $\leq 1,6 \times 10^{-1}$ |
| 0,3                              | 0,45                 | $8,5 \times 10^4$    | $1,85 \times 10^{-3}$ | $\leq 10$            | $\leq 1,0 \times 10^7$ | $\leq 1,6 \times 10^{-1}$ |
| 0,4                              | 0,44                 | $8,5 \times 10^4$    | $1,80 \times 10^{-3}$ | $\leq 10$            | $\leq 1,0 \times 10^7$ | $\leq 1,6 \times 10^{-1}$ |
| 0,5                              | 0,44                 | $8,5 \times 10^4$    | $1,84 \times 10^{-3}$ | $\leq 10$            | $\leq 1,0 \times 10^7$ | $\leq 1,6 \times 10^{-1}$ |
| 0,6                              | 0,42                 | $9,0 \times 10^4$    | $1,75 \times 10^{-3}$ | $\leq 10$            | $\leq 1,0 \times 10^7$ | $\leq 1,6 \times 10^{-1}$ |
| 0,7                              | 0,46                 | $9,0 \times 10^4$    | $1,89 \times 10^{-3}$ | $\leq 10$            | $\leq 1,0 \times 10^7$ | $\leq 1,6 \times 10^{-1}$ |
| 0,8                              | 0,44                 | $9,0 \times 10^4$    | $1,82 \times 10^{-3}$ | $\leq 10$            | $\leq 1,0 \times 10^7$ | $\leq 1,6 \times 10^{-1}$ |
| 0,9                              | 0,44                 | $9,0 \times 10^4$    | $1,82 \times 10^{-3}$ | $\leq 10$            | $\leq 1,0 \times 10^7$ | $\leq 1,6 \times 10^{-1}$ |
| 1,0                              | 0,46                 | $9,0 \times 10^4$    | $1,92 \times 10^{-3}$ | $\leq 10$            | $\leq 1,0 \times 10^7$ | $\leq 1,6 \times 10^{-1}$ |
| 2,0                              | 0,43                 | $8,5 \times 10^4$    | $1,81 \times 10^{-3}$ | $\leq 10$            | $\leq 1,0 \times 10^7$ | $\leq 1,6 \times 10^{-1}$ |
| 3,7                              | 0,45                 | $8,5 \times 10^4$    | $1,95 \times 10^{-3}$ | $\leq 10$            | $\leq 1,0 \times 10^7$ | $\leq 1,6 \times 10^{-1}$ |



**Figure A.9 – Measurement result of peak current with variation of measurement cable L2**



**Figure A.10 – Measurement result of peak rate of rise with variation of measurement cable L2**



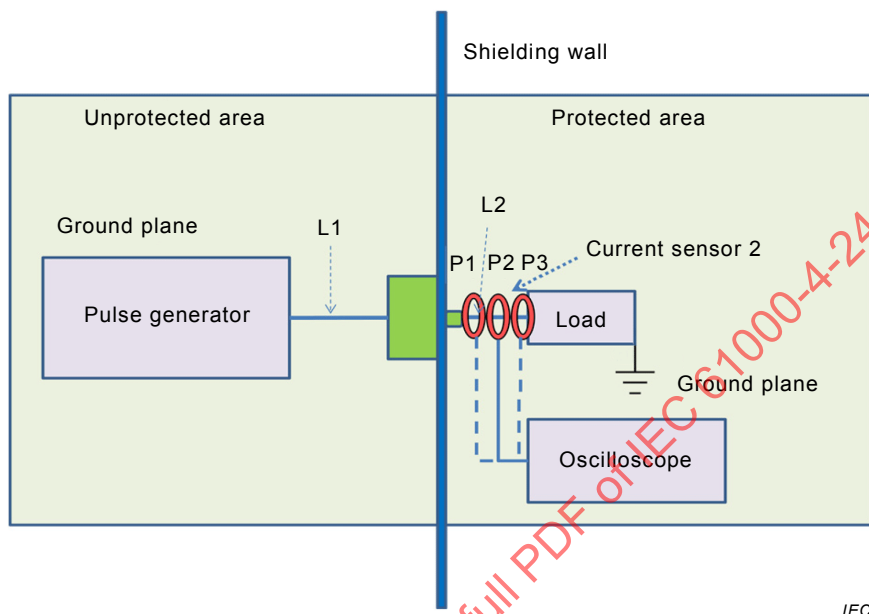
**Figure A.11 – Measurement result of root action with variation of measurement cable L2**

In addition, the measurement was performed with the three different positions as follows (see Figure A.12):

- Position 1: current sensor 2 is at the terminal side of the output (protected area) of a protective device.
- Position 2: current sensor 2 is at the middle point of the cable L2, which is different depending on the cable length.
- Position 3: current sensor 2 is at the end of the cable at load side.

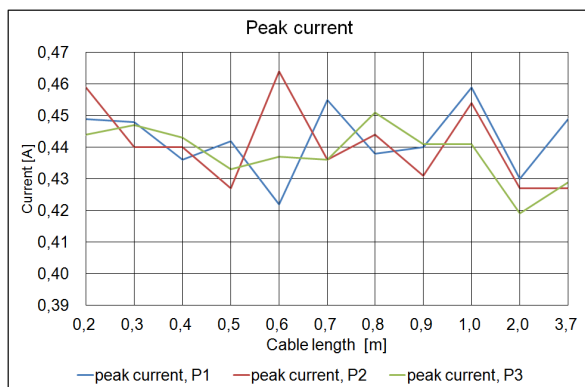
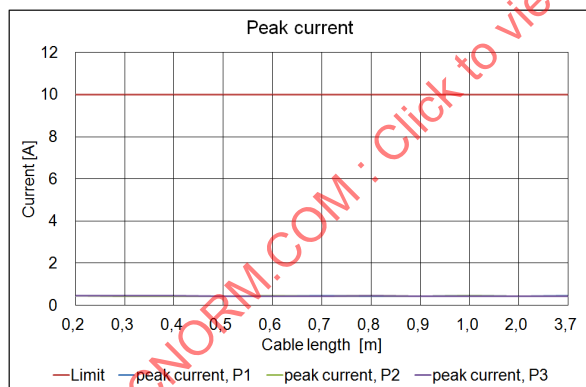
Measurement results are shown in Figure A.13 to Figure A.15.

It was concluded that the positions of current sensor 2 for residual current measurement were not so much affected by the measurement results, because the rise time of the residual current was already slowed by the action of the protective device. Therefore, it is recommended that current sensor 2 shall be placed within 0,15 m from the output terminal (protected area) of the protective device.



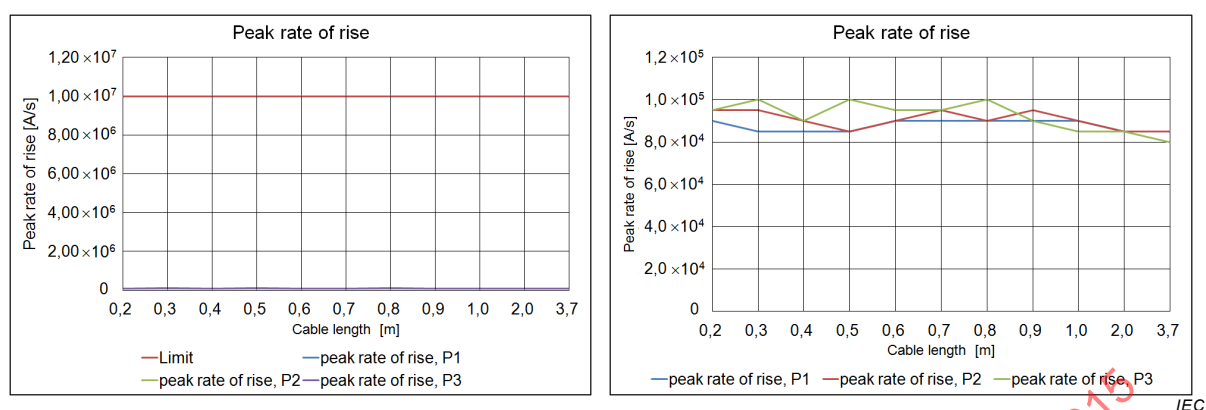
IEC

**Figure A.12 – Variation of the position of current sensor 2 on the measurement cable L2**

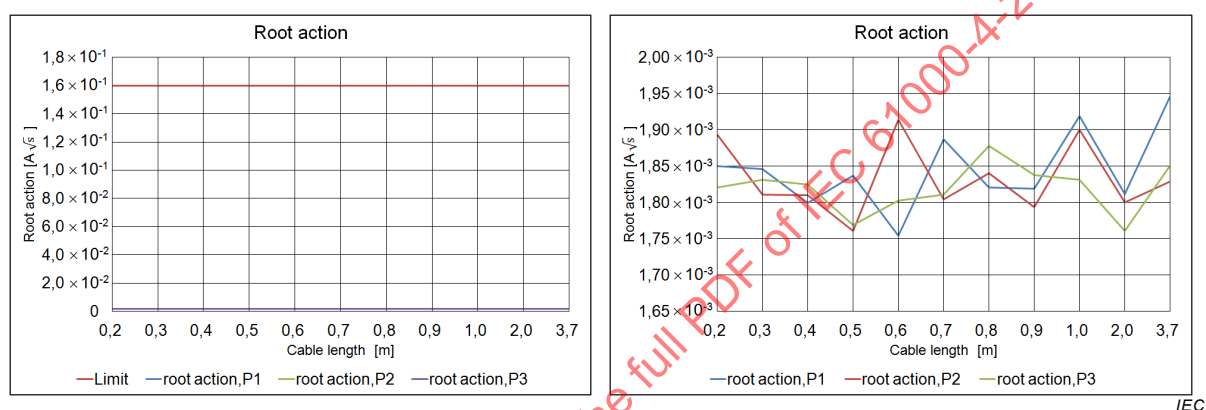


IEC

**Figure A.13 – Peak current with variation of cable L2 and at different positions**



**Figure A.14 – Peak rate of rise with variation of cable L2 and at different positions**



**Figure A.15 – Root action with variation of cable L2 and at different positions**

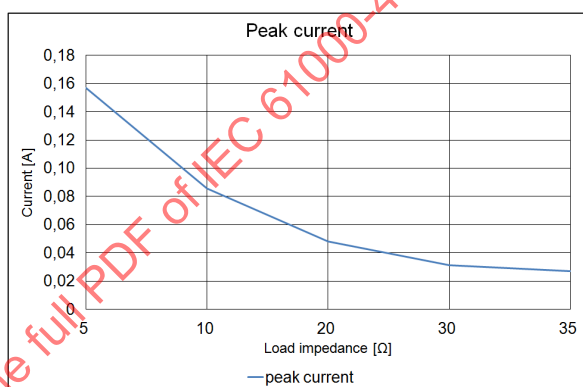
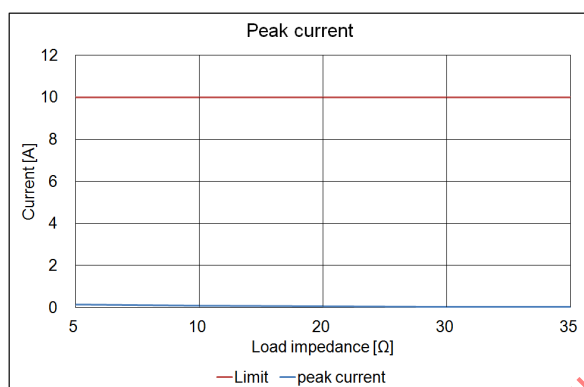
#### A.4 Variation of load impedance and cable length for connection between load and ground

For the measurement setup (see Figure A.8), the measurement results of a variation of load impedance are shown in Table A.3 and Figure A.16 to Figure A.18.

It was concluded that increasing the load impedance for residual current measurement could reduce the measurement dynamic range. Therefore, it is recommended that load impedance for the measurement of residual current is low. In this case, the voltage measurement is possible for the residual current with the voltage probe at the defined load impedance. The measured voltage can be converted to current.

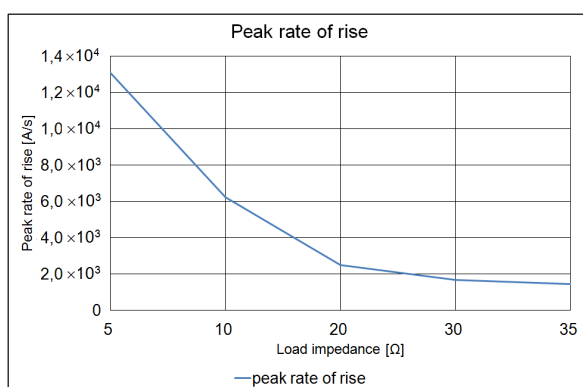
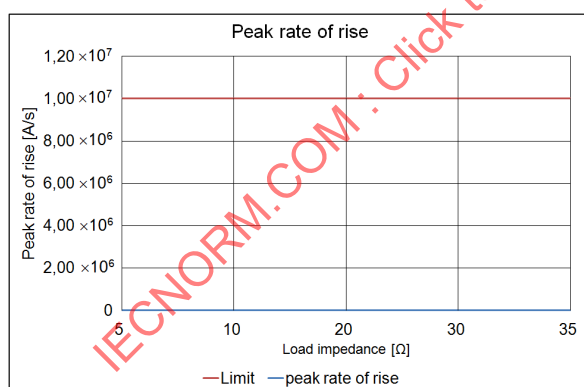
**Table A.3 – Measurement results for variation of the load impedance**

| Cross-section, 4 mm <sup>2</sup> |                     |                         |                   |                      |                   |                        |                           |
|----------------------------------|---------------------|-------------------------|-------------------|----------------------|-------------------|------------------------|---------------------------|
| Load                             | Measurement results |                         |                   |                      | Limit             |                        |                           |
|                                  | Peak current<br>A   | Calculated voltage<br>V | Peak rate of rise | Root action          | Peak current<br>A | Peak rate of rise      | Root action               |
| 5 Ω                              | 0,16                | 0,78                    | $1,3 \times 10^4$ | $1,1 \times 10^{-3}$ | $\leq 10$         | $\leq 1,0 \times 10^7$ | $\leq 1,6 \times 10^{-1}$ |
| 10 Ω                             | 0,09                | 0,86                    | $6,3 \times 10^3$ | $7,7 \times 10^{-4}$ | $\leq 10$         | $\leq 1,0 \times 10^7$ | $\leq 1,6 \times 10^{-1}$ |
| 20 Ω                             | 0,05                | 0,96                    | $2,5 \times 10^3$ | $5,6 \times 10^{-4}$ | $\leq 10$         | $\leq 1,0 \times 10^7$ | $\leq 1,6 \times 10^{-1}$ |
| 30 Ω                             | 0,03                | 0,94                    | $1,7 \times 10^3$ | $4,1 \times 10^{-4}$ | $\leq 10$         | $\leq 1,0 \times 10^7$ | $\leq 1,6 \times 10^{-1}$ |
| 35 Ω                             | 0,03                | 0,95                    | $1,4 \times 10^3$ | $3,7 \times 10^{-4}$ | $\leq 10$         | $\leq 1,0 \times 10^7$ | $\leq 1,6 \times 10^{-1}$ |



IEC

**Figure A.16 – Measurement result of peak current with variation of load impedance.**



IEC

**Figure A.17 – Measurement result of peak rate of rise with variation of load impedance**

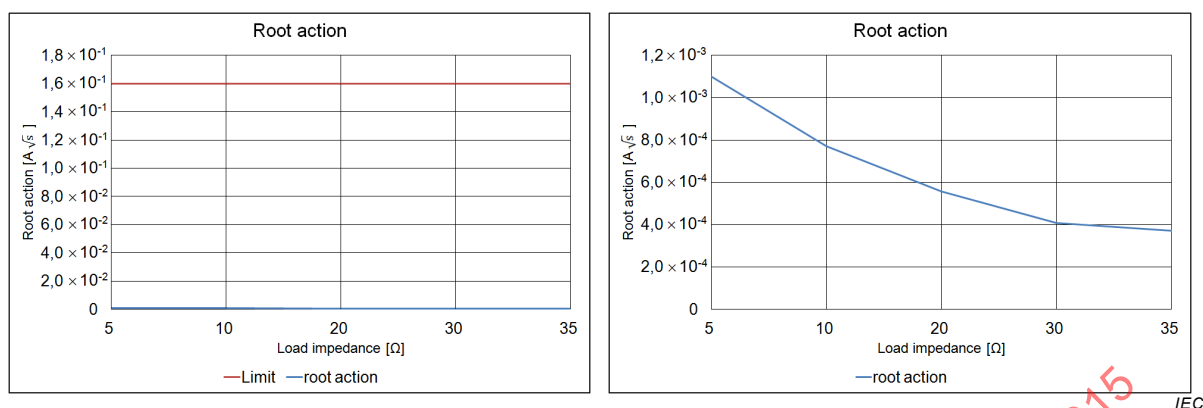


Figure A.18 – Measurement result of root action with variation of load impedance.

