

TECHNICAL REPORT

RAPPORT TECHNIQUE

**High-voltage switchgear and controlgear –
Part 208: Methods to quantify the steady state, power-frequency electromagnetic
fields generated by HV switchgear assemblies and HV/LV prefabricated
substations**

**Appareillage à haute tension –
Partie 208: Méthodes de quantification des champs électromagnétiques à
fréquence industrielle en régime établi générés par les ensembles
d'appareillages HT et les postes préfabriqués HT/BT**



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2009 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 la CEI ou du Comité national de la CEI du pays du demandeur.

Si vous avez des questions sur le copyright de la CEI ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de la CEI de votre