## A.5 Variation of the cable length between load and ground

Measurement setup of the variation of the cable length L3 between load and ground is shown in Figure A.19.

The measurement results are shown in Table A.4 and Figure A.20 to Figure A.22.

It was concluded that the length of cable (L3) connected between load and ground plane for residual current measurement was not so much affected with the variation of the length in this measurement, because the rise time of the residual current was already slowed by the action of the protective device.

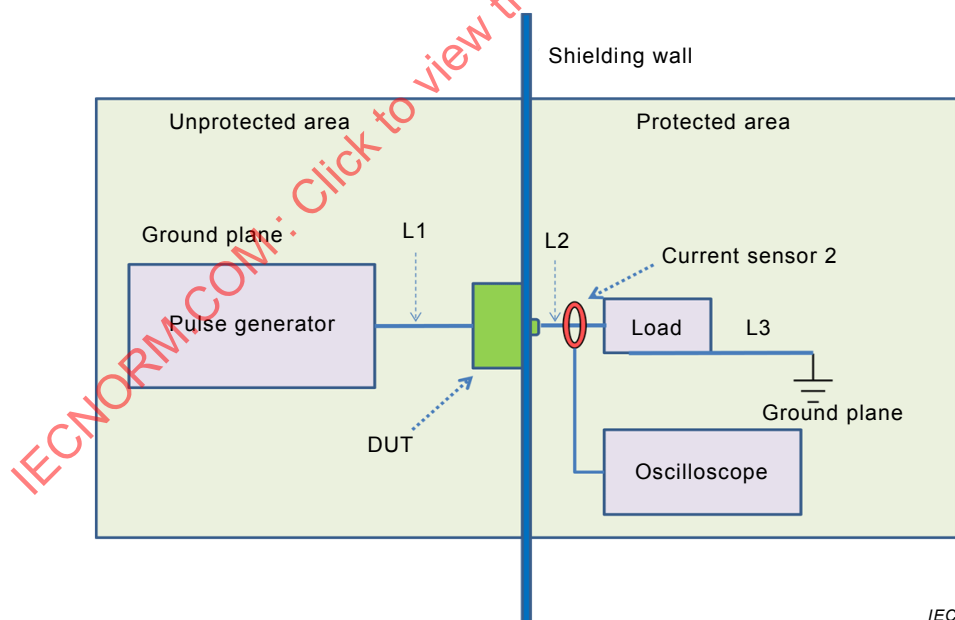
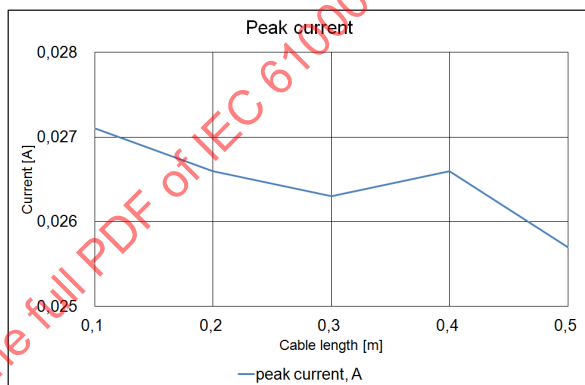
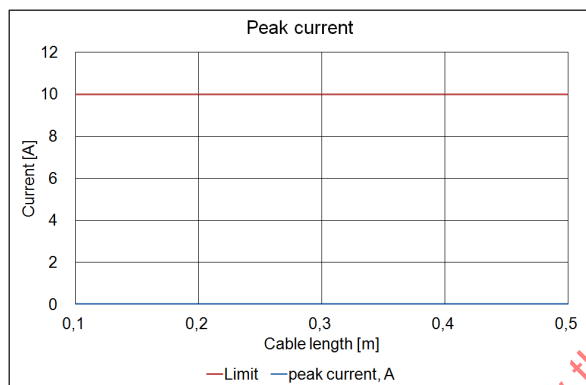


Figure A.19 – Variation of the length of cable L3 connected between load and ground plane

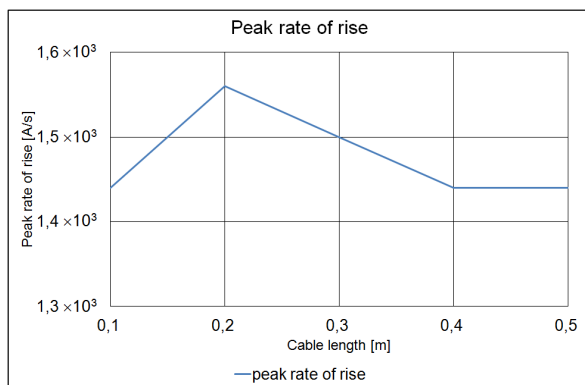
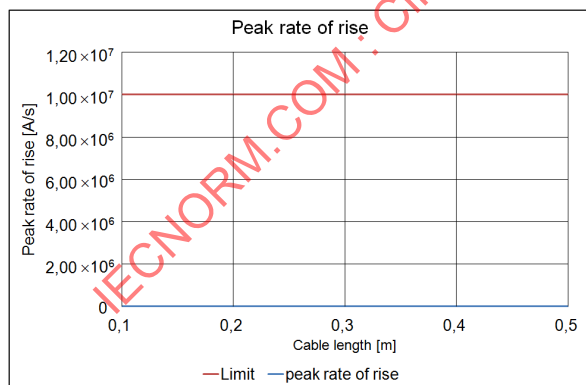
**Table A.4 – Measurement results for variation of the cable length between load and ground**

| Cross-section, 4 mm <sup>2</sup> |                     |                              |                      |                       |                        |                           |
|----------------------------------|---------------------|------------------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|---------------------------|
| L3,<br>m                         | Measurement results |                              |                      | Limit                 |                        |                           |
|                                  | Peak current,<br>A  | Peak rate<br>of rise,<br>A/s | Root action          | Peak<br>current,<br>A | Peak rate of<br>rise   | Root action               |
| 0,1                              | 0,027               | $1,4 \times 10^3$            | $3,7 \times 10^{-4}$ | $\leq 10$             | $\leq 1,0 \times 10^7$ | $\leq 1,6 \times 10^{-1}$ |
| 0,2                              | 0,027               | $1,6 \times 10^3$            | $3,7 \times 10^{-4}$ | $\leq 10$             | $\leq 1,0 \times 10^7$ | $\leq 1,6 \times 10^{-1}$ |
| 0,3                              | 0,026               | $1,5 \times 10^3$            | $3,6 \times 10^{-4}$ | $\leq 10$             | $\leq 1,0 \times 10^7$ | $\leq 1,6 \times 10^{-1}$ |
| 0,4                              | 0,027               | $1,4 \times 10^3$            | $3,6 \times 10^{-4}$ | $\leq 10$             | $\leq 1,0 \times 10^7$ | $\leq 1,6 \times 10^{-1}$ |
| 0,5                              | 0,026               | $1,4 \times 10^3$            | $3,5 \times 10^{-4}$ | $\leq 10$             | $\leq 1,0 \times 10^7$ | $\leq 1,6 \times 10^{-1}$ |



IEC

**Figure A.20 – Measurement result of peak current with variation of measurement cable L3**



IEC

**Figure A.21 – Measurement result of peak rate of rise with variation of measurement cable L3**

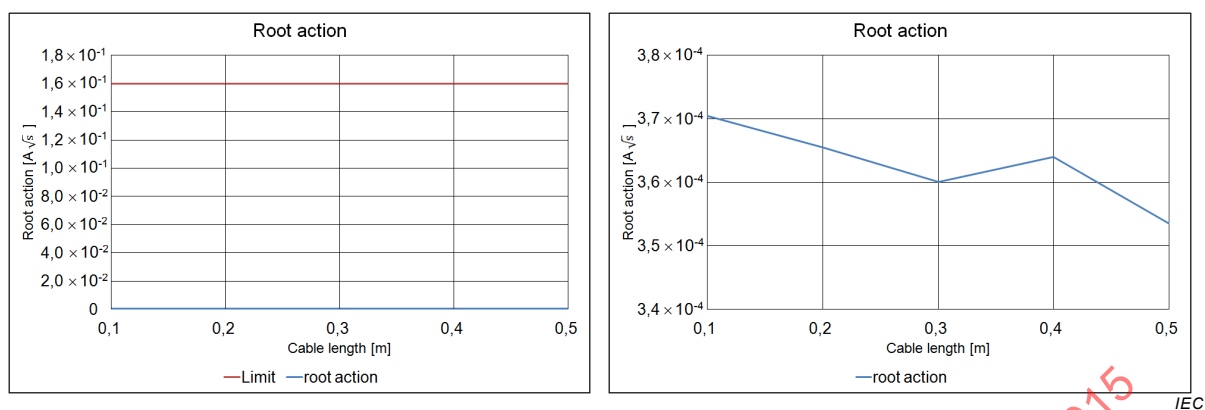


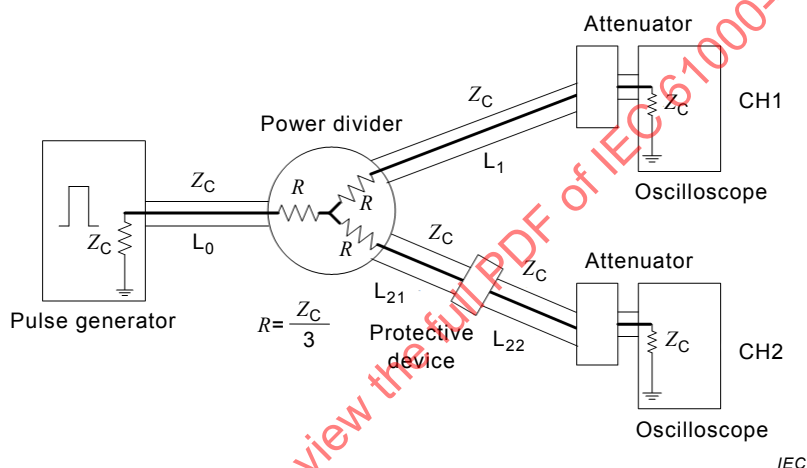
Figure A.22 – Measurement result of root action with variation of measurement cable L3

## Annex B (informative)

### Test method for the quantitative determination of the direct response behaviours of a coaxial surge protector

Annex B provides a practical method to obtain the direct response behaviours of a surge protective device (SPD), especially the coaxial type protector, and of a voltage breakdown device, for example a gas discharge tube (GDT). This method covers the residual voltage measurement, the response time measurement and the direct voltage-limiting response behaviour flowing through an SPD in the time domain.

The test setup consists of a pulse generator, launching line, wide-band power divider, attenuators, oscilloscope and coaxial cables as shown in Figure B.1.



**Figure B.1 – Test setup with a power divider for testing protective devices**

The launching line is connected to the power divider, and the DUT is connected to one of the circuit branches of a power divider.

A power divider is used to match the impedance at each branch circuit in order to keep the same surge impedance along the direction of the propagating wave. Cables, attenuators and termination loads in the test setup are well matched. The power divider should be designed to avoid breakdown and to confirm the accuracy of the resistances inside the power divider to mitigate symmetric error.

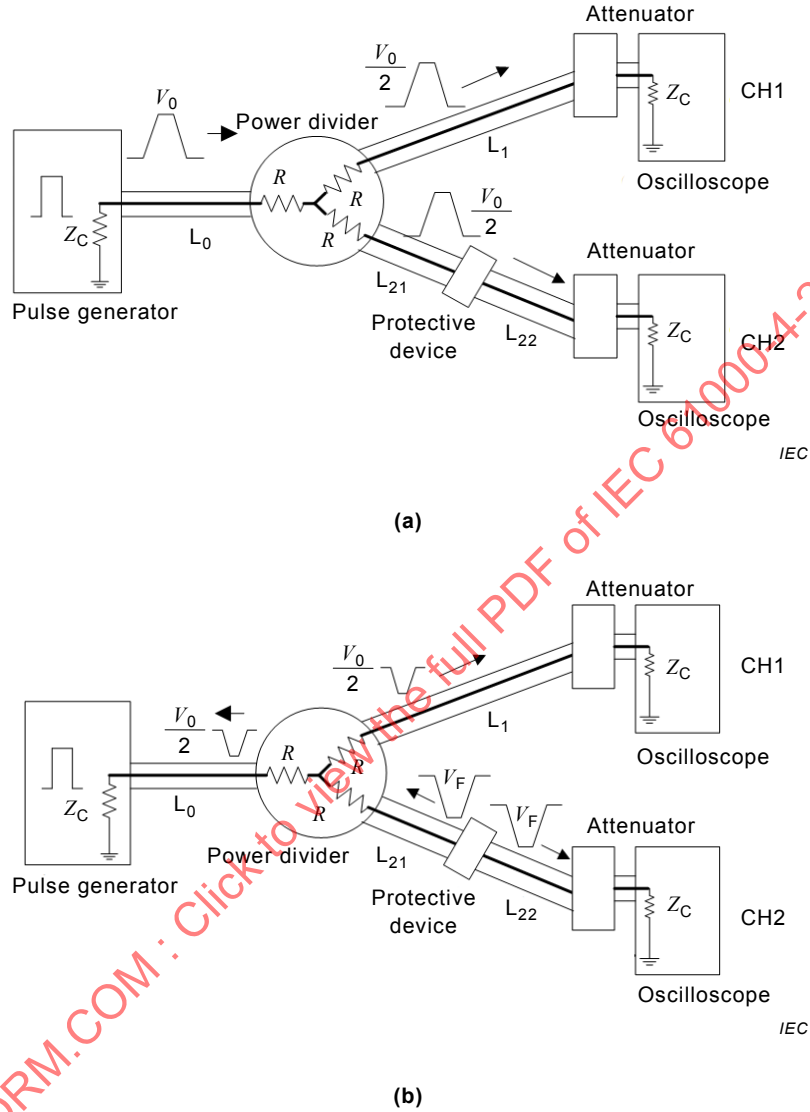
The three branches are the launching branch ( $L_0$ ), the normal branch ( $L_1$ ) and the DUT branch ( $L_2$ ), respectively. The characteristic impedance of each branch is equal to  $Z_c$ , for example  $50\ \Omega$  or  $75\ \Omega$ .

One has to be aware of the following aspects:

- In order to match the forward and backward travelling wave propagating along the cables, the terminal loads of each branch should also be equal to  $Z_c$  and the value of each resistance inside the power divider should be  $\frac{Z_c}{3}$ .
- It is reasonable to neglect the waveform distortion due to the propagation along the branch cable since the length of the cable is sufficiently short.

The waveform at the terminal of the normal branch and the DUT branch should be recorded by two channels of the same oscilloscope.

Figure B.2 shows  $V_0$  (before the surge arrester firing) and  $V_F$  (after the surge arrester firing) propagating along the branches.



**Figure B.2 – Waves propagating along the branches**

The measured waveforms at each branch terminal are shown as follows:

- Normal branch:

$$V_{CH1}(t) = \frac{1}{A} \cdot \left[ \frac{V_0(t - \tau_{L0} - \tau_{L1})}{2} + \frac{V_0(t - \tau_{L21} - \tau_{L1})}{2} \right] \quad (B.1)$$

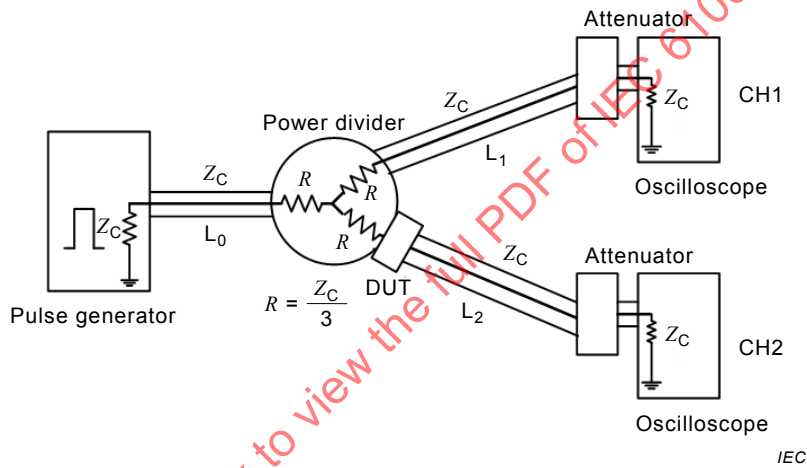
- DUT branch:

$$V_{CH2}(t) = \frac{1}{A} \cdot \left[ \frac{V_0(t - \tau_{L0} - \tau_{L21} - \tau_{L22})}{2} + V_F(t - \tau_{L22}) \right] \quad (B.2)$$

where  $A$  is the attenuation factor of the attenuator,  $A = \frac{V_{in}}{V_{out}}$  (for a commercial attenuator, the attenuation factor is usually given in decibels, thus conversion to a ratio is essential), and  $\tau_{L0}$ ,  $\tau_{L1}$ ,  $\tau_{L21}$ ,  $\tau_{L22}$  stand for the time delays on the corresponding coaxial cable. Notice that if the dimension of the DUT or the power divider is not negligible, the time delay within the devices should be taken into consideration as well.

One can directly get the response time of the SPDs by comparing the two measured waveforms. Moreover, by solving the equation set (B.1) and (B.2), we can obtain the output pulse of generator  $V_0(t)$ , the applied pulse on the DUT  $\frac{V_0(t)}{2}$  and the induced pulse  $V_F(t)$  which is the direct response behaviour flowing through the SPD in the time domain.

For practical applications, a simplified test setup could be applied when the dimension of the power divider or the DUT is small enough to neglect the time delay when the wave propagates through these devices. Figure B.3 shows the simplified test setup for this case.



**Figure B.3 – Simplified test setup for testing protective devices**

The distinctive features of the simplified proposed test setup are as follows:

- The power divider and the DUT are connected directly, and the dimension of the power divider and the DUT are small enough to neglect time delay  $\tau_{L21}$ .
- Choose the same length for cable  $L_1$  and cable  $L_2$ , to make sure the two branches' waveforms reach the terminals at the same time to simplify the computation.

With  $L_1 = L_2 = L$ , the measured waveforms at each branch terminal could be simplified as follows:

- Normal branch:

$$V_{CH1}(t) = \frac{1}{A} \cdot \left[ \frac{V_0(t - \tau_{L0} - \tau_L)}{2} + \frac{V_F(t - \tau_L)}{2} \right] \quad (B.3)$$

- DUT branch:

$$V_{CH2}(t) = \frac{1}{A} \cdot \left[ \frac{V_0(t - \tau_{L0} - \tau_L)}{2} + V_F(t - \tau_L) \right] \quad (B.4)$$

Where,  $\tau_{L0}$  and  $\tau_L$  stand for the time delays of the corresponding coaxial cable.

The time delays of the applied pulse  $V_0$  on the two branches are the same, along with the induced wave  $V_F(t)$ . From the DUT point of view, we can obtain the applied pulse and the induced pulse by the following computation.

- Applied pulse:

$$\frac{V_0(t - \tau_{L0} - \tau_L)}{2} = A \cdot [2V_{CH1}(t) - V_{CH2}(t)] \quad (B.5)$$

- Induced pulse caused by the “fired” test device:

$$V_F(t - \tau_L) = 2A \cdot [V_{CH2}(t) - V_{CH1}(t)] \quad (B.6)$$

The time delay of the induced waveform  $V_F$  with respect to the applied pulse  $\frac{V_0}{2}$  is the response time of the voltage breakdown device.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61000-4-24:2015

## Bibliography

- [1] Mil-Std-188-125-1: 2005, High-Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) Protection for Ground-Based C<sub>4</sub>I Facilities Performing Critical, Time-Urgent Missions, Part I – Fixed Facilities
- [2] IEC TR 61000-1-3:2002, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 1-3: General – The effects of high-altitude EMP (HEMP) on civil equipment and systems*
- [3] IEC 61000-2-9, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2: Environment – Section 9: Description of HEMP environment – Radiated disturbance*
- [4] IEC 61000-2-11, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-11: Environment Classification of HEMP environments*
- [5] IEC 61000-4-33:2005, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-33: Testing and measurement techniques – Measurement methods for high-power transient parameters*
- [6] IEC/TR 61000-5-3, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5-3: Installation and mitigation guidelines – HEMP protection concepts*
- [7] IEC 61000-5-5:1996, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5: Installation and mitigation guidelines – Section 5: Specification of protective devices for HEMP conducted disturbance – Basic EMC Publication*
- [8] IEC TR 61000-5-6:2002, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5-6: Installation and mitigation guidelines – Mitigation of external EM influences*

---

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61000-4-24:2015

## SOMMAIRE

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| AVANT-PROPOS .....                                                                                              | 45 |
| INTRODUCTION .....                                                                                              | 47 |
| 1 Domaine d'application .....                                                                                   | 48 |
| 2 Références normatives .....                                                                                   | 48 |
| 3 Termes, définitions et abréviations .....                                                                     | 48 |
| 3.1 Termes et définitions .....                                                                                 | 48 |
| 3.2 Abréviations .....                                                                                          | 50 |
| 4 Méthodes d'essai des dispositifs de protection (à l'exception d'un filtre) pour perturbations conduites ..... | 50 |
| 4.1 Généralités .....                                                                                           | 50 |
| 4.2 Montage d'essai .....                                                                                       | 51 |
| 4.3 Générateur d'impulsions .....                                                                               | 51 |
| 4.4 Ligne d'émission .....                                                                                      | 52 |
| 4.5 Dispositifs/soutiens d'essai .....                                                                          | 52 |
| 4.5.1 Généralités .....                                                                                         | 52 |
| 4.5.2 Dispositifs de type A .....                                                                               | 52 |
| 4.5.3 Dispositifs de type B .....                                                                               | 52 |
| 4.6 Charge .....                                                                                                | 53 |
| 4.7 Oscilloscope .....                                                                                          | 54 |
| 4.8 Procédure d'essai .....                                                                                     | 54 |
| 4.8.1 Réglage du générateur d'impulsions .....                                                                  | 54 |
| 4.8.2 Procédures de vérification .....                                                                          | 54 |
| 4.8.3 Essai .....                                                                                               | 55 |
| 4.8.4 Dernier examen du DUT .....                                                                               | 55 |
| 4.9 Référence à la présente Norme .....                                                                         | 55 |
| 5 Méthode de mesure pour les filtres combinés IEMN-HA .....                                                     | 56 |
| 5.1 Montage de vérification .....                                                                               | 56 |
| 5.2 Montage de mesure .....                                                                                     | 56 |
| 5.3 Appareil de mesure .....                                                                                    | 58 |
| 5.3.1 Générateurs d'impulsions .....                                                                            | 58 |
| 5.3.2 Oscilloscope .....                                                                                        | 59 |
| 5.3.3 Capteurs de courant .....                                                                                 | 60 |
| 5.3.4 Charges d'essai .....                                                                                     | 60 |
| 5.4 Modes d'essai exigés .....                                                                                  | 60 |
| 5.5 Procédure de mesure .....                                                                                   | 61 |
| 5.5.1 Généralités .....                                                                                         | 61 |
| 5.5.2 Vérification des impulsions .....                                                                         | 62 |
| 5.5.3 Procédure de mesure .....                                                                                 | 62 |
| 5.6 Évaluation des résultats d'essais .....                                                                     | 62 |
| 5.7 Rapport d'essai .....                                                                                       | 63 |
| Annexe A (informative) Investigation relative à l'établissement du montage de mesure .....                      | 65 |
| A.1 Généralités .....                                                                                           | 65 |
| A.2 Variation du câble connecté pour la mesure du courant de court-circuit .....                                | 65 |
| A.3 Variation de la longueur du câble L2 connecté pour la mesure du courant résiduel .....                      | 69 |

|                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| A.4                                                                                                                                                                               | Variation de l'impédance de charge et de la longueur de câble pour une connexion entre la charge et le sol..... | 74 |
| A.5                                                                                                                                                                               | Variation de la longueur de câble entre la charge et le sol .....                                               | 76 |
| Annexe B (informative) Méthode d'essai pour la détermination quantitative des comportements de réponse directs d'un dispositif coaxial de protection contre les surtensions ..... |                                                                                                                 | 79 |
| Bibliographie.....                                                                                                                                                                |                                                                                                                 | 83 |
| Figure 1 – Montage d'essai pour dispositifs de protection .....                                                                                                                   |                                                                                                                 | 51 |
| Figure 2 – Exemple d'un dispositif/support d'essai de type B (universel) .....                                                                                                    |                                                                                                                 | 54 |
| Figure 3 – Montage type de vérification du niveau d'essai d'impulsion .....                                                                                                       |                                                                                                                 | 56 |
| Figure 4 – Exemple de montage d'essai à l'aide d'une ou de deux enceintes blindées .....                                                                                          |                                                                                                                 | 57 |
| Figure 5 – Exemple de montage d'essai à l'aide d'une enceinte blindée.....                                                                                                        |                                                                                                                 | 57 |
| Figure 6 – Forme d'onde biexponentielle.....                                                                                                                                      |                                                                                                                 | 59 |
| Figure 7 – Exemple de montage de câblage d'un DUT à lignes uniques.....                                                                                                           |                                                                                                                 | 60 |
| Figure 8 – Exemple de montage de câblage d'un DUT multiligne couplé mutuellement .....                                                                                            |                                                                                                                 | 61 |
| Figure A.1 – Montage en vue de l'étalonnage .....                                                                                                                                 |                                                                                                                 | 65 |
| Figure A.2 – Résultats d'étalonnage du courant de crête avec des câbles de 9 mm <sup>2</sup> :<br>1 000 A ± 4 % .....                                                             |                                                                                                                 | 66 |
| Figure A.3 – Résultats d'étalonnage du temps de montée avec des câbles de 9 mm <sup>2</sup> .....                                                                                 |                                                                                                                 | 67 |
| Figure A.4 – Résultats d'étalonnage FWHM avec des câbles de 9 mm <sup>2</sup> .....                                                                                               |                                                                                                                 | 67 |
| Figure A.5 – Résultats d'étalonnage du courant de crête avec des câbles de 4 mm <sup>2</sup> :<br>1 000 A ± 8 % .....                                                             |                                                                                                                 | 68 |
| Figure A.6 – Résultats d'étalonnage du temps de montée avec des câbles de 4 mm <sup>2</sup> .....                                                                                 |                                                                                                                 | 68 |
| Figure A.7 – Résultats d'étalonnage FWHM avec des câbles de 4 mm <sup>2</sup> .....                                                                                               |                                                                                                                 | 69 |
| Figure A.8 – Montage de mesure du courant résiduel .....                                                                                                                          |                                                                                                                 | 70 |
| Figure A.9 – Résultat de mesure du courant de crête avec variation du câble de<br>mesure L2.....                                                                                  |                                                                                                                 | 71 |
| Figure A.10 – Résultat de mesure de la valeur de crête du temps de montée avec<br>variation du câble de mesure L2 .....                                                           |                                                                                                                 | 71 |
| Figure A.11 – Résultat de mesure de l'action racine avec variation du câble de mesure L2...72                                                                                     |                                                                                                                 | 72 |
| Figure A.12 – Variation de la position du capteur de courant 2 sur le câble de mesure L2 ....73                                                                                   |                                                                                                                 | 73 |
| Figure A.13 – Courant de crête avec variation du câble L2 et aux différentes positions.....73                                                                                     |                                                                                                                 | 73 |
| Figure A.14 – Valeur de crête du temps de montée avec variation du câble L2 et aux<br>différentes positions.....                                                                  |                                                                                                                 | 74 |
| Figure A.15 – Action racine avec variation du câble L2 et aux différentes positions .....                                                                                         |                                                                                                                 | 74 |
| Figure A.16 – Résultat de mesure du courant de crête avec variation de l'impédance<br>de charge .....                                                                             |                                                                                                                 | 75 |
| Figure A.17 – Résultat de mesure de la valeur de crête du temps de montée avec<br>variation de l'impédance de charge .....                                                        |                                                                                                                 | 75 |
| Figure A.18 – Résultat de mesure de l'action racine avec variation de l'impédance de<br>charge .....                                                                              |                                                                                                                 | 76 |
| Figure A.19 – Variation de la longueur du câble L3 connecté entre la charge et le plan<br>de masse .....                                                                          |                                                                                                                 | 76 |
| Figure A.20 – Résultat de mesure du courant de crête avec variation du câble de<br>mesure L3.....                                                                                 |                                                                                                                 | 77 |

|                                                                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure A.21 – Résultat de mesure de la valeur de crête du temps de montée avec variation du câble de mesure L3 .....                                               | 77 |
| Figure A.22 – Résultat de mesure de l'action racine avec variation du câble de mesure L3...                                                                        | 78 |
| Figure B.1 – Montage d'essai avec un répartiteur de puissance en vue de soumettre des dispositifs de protection à essai .....                                      | 79 |
| Figure B.2 – Ondes se propageant le long des branches .....                                                                                                        | 80 |
| Figure B.3 – Montage d'essai simplifié pour l'essai de dispositifs de protection .....                                                                             | 81 |
| Tableau 1 – Vue d'ensemble des exigences d'essai IEMN-HA initiale conduite (CEP) définies dans d'autres spécifications .....                                       | 58 |
| Tableau 2 – Vue d'ensemble des exigences d'essai IEMN-HA intermédiaire conduite (CIP) définies dans d'autres spécifications .....                                  | 59 |
| Tableau 3 – Mode d'essai et montage de câblage du DUT .....                                                                                                        | 61 |
| Tableau 4 – Critères de performance du filtre par rapport à l'IEMN-HA initiale – Accès d'alimentation en courant alternatif avec charge nominale $2\ \Omega$ ..... | 62 |
| Tableau 5 – Critères de performance du filtre par rapport à l'IEMN-HA initiale – Accès d'alimentation en courant continu avec charge nominale $2\ \Omega$ .....    | 63 |
| Tableau 6 – Critères de performance du filtre par rapport à l'IEMN-HA initiale – Accès signal, données et contrôle avec charge nominale $50\ \Omega$ .....         | 63 |
| Tableau A.1 – Résultats de mesure pour l'étalonnage de la forme d'onde du courant de court-circuit .....                                                           | 66 |
| Tableau A.2 – Résultats de mesure de la variation de la longueur du câble aux points de mesure .....                                                               | 70 |
| Tableau A.3 – Résultats de mesure de la variation de l'impédance de charge .....                                                                                   | 75 |
| Tableau A.4 – Résultats de mesure de la variation de la longueur du câble entre la charge et la masse .....                                                        | 77 |

## COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

## COMPATIBILITÉ ÉLECTROMAGNÉTIQUE (CEM) –

**Partie 4-24: Techniques d'essai et de mesure –  
Méthodes d'essai pour les dispositifs de protection  
pour perturbations conduites IEMN-HA**

## AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Électrotechnique Internationale (IEC) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de l'IEC). L'IEC a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. À cet effet, l'IEC – 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 l'IEC"). 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 l'IEC, participent également aux travaux. L'IEC 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 l'IEC concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de l'IEC intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de l'IEC se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de l'IEC. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que l'IEC s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; l'IEC 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'uniformité internationale, les Comités nationaux de l'IEC s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de l'IEC dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de l'IEC et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) L'IEC elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de l'IEC. L'IEC n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 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 l'IEC, 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 l'IEC, 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 l'IEC ou de toute autre Publication de l'IEC, 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 l'IEC peuvent faire l'objet de droits de brevet. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale IEC 61000-4-24 a été établie par le sous-comité 77C: Phénomènes transitoires de forte intensité, du comité d'études 77 de l'IEC: Compatibilité électromagnétique.

Elle constitue la Partie 4-24 de l'IEC 61000. Elle a le statut de publication CEM de base conformément au Guide 107 de l'IEC.

Cette deuxième édition annule et remplace la première édition parue en 1997. Cette édition constitue une révision technique.

Cette édition inclut les modifications techniques majeures suivantes par rapport à l'édition précédente:

- a) Un nouvel Article 5: Méthode de mesure pour filtres combinés IEMN-HA, qui est divisé comme suit: 5.1 Montage de vérification, 5.2 Montage de mesure, 5.3 Appareil de mesure, 5.4 Modes d'essai, 5.5 Procédures de mesure, 5.6 Evaluation des résultats d'essai avec introduction d'un critère de performance de filtre, 5.7 Rapport d'essai.
- b) Une nouvelle Annexe A informative: Etude de l'établissement d'un montage de mesure qui était basé sur l'Article 5.
- c) Une nouvelle Annexe B informative: Méthode d'essai pour la détermination quantitative des comportements de réponse directs d'un dispositif coaxial de protection contre les surtensions.

Le texte de la présente Norme est issu des documents suivants:

| FDIS         | Rapport de vote |
|--------------|-----------------|
| 77C/245/FDIS | 77C/250/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/IEC, Partie 2.

Une liste de toutes les parties de la série IEC 61000, publiées sous le titre général *Compatibilité électromagnétique (CEM)*, peut être consultée sur le site web de l'IEC.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC 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.

**IMPORTANT – Le logo "colour inside" qui se trouve sur la page de couverture de cette publication indique qu'elle contient des couleurs qui sont considérées comme utiles à une bonne compréhension de son contenu. Les utilisateurs devraient, par conséquent, imprimer cette publication en utilisant une imprimante couleur.**

## INTRODUCTION

La présente Norme fait partie de la série de normes IEC 61000, conformément à la structure suivante:

### Partie 1: Généralités

Considérations générales (introduction, principes fondamentaux)

Définitions, terminologie

### Partie 2: Environnement

Description de l'environnement

Classification de l'environnement

Niveaux de compatibilité

### Partie 3: Limites

Limites d'émission

Limites d'immunité

### Partie 4: Techniques d'essai et de mesure

Techniques de mesure

Techniques d'essai

### Partie 5: Guide d'installation et d'atténuation

Guide d'installation

Méthodes et dispositifs d'atténuation

### Partie 6: Normes génériques

### Partie 9: Divers

Chaque partie est à son tour subdivisée en plusieurs parties, publiées soit comme normes internationales, soit comme spécifications techniques ou rapports techniques, dont certaines ont déjà été publiées en tant que sections. D'autres seront publiées avec le numéro de la partie suivi d'un tiret et d'un second chiffre identifiant la subdivision (exemple: IEC 61000-6-1).

L'IEC a lancé la préparation de méthodes normalisées de protection de la population civile contre les effets des environnements électromagnétiques haute puissance (HPEM). Ces effets peuvent entraîner la rupture de réseaux de communication, de réseaux d'alimentation électrique et de systèmes informatiques, etc.

La présente partie de l'IEC 61000 est une Norme internationale établissant les procédures d'essai exigées pour les dispositifs de protection pour perturbations conduites IEMN-HA, tels que les tubes à décharge, les varistances, les parafoudres à deux accès et les filtres combinés IEMN-HA.

L'utilisation de la présente Norme est cependant indépendante des autres parties et sections de l'IEC 61000, excepté pour les normes spécifiquement nommées en référence.

## COMPATIBILITÉ ÉLECTROMAGNÉTIQUE (CEM) –

### Partie 4-24: Techniques d'essai et de mesure – Méthodes d'essai pour les dispositifs de protection pour perturbations conduites IEMN-HA

#### 1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 61000 définit les méthodes d'essai concernant les dispositifs de protection IEMN-HA contre les perturbations conduites. Elle inclut les éléments à deux bornes, tels que les tubes à décharge, varistances et les parafoudres à deux accès, tels que les filtres combinés IEMN-HA. Elle couvre les essais de caractéristiques de tension de claquage et de limitation de la tension résiduelle incluant les méthodes de mesure de tension résiduelle et/ou de courant résiduel, de la valeur de crête du temps de montée et de l'action racine dans le cas de variations très rapides de tension et de courant en fonction du temps.

La présente Norme ne couvre pas les méthodes de mesure de l'affaiblissement d'insertion.

#### 2 Références normatives

Les documents suivants sont cités en référence de manière normative, en intégralité ou en partie, dans le présent document et sont indispensables pour son application. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

IEC 61000-2-10, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 2-10: Environnement – Description de l'environnement IEMN-HA – Perturbations conduites*

#### 3 Termes, définitions et abréviations

Pour les besoins du présent document, les termes, définitions et abréviations suivants s'appliquent.

##### 3.1 Termes et définitions

###### 3.1.1

###### **dispositif en traversée**

dispositif à deux accès, conçu pour envoyer un signal à travers une barrière électromagnétique (blindage)

Note 1 à l'article: Il est généralement en bon contact électrique avec la barrière et possède un accès de chaque côté de cette dernière, maintenant ainsi son isolation.

###### 3.1.2

###### **tube à décharge**

dispositif comprenant deux ou trois électrodes métalliques hermétiquement protégées de façon à contrôler le mélange de gaz et sa pression et destiné à protéger un appareil ou le personnel contre des tensions transitoires élevées

###### 3.1.3

###### **IEMN-HA**

###### **impulsion électromagnétique à haute altitude**

impulsion électromagnétique produite par une explosion nucléaire en dehors de l'atmosphère de la Terre

Note 1 à l'article: Généralement à une altitude de plus de 30 km.

[SOURCE: IEC 61000-1-3:2002, 3.10]

### 3.1.4

#### **filtre combiné IEMN-HA**

filtre combiné à des dispositifs de limitation de la tension, de sorte que cette combinaison puisse atténuer l'impulsion de courant résiduel passant à travers

### 3.1.5

#### **normes**

grandeurs scalaires symbolisant les caractéristiques d'une forme d'onde

Note 1 à l'article: Les normes sont utilisées pour représenter les caractéristiques d'une forme d'onde associée à des mécanismes de susceptibilité.

### 3.1.6

#### **valeur de crête du temps de montée**

valeur absolue maximale de la première dérivée d'une forme d'onde de courant  $I(t)$  par rapport au temps,  $dI/dt$ , exprimée en unités d'ampère par seconde

### 3.1.7

#### **PCI**

#### **injection de courant par impulsion**

méthode d'essai permettant de mesurer les performances d'un dispositif de protection

Note 1 à l'article: Un courant transitoire IEMN-HA lié à une menace est injecté à l'entrée du dispositif de protection et la contrainte transitoire résiduelle est mesurée à la sortie.

Note 2 à l'article: L'abréviation "PCI" est dérivée du terme anglais développé correspondant "pulsed current injection".

### 3.1.8

#### **courant de crête**

valeur absolue maximale d'une forme d'onde de courant,  $I(t)$ , exprimée en unités d'ampère

### 3.1.9

#### **élément de protection primaire**

premier élément de protection, vu du côté non protégé de la protection, qui écoule la plus grande partie du courant transitoire

### 3.1.10

#### **côté protégé**

côté de la protection où se situe l'équipement devant être protégé

### 3.1.11

#### **dispositif de protection**

composant électrique tel qu'un filtre, un tube à décharge, une varistance à oxyde métallique (ou autre), assurant la protection contre des perturbations conduites, ou un blindage, un joint, un piège de guide d'onde (ou autre), assurant la protection contre des perturbations rayonnées, utilisé pour limiter toute contrainte conduite ou rayonnée. Un tel élément ou une combinaison de plusieurs de ces éléments fait donc partie de la barrière EM conceptuelle d'un système

[SOURCE: IEC 61000-5-5:1996, 3.20]

### 3.1.12

#### **action racine**

norme d'une forme d'onde de courant  $I(t)$  définie par l'équation

$$\sqrt{\int_0^{\infty} |I(t)|^2 dt}$$

Note 1 à l'article: Lorsque l'impédance de charge est connue, l'énergie en W/s ou J peut être calculée.

### 3.1.13

#### SPD

#### dispositif de protection contre les surtensions

dispositif conçu pour limiter les surtensions transitoires et évacuer les courants de choc. Il contient au moins un composant non linéaire conçu pour limiter les surtensions et évacuer les courants de choc.

Note 1 à l'article: L'abréviation "SPD" est dérivée du terme anglais développé correspondant "surge protective device".

[SOURCE: Cette source n'existe que dans la langue anglaise]

### 3.1.14

#### SPD à deux accès

SPD qui est non seulement un dispositif de shuntage mais qui comprend un accès d'entrée séparé du côté non protégé et un accès de sortie du côté protégé.

Note 1 à l'article: En général, les SPD à deux accès sont des "boîtes noires" avec des dispositifs de shuntage non linéaires à la masse et un circuit entre les accès d'entrée et de sortie.

### 3.1.15

#### éléments à deux bornes

élément électrique où un courant entre dans une borne et sort par une deuxième borne.

Note 1 à l'article: Un élément à deux bornes est un dispositif à un accès. En général, les SPD à deux bornes sont des dispositifs de shuntage à la masse.

### 3.1.16

#### côté non protégé

côté de la protection où est susceptible de se produire un phénomène de surtension.

### 3.1.17

#### norme de forme d'onde

paramètre déterminé à partir d'une opération mathématique bien définie sur une forme d'onde ou un signal (tel qu'une intégration de la forme d'onde), qui génère un nombre scalaire permettant une comparaison de différentes formes d'onde ou de leurs effets.

[SOURCE: IEC 61000-4-33:2005, 3.10]

## 3.2 Abréviations

| Abréviation | Français            | Anglais           |
|-------------|---------------------|-------------------|
| DUT         | Dispositif en essai | Device under test |

## 4 Méthodes d'essai des dispositifs de protection (à l'exception d'un filtre) pour perturbations conduites

### 4.1 Généralités

Le comportement réel d'un dispositif de protection dans un environnement IEMN-HA dépend largement de la façon dont il est intégré dans son lieu d'utilisation et d'autres circonstances concomitantes (par exemple: la qualité du blindage entre le côté protégé et le côté non protégé de l'élément de protection). Les méthodes d'essai suivantes tiennent compte de ce

qui précède. Elles sont définies de sorte que les résultats soient autant que possible liés aux caractéristiques du dispositif en essai (DUT). La configuration d'essai diffère peu de la configuration de protection réelle.

NOTE L'Article 4 est destiné à s'appliquer à un dispositif de protection tel que des tubes à décharge, des varistances et des parafoudres à deux accès, à l'exception du filtre combiné IEMN-HA. Pour un filtre combiné IEMN-HA, l'Article 5 s'applique.

## 4.2 Montage d'essai

Le montage d'essai comprend un générateur d'impulsions (G), une ligne d'émission, le dispositif/support du DUT, et la charge avec la ligne associée et l'oscilloscope (voir Figure 1). Différentes impédances de source peuvent être utilisées, mais l'exemple présenté à la Figure 1 utilise  $50\ \Omega$ . D'autres valeurs peuvent être spécifiées.

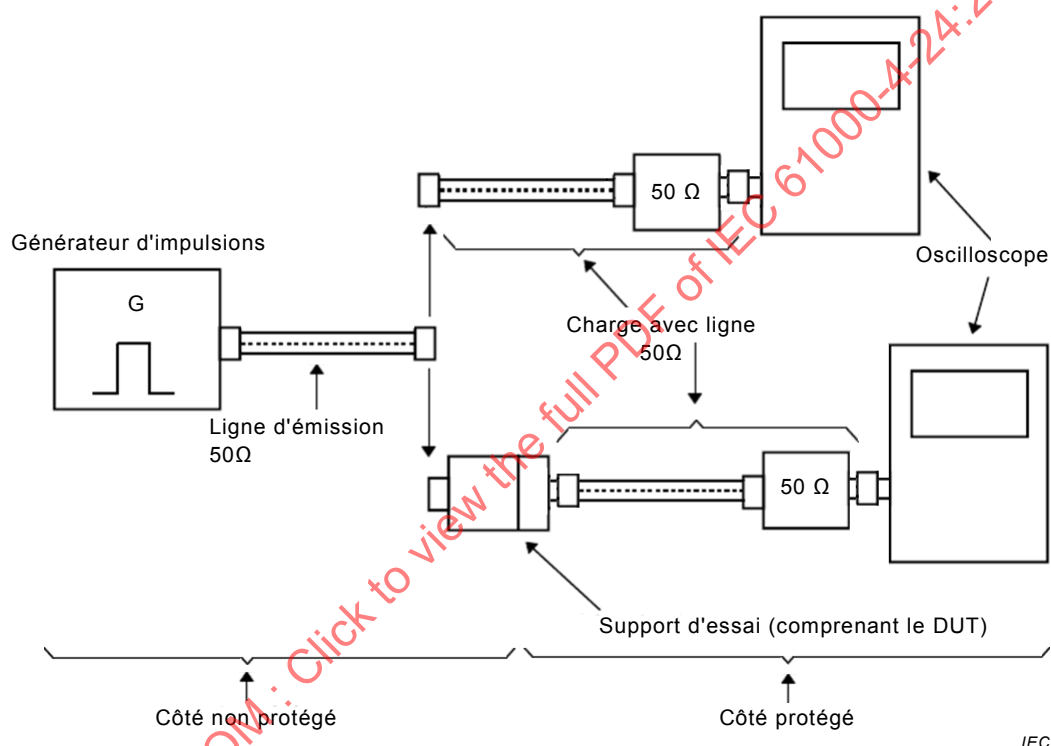


Figure 1 – Montage d'essai pour dispositifs de protection

Afin d'éviter les phénomènes de couplage parasites entre le générateur d'impulsions et l'oscilloscope, les côtés non protégé et protégé du montage doivent être complètement isolés par un blindage. Il est recommandé d'utiliser des câbles multitresses ou à blindage continu. Le câble et les connecteurs doivent être capables de résister à l'impulsion haute tension sans aucune défaillance. Les boucles de masse doivent être évitées.

## 4.3 Générateur d'impulsions

Le générateur d'impulsions doit fournir une impulsion de tension rectangulaire dans une charge adaptée. La tension de sortie (sur une charge adaptée) doit être réglable jusqu'à une tension double de la tension de limitation du DUT prévue. Les deux polarités doivent être possibles. Les caractéristiques d'un générateur d'impulsions sont les suivantes:

- impédance caractéristique:  $50\ \Omega$  ou autre valeur
- front d'ondes à impulsion,  $du/dt$ : au moins  $1\ \text{kV/ns}$
- durée des impulsions: au moins  $20\ \text{ns}$

#### 4.4 Ligne d'émission

La ligne d'émission se compose d'un câble coaxial dont l'impédance caractéristique est de  $50 \Omega$ . Le câble entre le générateur d'impulsions et le DUT doit être suffisamment long pour que les réflexions en provenance du DUT ne reviennent pas au générateur d'impulsions durant le front de l'impulsion. Le temps de propagation unidirectionnelle dans le câble doit dépasser la moitié de la durée totale du temps du front de l'impulsion. Étant donné que l'atténuation du câble est liée à la fréquence, la pente du front de l'impulsion peut, en prolongeant la ligne d'émission, être diminuée et donc adaptée à la valeur désirée.

#### 4.5 Dispositifs/soutiens d'essai

##### 4.5.1 Généralités

Les dispositifs/soutiens d'essai utilisés sont mécaniques; ils sont équipés de connecteurs coaxiaux prévus à la fois pour la borne non protégée et pour la borne protégée. Leur mission doit être de maintenir le DUT en place. Deux types différents peuvent être utilisés: les dispositifs de type A et les dispositifs de type B.

##### 4.5.2 Dispositifs de type A

Des tubes à décharge destinés à la protection d'applications coaxiales à haute fréquence peuvent être soumis à essai en utilisant des supports correspondants disponibles dans le commerce. Le dispositif de protection s'insère entre le conducteur interne et le conducteur externe du montage coaxial en produisant un minimum d'influence sur l'impédance caractéristique. Les mesures effectuées avec ces supports donnent des résultats d'une bonne reproductibilité et permettent de mesurer les paramètres intrinsèques du dispositif.

##### 4.5.3 Dispositifs de type B

###### 4.5.3.1 Généralités

Les dispositifs de type B sont universels et sont en principe utilisables pour tous les types de protections à deux bornes ou deux accès, qu'ils soient destinés ou non à être montés en traversée. Dans tous les cas, les mesures effectuées sur des dispositifs de basse tension tels que les diodes et les varistances peuvent être fortement influencées par des dépassements d'inductifs dus à un  $dI/dt$  élevé.

NOTE En prenant des dispositions particulières pour maintenir les longueurs des supports d'essai les plus courtes possible, le risque d'influence inductive peut être réduit.

Le support se compose de trois parties: le boîtier non protégé, le blindage de séparation et le boîtier protégé (voir Figure 2).

###### 4.5.3.2 Boîtier non protégé

Ses dimensions et la taille de sa section peuvent être adaptées aux dimensions du DUT. Le boîtier peut être divisé en deux parties suivant le plan axial afin de faciliter l'accès aux points de soudure. Sauf spécification contraire, la longueur du câble reliant le connecteur non protégé ( $P_1$ ) au contact d'entrée du DUT ( $P_2$ ) ne doit pas dépasser la longueur du chemin suivi par le courant dans le DUT entre les points  $P_2$  et le contact de mise à la terre du DUT ( $P_3$ ).

###### 4.5.3.3 Blindage de séparation

Les dispositifs de protection en traversée doivent être insérés dans le blindage de séparation suivant la même procédure que celle utilisée dans la pratique.

Les dispositifs non montés en traversée doivent être passés à travers une cloison du blindage de séparation comme le montrent les Figures 2a) et 2b). Le câble passant à travers le blindage de séparation doit être isolé. Aucun condensateur ni aucun autre composant de

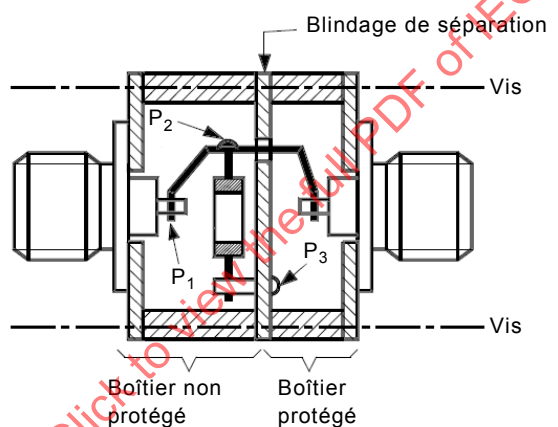
traversée ne doivent être utilisés. Un DUT ne comportant pas de traversée peut être installé près du blindage, mais ne doit pas entrer en contact avec ce dernier, sauf s'il doit dans la pratique être installé sur une paroi métallique (comme le montre la Figure 2c)).

#### 4.5.3.4 Boîtier protégé

Le boîtier protégé sert de transition jusqu'au connecteur protégé. Il doit être aussi court que possible. La longueur de la connexion entre le point  $P_2$  et le connecteur protégé doit être aussi courte que possible.

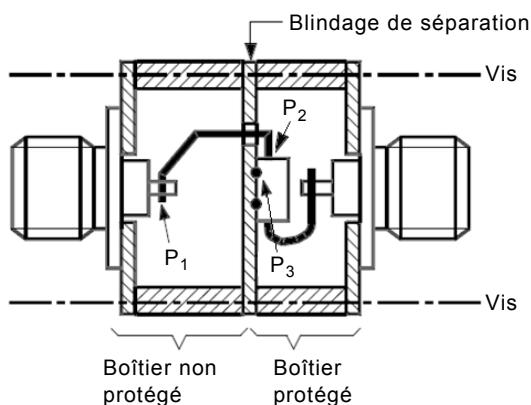
#### 4.6 Charge

La charge doit être adaptée à l'impédance caractéristique du montage d'essai à la bande passante de l'oscilloscope, à 3 dB près. Elle doit être du type traversée et suivie d'une sonde d'oscilloscope à haute impédance jouant le rôle de diviseur de tension, ou faire partie du premier étage d'un affaiblisseur situé devant l'oscilloscope. La ligne située entre le dispositif d'essai et la charge doit présenter la même impédance que la charge. Elle doit être aussi courte que possible. Son atténuation doit être inférieure à 0,5 dB à la fréquence supérieure de coupure à 3 dB de l'oscilloscope. Vérifier que la charge résiste aux impulsions d'essai sans subir de dommage.



IEC

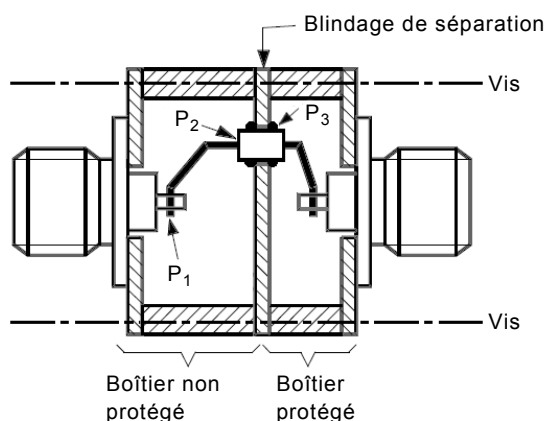
a) Exemple de dispositif/support d'essai de type B comportant un DUT à deux bornes au sein d'une configuration sans traversée



IEC

Le DUT peut alternativement être placé dans le boîtier non protégé.

b) Exemple de dispositif/support d'essai de type B comportant un DUT à deux accès au sein d'une configuration sans traversée



c) Exemple de dispositif/support d'essai comportant un DUT au sein d'une configuration avec traversée

Figure 2 – Exemple d'un dispositif/support d'essai de type B (universel)

#### 4.7 Oscilloscope

La largeur de bande de l'oscilloscope et des autres composants du montage d'essai doit être suffisante pour que la tolérance globale des valeurs crêtes de  $u$  et de  $duldt$  dues aux limitations de la largeur de bande et à d'autres types d'erreurs soit limitée à  $\pm 20\%$ .

#### 4.8 Procédure d'essai

##### 4.8.1 Réglage du générateur d'impulsions

La ligne d'émission est d'abord reliée directement à la ligne connectée à la charge (voir Figure 1).

Le générateur d'impulsions est réglé comme suit:

- si le DUT ou l'élément de protection primaire d'un DUT à quatre bornes est un tube à décharge, la pente du front avant de l'impulsion recherchée doit être d'au moins 1 kV/ns à la tension disruptive du tube à décharge lors de l'essai;
- si le DUT ou l'élément de protection primaire d'un DUT à quatre bornes est un dispositif de limitation de tension (c'est-à-dire une diode ou une varistance), la plus grande valeur de pente de la tangente du front avant de l'impulsion est telle que décrite dans

$$duldt = (1/2) \times Z_c \times dildt \quad (1)$$

où  $Z_c$  désigne l'impédance caractéristique et  $dildt$  la valeur indiquée.

NOTE La valeur indiquée  $dildt$  correspond à la valeur réelle  $dildt$  dans le DUT pendant l'essai. Le DUT ayant une très faible impédance par rapport à 50  $\Omega$  ou à l'impédance spécifiée, le courant  $i$  et donc aussi le  $dildt$  sont doublés durant l'essai.

##### 4.8.2 Procédures de vérification

La ligne d'émission est alors reliée au dispositif d'essai (voir Figure 1).

Si un dispositif d'essai de type B est utilisé, les caractéristiques de transmission de la connexion interne entre le connecteur protégé et le connecteur non protégé doivent être soumises à essai.

Pour cela, le DUT est enlevé et l'impulsion utilisée en 4.8.1 (réglage du générateur d'impulsions) est employée. La sortie mesurée ne doit pas varier de la sortie mesurée en 4.8.1 de plus de 10 %. Si elle diffère de plus de 10 %, il convient d'augmenter le diamètre du fil de connexion (une plus grande capacité par rapport à la masse diminuera l'impédance caractéristique et améliorera l'adaptation entre le générateur d'impulsions et la charge).

Pour être sûr qu'il n'existe aucun couplage indésirable entre le côté non protégé et le côté protégé du montage d'essai, des essais de vérification doivent être effectués avec les modifications du montage d'essai suivantes:

Si le DUT est un élément à deux bornes, il doit être remplacé par un court-circuit de la même longueur et de la même forme que le DUT. La connexion entre  $P_2$  et la broche centrale du connecteur protégé (voir Figure 2) doit être retirée. Un essai doit être effectué avec la broche interne du connecteur protégé "à l'air" et un autre essai doit être effectué avec cette broche réunie à la masse (au sein du boîtier protégé).

Si le DUT est un dispositif en traversée, il doit être remplacé par un dispositif de mêmes dimensions (DUT fictif) réalisé entièrement dans un métal qui soit un bon conducteur et représentant ainsi un court-circuit idéal. La broche centrale du connecteur protégé doit être réunie à la broche de sortie du DUT fictif.

La tension de crête résiduelle mesurée dans ces conditions doit être inférieure à 5 % de la tension de crête mesurée lors de l'essai final.

#### 4.8.3 Essai

Le DUT fictif est remplacé par le DUT et la tension résiduelle est mesurée puis comparée aux critères de vérification.

#### 4.8.4 Dernier examen du DUT

À l'issue de l'essai, le DUT doit être examiné en vue de détecter des dommages visibles. Si des dommages visibles sont observés, le DUT est alors considéré comme ayant échoué à l'essai. En cas d'absence de dommage visible, un essai fonctionnel doit être réalisé pour vérifier que le DUT se trouve dans sa spécification.

### 4.9 Référence à la présente Norme

Toute référence à la présente Norme doit mentionner les indications suivantes:

Procédure normalisée:

- |                                                                    |                                                                                                    |
|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| – pour tubes à décharge:                                           | type de dispositif d'essai utilisé (4.5)                                                           |
| – pour la mesure sur des éléments à deux bornes dans dispositif B: | longueur des câbles de connexion, voir longueur globale du DUT entre les points de soudure (4.5.3) |

Modifications par rapport à la procédure normalisée:

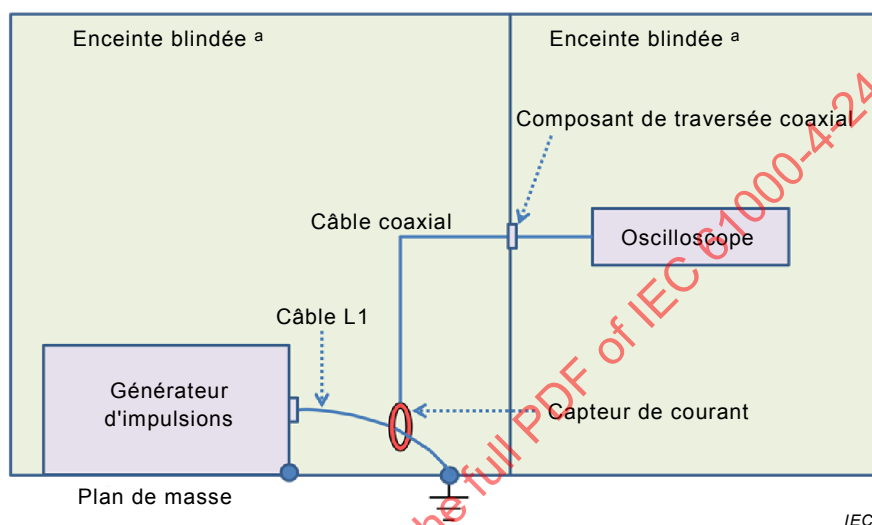
- |                                   |                                                                                                                      |
|-----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| – impédance caractéristique:      | si elle est différente de $50 \Omega$ (4.2)                                                                          |
| – pente de l'impulsion, $du/dt$ : | si elle est supérieure à 1 kV/ns (4.3)                                                                               |
| – valeur réelle $di/dt$ :         | si elle est supérieure à 40 A/ns (4.8.1)                                                                             |
| – modification du DUT:            | si les câbles de connexion des tubes à décharge sont altérés pour effectuer des mesures dans un dispositif de type A |

- composants supplémentaires du DUT ex.: composants de circuit supplémentaires; différentes longueurs de câbles par rapport à celles spécifiées.

## 5 Méthode de mesure pour les filtres combinés IEMN-HA

### 5.1 Montage de vérification

La sortie du générateur d'impulsions doit être vérifiée avant d'appliquer une impulsion à un DUT. Le montage de vérification type du niveau d'essai d'impulsion est représenté à la Figure 3.



<sup>a</sup> L'une des deux enceintes doit au moins être blindée. Il convient de veiller à minimiser les interférences rayonnées et conduites.

**Figure 3 – Montage type de vérification du niveau d'essai d'impulsion**

Le générateur d'impulsions doit être connecté au plan de masse. Le câble de sortie L1 doit également être connecté au plan de masse afin de mesurer le courant d'impulsion de court-circuit. La longueur et la géométrie du câble L1 doivent être choisies afin de réduire l'inductance et doivent être identiques lorsque le DUT est connecté (voir Annexe A). Il convient que l'isolation du câble à la terre soit suffisante afin d'éviter une défaillance pour toutes les tensions d'impulsion.

Si la taille ou le montage du DUT exige un long câble L1, alors le câble peut être coaxial afin d'atteindre le temps de montée des impulsions exigé au niveau du DUT. Si le câble choisi est coaxial, il convient que le blindage soit réduit, et le conducteur intérieur doit être exposé et relié à la terre. La sonde de courant doit être placée autour du conducteur intérieur exposé. Un shunt de dérivation coaxial peut également être utilisé.

La position du capteur de courant doit se situer dans les 0,15 m du raccordement à la masse. Des précautions doivent être prises pour isoler électriquement le corps du capteur de courant des surfaces métalliques afin d'éviter des boucles de masse.

### 5.2 Montage de mesure

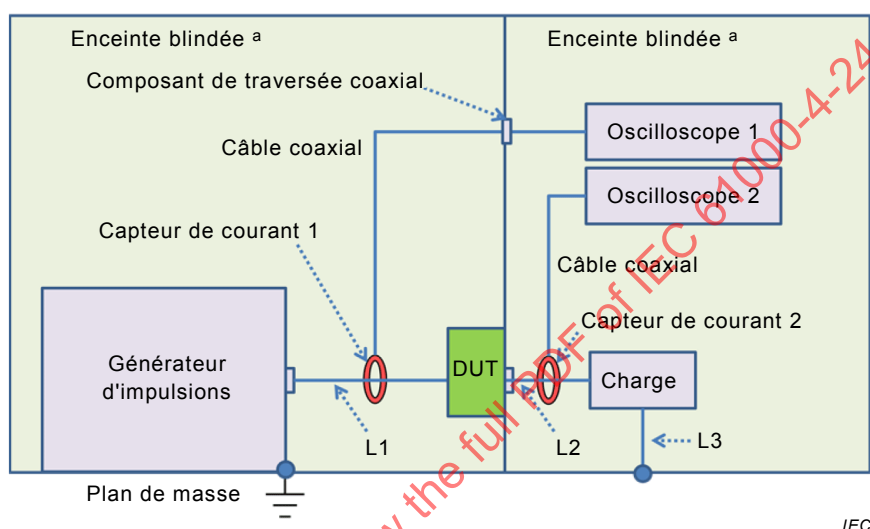
Deux montages de mesure types sont représentés à la Figure 4 et à la Figure 5. La sortie du générateur d'impulsions doit être directement connectée à la borne d'entrée du DUT grâce au même câble utilisé pour la vérification.

Le capteur de courant 1 et l'oscilloscope 1 peuvent être utilisés en option pour surveiller le courant injecté dans le DUT.

Le capteur de courant 2 utilisé pour mesurer le courant résiduel dans la charge fictive doit de préférence se situer à 0,15 m de la borne de sortie du DUT. Un shunt de mesure relié à la terre peut également être utilisé en série avec l'impédance de charge. La charge doit être une résistance fictive telle que décrite en 5.3.4.

Les câbles L2 et L3 doivent être aussi courts que possible.

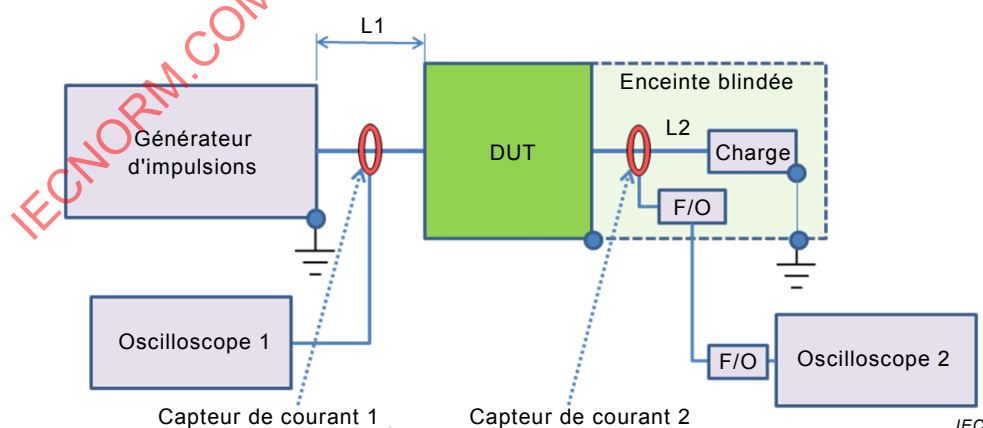
Il peut être nécessaire de blinder l'instrument de mesure et d'isoler l'alimentation afin d'éviter des interférences dues à des boucles de masse.



Si une sonde de tension est utilisée, il convient de la connecter grâce à la résistance de charge.

<sup>a</sup> L'une des deux enceintes doit au moins être blindée. Il convient de veiller à minimiser les interférences rayonnées et conduites.

**Figure 4 – Exemple de montage d'essai à l'aide d'une ou de deux enceintes blindées**



F/O désigne un convertisseur à fibre optique. Des liaisons à fibre peuvent être utilisées en option afin de produire un degré d'isolation de sorte que le générateur d'impulsions et les oscilloscopes puissent être séparés physiquement afin de réduire les interférences.

Si le générateur d'impulsions et le câble d'injection L1 ne sont pas blindés, il convient alors de placer les oscilloscopes 1 et 2 dans une enceinte blindée afin d'éviter tout captage. Il convient de veiller à minimiser les interférences rayonnées et conduites.

**Figure 5 – Exemple de montage d'essai à l'aide d'une enceinte blindée**

### 5.3 Appareil de mesure

#### 5.3.1 Générateurs d'impulsions

Le courant de court-circuit est défini comme un courant guidé à travers un court-circuit connecté à la sortie du générateur. L'impédance de source est définie comme la tension de crête en circuit ouvert du générateur divisée par la valeur de crête du courant de court-circuit. La tolérance est de  $\pm 10\%$ .

Les exigences de l'essai d'impulsion peuvent être choisies dans le Tableau 1 et le Tableau 2, pour l'IEMN-HA initiale et l'IEMN-HA intermédiaire respectivement.

**Tableau 1 – Vue d'ensemble des exigences d'essai IEMN-HA initiale conduite (CEP) définies dans d'autres spécifications**

| Type                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Temps de montée | FWHM <sup>a</sup>    | Impédance de source <sup>b</sup> | Courant de court-circuit de crête | Spécifications                                                                                                                  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|----------------------|----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CEP <sub>1</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | < 10 ns         | 100 ns<br>$\pm 30\%$ | 400 $\Omega$<br>$\pm 15\%$       | 4 000 A<br>$\pm 10\%$             | IEC 61000-2-10, sévérité de 99 % pour le conducteur élevé, pour une longueur de câble supérieure à 200 m                        |
| CEP <sub>2</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | < 10 ns         | 100 ns<br>$\pm 30\%$ | 400 $\Omega$<br>$\pm 15\%$       | 1 500 A<br>$\pm 10\%$             | IEC 61000-2-10, sévérité de 90 % pour le conducteur élevé, pour une longueur de câble supérieure à 200 m                        |
| CEP <sub>3</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | < 10 ns         | 100 ns<br>$\pm 30\%$ | 400 $\Omega$<br>$\pm 15\%$       | 500 A<br>$\pm 10\%$               | IEC 61000-2-10, sévérité de 50 % pour le conducteur élevé, pour une longueur de câble supérieure à 200 m                        |
| CEP <sub>4</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | < 25 ns         | 500 ns<br>$\pm 30\%$ | 50 $\Omega$<br>$\pm 5\%$         | 400 A<br>$\pm 10\%$               | IEC 61000-2-10, pour un conducteur enterré dans le sol conductivité de $10^{-4}$ , pour une longueur de câble supérieure à 10 m |
| CEP <sub>5</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | $\leq 20$ ns    | 500 ns<br>$+10\%$    | $\geq 60\ \Omega$                | 2 500 A<br>$\pm 10\%$             | Selon [1] <sup>1</sup> , fil au sol                                                                                             |
| CEP <sub>6</sub>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | $\leq 20$ ns    | 500 ns<br>$+10\%$    | $\geq 60\ \Omega$                | 5 000 A<br>$\pm 10\%$             | Selon [1], mode commun, dans des conditions de l'installation réelle uniquement                                                 |
| <sup>a</sup> FWHM (en anglais, <i>full-width at half-maximum</i> ) est un acronyme signifiant largeur totale à mi-hauteur du maximum (amplitude).<br><sup>b</sup> Dans tous les cas, et pour des raisons pratiques, une impédance de source inférieure peut être utilisée. Cependant, il convient que l'impédance de source ne soit pas inférieure à 10 $\Omega$ afin de garantir que la tension d'impulsion appliquée soit supérieure à la tension de claquage des composants non linéaires du DUT. |                 |                      |                                  |                                   |                                                                                                                                 |

<sup>1</sup> Les chiffres entre crochets se réfèrent à la Bibliographie.

**Tableau 2 – Vue d'ensemble des exigences d'essai IEMN-HA intermédiaire conduite (CIP) définies dans d'autres spécifications**

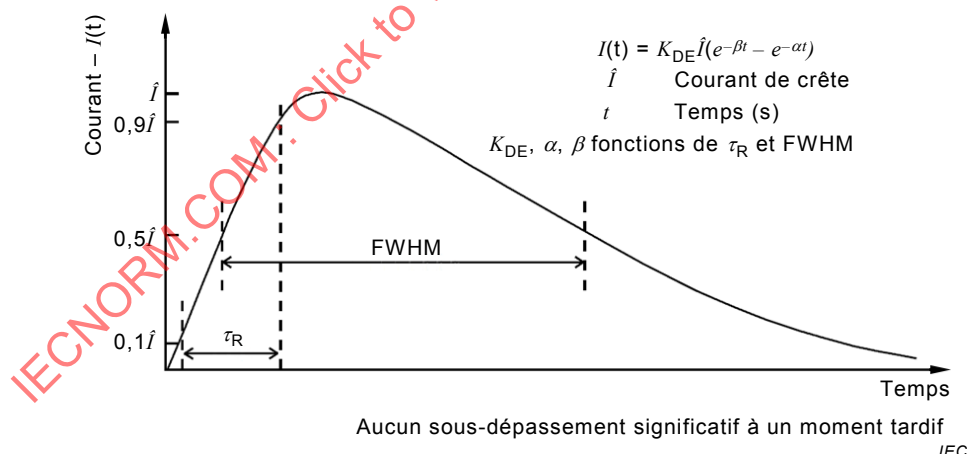
| Type             | Temps de montée | FWHM <sup>a</sup>      | Impédance de source <sup>b</sup> | Courant de court-circuit de crête | Spécifications <sup>c</sup>                                                                          |
|------------------|-----------------|------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CEP <sub>1</sub> | 25 µs<br>±30 %  | 1 500 µs<br>±30 %      | 400 Ω<br>±15 Ω                   | 600 A<br>±10 %                    | IEC 61000-2-10, pour conducteurs élevés, pour des longueurs de câble supérieures à 1 km              |
| CEP <sub>2</sub> | 25 µs<br>±30 %  | 1 500 µs<br>±30 %      | 400 Ω<br>±15 Ω                   | 75 A<br>±10 %                     | IEC 61000-2-10, pour conducteurs élevés, pour des longueurs de câble comprises entre 200 m et 1 km   |
| CEP <sub>3</sub> | 25 µs<br>±30 %  | 1 500 µs<br>±30 %      | 50 Ω<br>±5 Ω                     | 450 A<br>±10 %                    | IEC 61000-2-10, pour conducteurs enterrés, pour des longueurs de câble supérieures à 1 km            |
| CEP <sub>4</sub> | 25 µs<br>±30 %  | 1 500 µs<br>±30 %      | 50 Ω<br>±5 Ω                     | 50 A<br>±10 %                     | IEC 61000-2-10, pour conducteurs enterrés, pour des longueurs de câble comprises entre 200 m et 1 km |
| CEP <sub>5</sub> | ≤ 1,5 µs        | 3 000 µs à<br>5 000 µs | ≥ 10 Ω                           | 250 A<br>±10 %                    | Selon [1], pour des longueurs de câble supérieures à 200 m                                           |

<sup>a</sup> FWHM (en anglais, *full-width at half-maximum*) est un acronyme signifiant largeur totale à mi-hauteur du maximum (amplitude).

<sup>b</sup> Dans tous les cas, et pour des raisons pratiques, une impédance de source inférieure peut être utilisée. Cependant, il convient que l'impédance de source ne soit pas inférieure à 10 Ω afin de garantir que la tension d'impulsion appliquée soit supérieure à la tension de claquage des composants non linéaires du DUT.

<sup>c</sup> Aucun essai n'est exigé dans le cas de longueurs de ligne inférieures à 200 m.

Le courant de court-circuit du générateur d'impulsions présente une forme d'onde biexponentielle (voir Figure 6).



**Figure 6 – Forme d'onde biexponentielle**

### 5.3.2 Oscilloscope

La bande passante de l'oscilloscope doit être suffisamment large pour résoudre le temps de montée le plus rapide (< 10 ns, courant continu à > 100 MHz pour l'IEMN-HA initiale et courant continu à > 1 MHz pour l'IEMN-HA intermédiaire) et doit présenter une sensibilité minimale comme exigé pour la sensibilité de mesure. L'impédance d'entrée exigée de l'amplificateur dépend du type de tension ou de la sonde de courant et doit être choisie en conséquence (généralement 50 Ω ou 1 MΩ).

### 5.3.3 Capteurs de courant

Il convient que la bande passante de mesure des capteurs de courant couvre la plage de fréquences de 100 kHz à 100 MHz pour l'IEMN-HA initiale et courant continu à 1 MHz pour l'impulsion intermédiaire. La plage de mesure totale en combinaison avec la plage de l'amplificateur vertical du domaine d'application doit se situer entre 0 A et 5 000 A pour l'IEMN-HA initiale et entre 0 A et 250 A pour l'IEMN-HA intermédiaire. Pour la mesure des courants à la terre, un shunt de dérivation résistif peut générer les résultats les plus précis.

### 5.3.4 Charges d'essai

Durant tous les essais, une charge d'essai du DUT conformément au mode d'essai et une configuration de câblage DUT telle que définie au Tableau 3 doivent être utilisées. Sauf indication contraire, la tolérance de la charge d'essai doit être de  $\pm 10\%$ .

## 5.4 Modes d'essai exigés

Les modes d'essai peuvent être choisis dans la liste suivante, selon l'application du DUT. Au minimum, le ou les modes de charge nominale doivent être réalisés.

- ETM1: IEMN-HA initiale / circuit ouvert
- ETM2: IEMN-HA initiale / charge nominale
- ETM3: IEMN-HA initiale / court-circuit
- ITM1: IEMN-HA intermédiaire / circuit ouvert
- ITM2: IEMN-HA intermédiaire / charge nominale
- ITM3: IEMN-HA intermédiaire / court-circuit

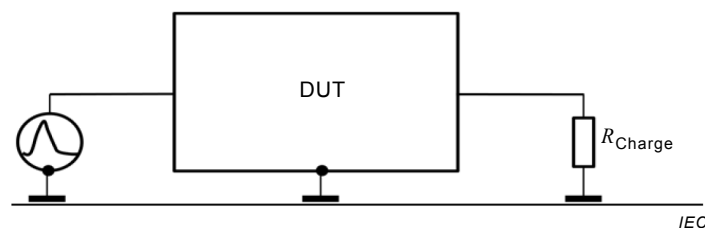
NOTE Les impulsions d'essai peuvent être choisies dans le Tableau 1 et le Tableau 2.

Les mesures sur circuit ouvert étant difficiles, une charge  $\geq 1\text{ M}\Omega$  peut constituer un bon choix, puisque les sondes de tension types des oscilloscopes présentent une impédance d'entrée  $\geq 1\text{ M}\Omega$ .

Le Tableau 3 présente les modes d'essai exigés pour différents types de DUT. Les impédances de charge de raccordement du DUT pour l'IEMN-HA initiale doivent être choisies conformément au Tableau 3.

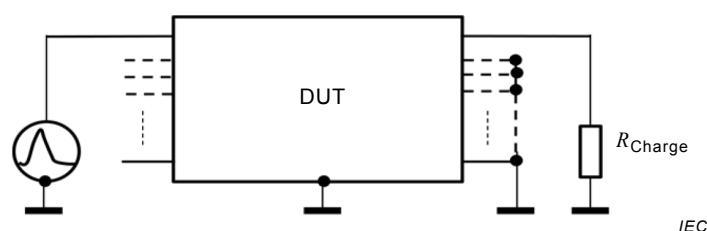
Les configurations de câblage du DUT (WS) sont les suivantes:

- WS1: DUT à ligne unique ou lignes uniques multiples (voir Figure 7)



**Figure 7 – Exemple de montage de câblage d'un DUT à lignes uniques**

- WS2: Un exemple de montage de câblage pour un DUT couplé mutuellement ou multiligne symétrique (voir Figure 8)



**Figure 8 – Exemple de montage de câblage d'un DUT multiligne couplé mutuellement**

WS2 est un exemple de montage de câblage pouvant être utilisé pour un DUT multiligne comportant des lignes, qui sont couplées entre elles de façon électrique ou magnétique (par exemple par des bobines d'inductance à courant compensé ou s'il existe des composants avec protection en mode dérivé). Une ligne à la fois est soumise à essai tandis que la seconde et toutes les autres (lignes pointillées) sont connectées ensemble côté sortie et mises à la terre. Il convient que les lignes non soumises à essai restent ouvertes côté entrée afin d'éviter des problèmes de couplage mutuel.

Ce montage est optionnel et d'autres peuvent être plus applicables selon le circuit du DUT.

**Tableau 3 – Mode d'essai et montage de câblage du DUT**

| Application du DUT                                                 | Modes d'essai exigés | Montage de câblage     | Charge du DUT, $R_{\text{Charge}}$          |
|--------------------------------------------------------------------|----------------------|------------------------|---------------------------------------------|
| Ligne d'alimentation en courant alternatif/courant continu         | ETM1                 | WS 1/WS 2 <sup>a</sup> | Circuit ouvert ( $\geq 1 \text{ M}\Omega$ ) |
|                                                                    | ETM2                 | WS 1/WS 2 <sup>a</sup> | $2 \Omega$                                  |
|                                                                    | ETM3                 | WS 1/WS 2 <sup>a</sup> | Court-circuit ( $< 50 \text{ m}\Omega$ )    |
|                                                                    | ITM1                 | WS 1/WS 2 <sup>a</sup> | Circuit ouvert ( $\geq 1 \text{ M}\Omega$ ) |
|                                                                    | ITM2                 | WS 1/WS 2 <sup>a</sup> | $50 \Omega$                                 |
|                                                                    | ITM3                 | WS 1/WS 2 <sup>a</sup> | Court-circuit ( $< 50 \text{ m}\Omega$ )    |
| Ligne de données symétrique (Ethernet, etc.)                       | ETM1                 | WS 2                   | Circuit ouvert ( $\geq 1 \text{ M}\Omega$ ) |
|                                                                    | ETM2                 | WS 2                   | $50 \Omega$                                 |
|                                                                    | ETM3                 | WS 2                   | Court-circuit ( $< 50 \text{ m}\Omega$ )    |
|                                                                    | ITM1                 | WS 2                   | Circuit ouvert ( $\geq 1 \text{ M}\Omega$ ) |
|                                                                    | ITM2                 | WS 2                   | $50 \Omega$                                 |
|                                                                    | ITM3                 | WS 2                   | Court-circuit ( $< 50 \text{ m}\Omega$ )    |
| Ligne non symétrique ou individuelle données/signal/contrôle/audio | ETM1                 | WS 1                   | Circuit ouvert ( $\geq 1 \text{ M}\Omega$ ) |
|                                                                    | ETM2                 | WS 1                   | $50 \Omega$                                 |
|                                                                    | ETM3                 | WS 1                   | Court-circuit ( $< 50 \text{ m}\Omega$ )    |
| Ligne coaxiale                                                     | ETM2                 | WS 1                   | $50 \Omega$ (ou impédance câble coaxial)    |
|                                                                    | ITM2                 | WS 1                   | $50 \Omega$ (ou impédance câble coaxial)    |

<sup>a</sup> Selon la conception du DUT, WS1 ou WS2 doit être appliqué. La charge  $2 \Omega$  a été définie dans MIL-STD-188-125-1 pour les lignes d'alimentation. Les conditions de charge de court-circuit et en circuit ouvert sont optionnelles, par conséquent, aucune exigence n'est définie dans la présente Norme.

## 5.5 Procédure de mesure

### 5.5.1 Généralités

Afin de réduire au minimum la possibilité d'endommagement du DUT, une série d'impulsions à des amplitudes croissantes doit être appliquée pour tous les modes d'essai applicables ETM1 à ETM3 et ITM1 à ITM3.

**AVERTISSEMENT:** Le DUT peut présenter une durée d'impulsion limitée. Il convient de le vérifier afin de détecter toute dégradation avant de le mettre en service ou avant tout autre essai.

### 5.5.2 Vérification des impulsions

Effectuer la vérification du niveau d'essai avec 10 %, 20 %, 40 %, 80 % et 100 % du courant d'essai maximum (voir Figure 3) et consigner les niveaux vérifiés, la tension de chargement et les paramètres des générateurs exigés pour atteindre ces niveaux d'essai.

NOTE L'amplitude de 10 % et 20 % du niveau d'essai maximum peut ne pas être possible pour certains générateurs d'impulsions.

### 5.5.3 Procédure de mesure

Les procédures de mesure doivent être comme suit:

- Configurer un DUT et les appareils de mesure conformément à 5.2.
- Définir la configuration de circuit d'essai aux modes d'essai souhaités (voir 5.4).
- Injecter une impulsion dans le DUT avec les tensions de chargement du générateur vérifié en 5.5.2.
- Consigner les résultats de mesure de l'onde de forme résiduelle. La forme d'onde de courant ou de tension doit être mesurée.
- Comparer les résultats aux critères de performance (voir en 5.6).

### 5.6 Évaluation des résultats d'essais

Les résultats de réussite/d'échec doivent être classés en termes de valeur de crête du courant ou de la tension, valeur de crête du temps de montée et d'action racine à la sortie d'un filtre combiné IEMN-HA. Les critères de performance exigés sont donnés au Tableau 4, au Tableau 5 et au Tableau 6 pour l'essai IEMN-HA initiale.

**Tableau 4 – Critères de performance du filtre par rapport à l'IEMN-HA initiale – Accès d'alimentation en courant alternatif avec charge nominale 2  $\Omega$**

| Niveau de sévérité                                                                                       | Concepts de protection                 | Valeur de crête du courant résiduel ou de la tension résiduelle |                                  | Valeur de crête du temps de montée | Action racine        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|----------------------|
|                                                                                                          |                                        | $I_{\text{Charge}}$ , A                                         | $U_{\text{Charge}}$ , V          | $A/s$                              | $A\sqrt{s}$          |
| Niveau 1                                                                                                 | IEC 61000-6-2 (industriel)             | $U_{\text{Charge}} / R_{\text{Charge}}$                         | $2 \cdot \hat{U}_{\text{Nom}}^a$ | $2 \times 10^8$                    | 3,2                  |
| Niveau 2                                                                                                 | Infrastructures critiques              | 50                                                              | 100                              | $5 \times 10^7$                    | $8,0 \times 10^{-1}$ |
| Niveau 3                                                                                                 | Cas particulier<br>(Mil-Std-188-125-1) | 10                                                              | 20                               | $10^7$                             | $1,6 \times 10^{-1}$ |
| Niveau X                                                                                                 | Défini par l'utilisateur               | UD <sup>b</sup>                                                 | UD                               | UD                                 | UD                   |
| <sup>a</sup> $\hat{U}_{\text{Nom}}$ désigne la valeur de crête de la tension nominale de fonctionnement. |                                        |                                                                 |                                  |                                    |                      |
| <sup>b</sup> UD signifie "défini par l'utilisateur".                                                     |                                        |                                                                 |                                  |                                    |                      |

**Tableau 5 – Critères de performance du filtre par rapport à l'IEMN-HA initiale – Accès d'alimentation en courant continu avec charge nominale 2 Ω**

| Niveau de sévérité                                                                                                                                                                                                                                                      | Concepts de protection              | Valeur de crête du courant résiduel ou de la tension résiduelle |                          | Valeur de crête du temps de montée | Action racine        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------|------------------------------------|----------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                     | $I_{\text{Charge}}$ , A                                         | $U_{\text{Charge}}$ , V  | $A/s$                              | $A\sqrt{s}$          |
| Niveau 1                                                                                                                                                                                                                                                                | IEC 61000-6-2 (Industriel)          | $U_{\text{Charge}} / R_{\text{Charge}}$                         | $\hat{U}_{\text{Nom}}^a$ | $2 \times 10^8$                    | 3,2                  |
| Niveau 2                                                                                                                                                                                                                                                                | Infrastructures critiques           | 50                                                              | 100                      | $5 \times 10^7$                    | $8,0 \times 10^{-1}$ |
| Niveau 3                                                                                                                                                                                                                                                                | Cas particulier (Mil-Std-188-125-1) | ND <sup>b</sup>                                                 | ND                       | ND                                 | ND                   |
| Niveau X                                                                                                                                                                                                                                                                | Défini par l'utilisateur            | UD <sup>c</sup>                                                 | UD                       | UD                                 | UD                   |
| <sup>a</sup> $\hat{U}_{\text{Nom}}$ désigne la valeur de crête de la tension nominale de fonctionnement.<br><sup>b</sup> ND désigne qu'une valeur n'est pas définie dans la référence du concept de protection.<br><sup>c</sup> UD signifie "défini par l'utilisateur". |                                     |                                                                 |                          |                                    |                      |

**Tableau 6 – Critères de performance du filtre par rapport à l'IEMN-HA initiale – Accès signal, données et contrôle avec charge nominale 50 Ω**

| Niveau de sévérité                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Concepts de protection              | Valeur de crête du courant résiduel ou de la tension résiduelle |                          | Valeur de crête du temps de montée | Action racine                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                     | $I_{\text{Charge}}$ , A                                         | $U_{\text{Charge}}$ , V  | $A/s$                              | $A\sqrt{s}$                       |
| Niveau 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | IEC 61000-6-2 (industriel)          | $U_{\text{Charge}} / R_{\text{Charge}}$                         | $\hat{U}_{\text{Nom}}^a$ | $2 \times 10^8$                    | $3,2 \times 10^{-1}$              |
| Niveau 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Infrastructures critiques           | 1                                                               | 50                       | $5 \times 10^7$                    | $8,0 \times 10^{-2}$              |
| Niveau 3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Cas particulier (Mil-Std-188-125-1) | 0,1 <sup>b</sup>                                                | 5 <sup>b</sup>           | $10^7$                             | $1,6 \times 10^{-3}$ <sup>b</sup> |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                     | 1 <sup>c</sup>                                                  | 50 <sup>c</sup>          |                                    | $1,6 \times 10^{-2}$ <sup>c</sup> |
| Niveau X                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Défini par l'utilisateur            | UD <sup>d</sup>                                                 | UD                       | UD                                 | UD                                |
| <sup>a</sup> $\hat{U}_{\text{Nom}}$ désigne la valeur de crête de la tension nominale de fonctionnement.<br><sup>b</sup> S'applique au dispositif présentant une tension de fonctionnement inférieure à 90 V.<br><sup>c</sup> S'applique au dispositif présentant une tension de fonctionnement égale ou supérieure à 90 V.<br><sup>d</sup> UD signifie "défini par l'utilisateur". |                                     |                                                                 |                          |                                    |                                   |

Pour l'essai IEMN-HA intermédiaire, les valeurs résiduelles ne sont pas définies. Cependant, l'essai doit être réalisé afin de garantir que le filtre combiné IEMN-HA n'est pas endommagé durant l'essai. Ceci doit être vérifié en veillant à ce que le filtre combiné IEMN-HA fonctionne normalement à l'issue de l'essai.

## 5.7 Rapport d'essai

Pour chaque étape de la séquence d'essai, il convient d'inclure les paramètres suivants dans le rapport d'essai:

- Forme d'onde, courant de crête et impédance de source de l'impulsion vérifiée.
- Mode d'essai, configuration de câblage (notamment le schéma des connexions s'il est différent des exemples donnés).
- Résistance de la charge d'essai.
- Valeur de crête du courant ou de la tension de l'impulsion résiduelle.

- e) Forme d'onde mesurée de l'impulsion résiduelle.
- f) Valeur  $di/dt$  maximale, et intégrale racine de l'impulsion résiduelle, si exigé.
- g) Comparaison des résultats avec les critères de performance exigés.

Il convient de consigner le nombre total d'impulsions appliquées au DUT durant la séquence d'essai.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61000-4-24:2015

## Annexe A (informative)

### Investigation relative à l'établissement du montage de mesure

#### A.1 Généralités

Avec le montage de mesure, certaines variations ont été analysées en vue d'améliorer la répétabilité et la reproductibilité du résultat de mesure. L'Annexe A résume cette investigation afin d'illustrer la sensibilité de la procédure au montage d'essai.

#### A.2 Variation du câble connecté pour la mesure du courant de court-circuit

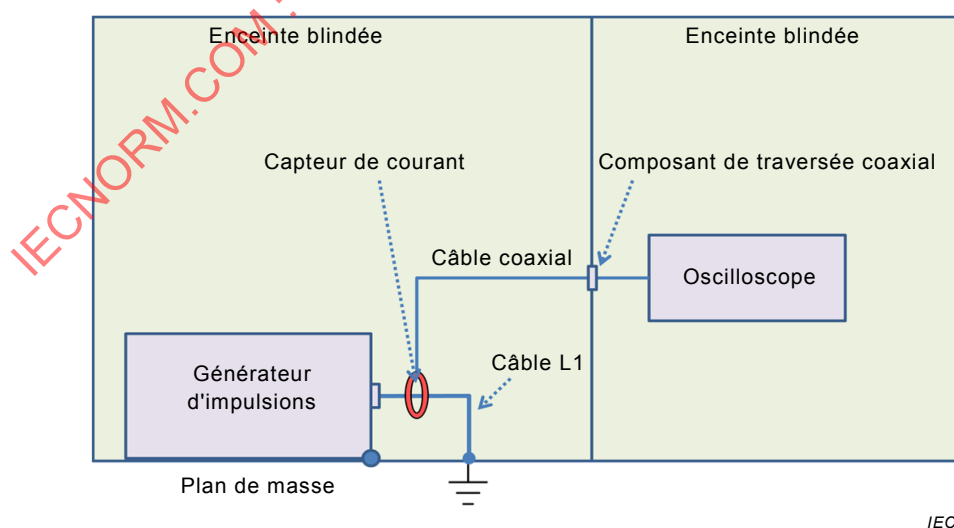
La sortie du générateur d'impulsions doit être étalonnée avant d'appliquer une impulsion à un dispositif de protection. Le montage d'étalonnage est représenté à la Figure A.1.

Pour l'étalonnage de la forme d'onde du courant de court-circuit, la sortie du générateur d'impulsions doit être raccourcie à la masse du générateur à l'aide d'un câble, L1. Le courant sur le câble doit être mesuré à l'aide d'un capteur de courant et d'un oscilloscope.

On a étudié de quelle façon la forme d'onde était affectée par la variation de la taille et la longueur du câble. Des mesures ont été effectuées sur les câbles présentant une section de 9 mm<sup>2</sup> et de 4 mm<sup>2</sup>, en faisant varier la longueur du câble L1 comme suit: 0,2 m, 0,3 m, 0,4 m, 0,5 m, 0,6 m, 0,7 m, 0,8 m, 0,9 m, 1,0 m, 1,2 m, 1,4 m, 1,6 m, 1,8 m et 2,0 m.

Les résultats de mesure sont présentés au Tableau A.1 et de la Figure A.2 à la Figure A.7.

Il a été conclu que le câble L1 pour l'étalonnage de la forme d'onde du courant de court-circuit doit être le plus épais et le plus court possible. Il est recommandé que le câble L1 présente une section de 4 mm<sup>2</sup> ou plus et une longueur de 0,8 m ou moins. Le câble L1 utilisé lors de l'étalonnage doit également être utilisé dans le montage de mesure.

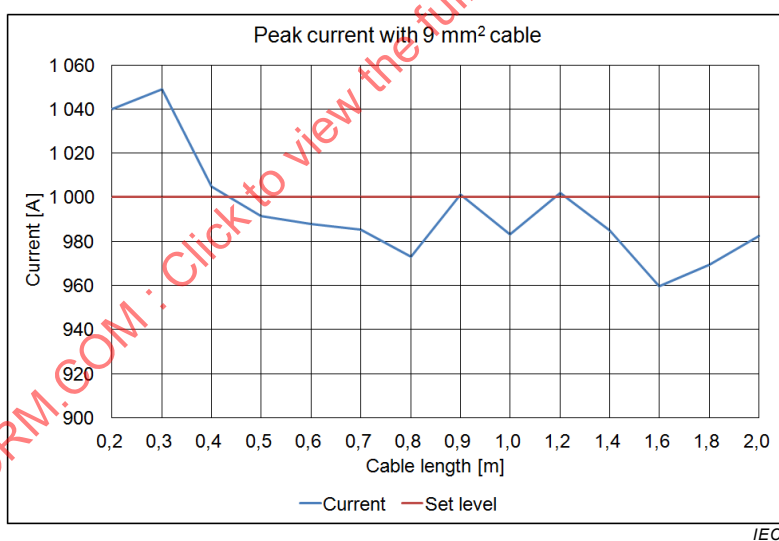


IEC

Figure A.1 – Montage en vue de l'étalonnage

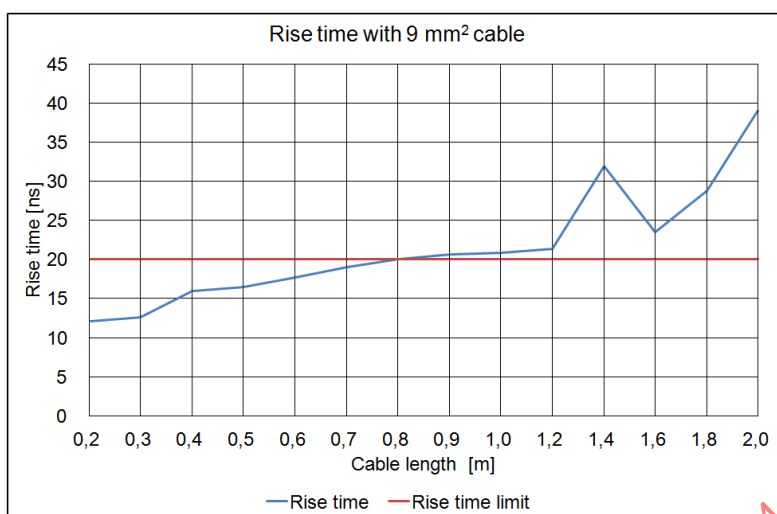
**Tableau A.1 – Résultats de mesure pour l'étalonnage de la forme d'onde du courant de court-circuit**

| Section, 9 mm <sup>2</sup> |                     |                            |                         | Section, 4 mm <sup>2</sup> |                            |                         |
|----------------------------|---------------------|----------------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|
| L1, m                      | Courant de crête, A | Temps de montée, (< 20 ns) | FWHM, (500 ns ~ 550 ns) | Courant de crête, A        | Temps de montée, (< 20 ns) | FWHM, (500 ns ~ 550 ns) |
| 0,2                        | 1 040,0             | 12,1                       | 505,8                   | 1 005,0                    | 12,6                       | 497,8                   |
| 0,3                        | 1 049,0             | 12,6                       | 525,2                   | 999,6                      | 13,8                       | 506,5                   |
| 0,4                        | 1 004,8             | 16,0                       | 525,8                   | 1 030,0                    | 14,4                       | 522,3                   |
| 0,5                        | 991,4               | 16,5                       | 521,9                   | 981,4                      | 17,1                       | 532,8                   |
| 0,6                        | 987,8               | 17,7                       | 531,6                   | 1 000,4                    | 17,5                       | 531,1                   |
| 0,7                        | 985,2               | 19,1                       | 539,9                   | 978,4                      | 18,3                       | 536,8                   |
| 0,8                        | 973,2               | 20,1                       | 544,6                   | 989,6                      | 19,0                       | 546,4                   |
| 0,9                        | 1 001,4             | 20,6                       | 549,5                   | 964,6                      | 22,4                       | 555,0                   |
| 1,0                        | 983,2               | 20,9                       | 544,7                   | 960,0                      | 23,1                       | 552,1                   |
| 1,2                        | 1 002,0             | 21,4                       | 546,1                   | 959,2                      | 21,7                       | 547,2                   |
| 1,4                        | 985,0               | 31,9                       | 564,8                   | 952,2                      | 25,2                       | 563,5                   |
| 1,6                        | 959,6               | 23,5                       | 564,8                   | 948,8                      | 32,6                       | 571,9                   |
| 1,8                        | 969,4               | 28,8                       | 566,4                   | 937,2                      | 35,8                       | 579,0                   |
| 2,0                        | 982,6               | 39,1                       | 582,1                   | 927,0                      | 41,7                       | 585,4                   |



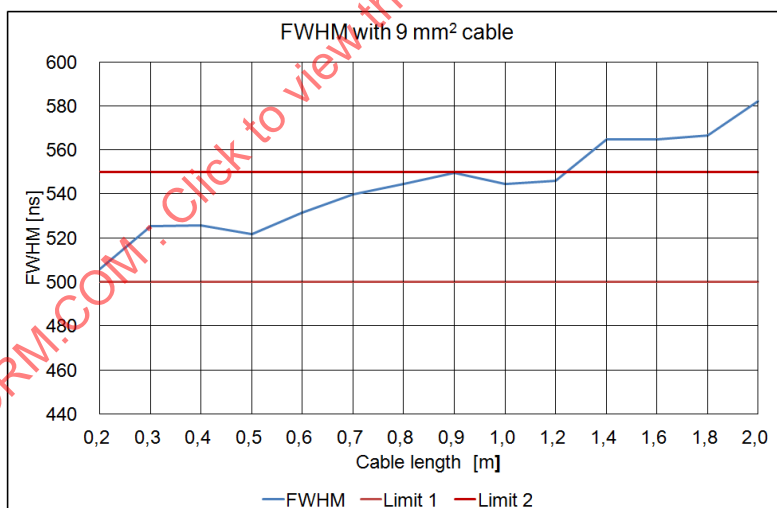
| Anglais                                   | Français                                            |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Peak current with 9 mm <sup>2</sup> cable | Courant de crête avec un câble de 9 mm <sup>2</sup> |
| Cable length [m]                          | Longueur du câble [m]                               |
| Peak current, A                           | Courant de crête, A                                 |
| Set level                                 | Niveau défini                                       |
| Current [A]                               | Courant [A]                                         |

**Figure A.2 – Résultats d'étalonnage du courant de crête avec des câbles de 9 mm<sup>2</sup>: 1 000 A ± 4 %**



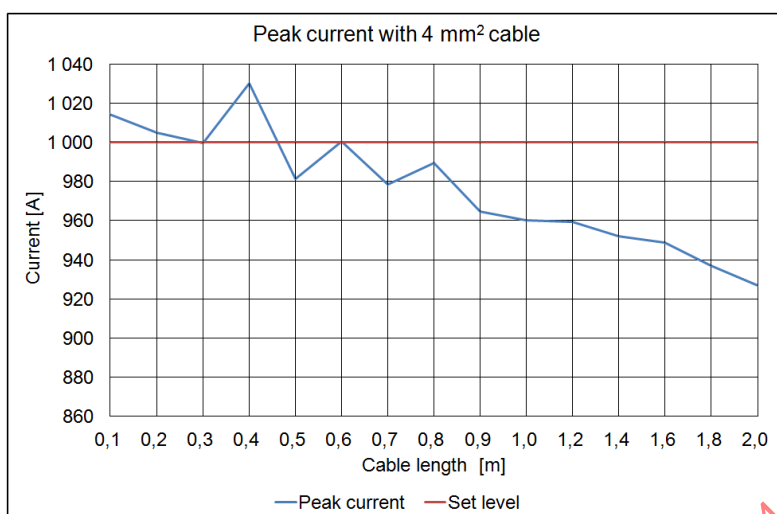
| Anglais                                | Français                                           |
|----------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Rise time with 9 mm <sup>2</sup> cable | Temps de montée avec un câble de 9 mm <sup>2</sup> |
| Cable length [m]                       | Longueur du câble [m]                              |
| Rise time, ns                          | Temps de montée, ns                                |
| Rise time limit                        | Limite du temps de montée                          |
| Rise time [ns]                         | Temps de montée [ns]                               |

**Figure A.3 – Résultats d'étalonnage du temps de montée avec des câbles de 9 mm<sup>2</sup>**



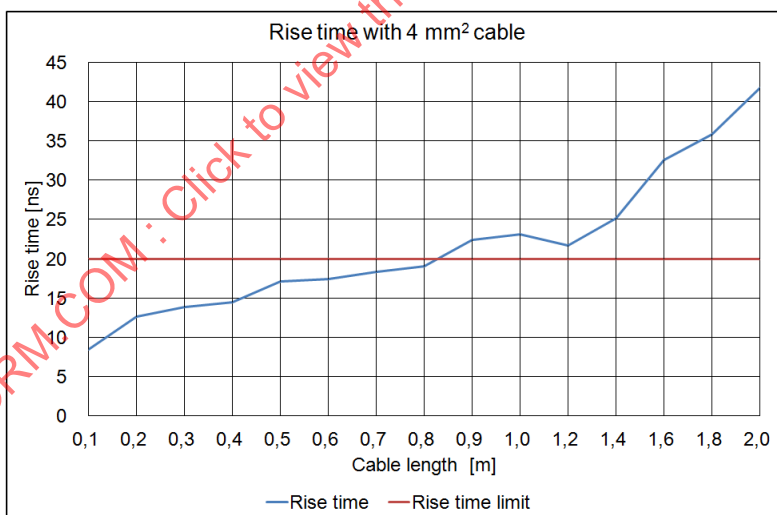
| Anglais                           | Français                                |
|-----------------------------------|-----------------------------------------|
| FWHM with 9 mm <sup>2</sup> cable | FWHM avec un câble de 9 mm <sup>2</sup> |
| FWHM [ns]                         | FWHM [ns]                               |
| Cable length [m]                  | Longueur du câble [m]                   |
| FWHM, [ns]                        | FWHM, [ns]                              |
| Limit 1                           | Limite 1                                |
| Limit 2                           | Limite 2                                |

**Figure A.4 – Résultats d'étalonnage FWHM avec des câbles de 9 mm<sup>2</sup>**



| Anglais                                   | Français                                            |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Peak current with 4 mm <sup>2</sup> cable | Courant de crête avec un câble de 4 mm <sup>2</sup> |
| Current [A]                               | Courant [A]                                         |
| Cable length [m]                          | Longueur du câble [m]                               |
| Peak current, A                           | Courant de crête, A                                 |
| Set level                                 | Niveau défini                                       |

**Figure A.5 – Résultats d'étalonnage du courant de crête avec des câbles de 4 mm<sup>2</sup>: 1 000 A ± 8 %**



| Anglais                                | Français                                           |
|----------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Rise time with 4 mm <sup>2</sup> cable | Temps de montée avec un câble de 4 mm <sup>2</sup> |
| Rise time [ns]                         | Temps de montée [ns]                               |
| Cable length [m]                       | Longueur du câble [m]                              |
| Rise time, ns                          | Temps de montée, ns                                |
| Rise time limit                        | Limite du temps de montée                          |

**Figure A.6 – Résultats d'étalonnage du temps de montée avec des câbles de 4 mm<sup>2</sup>**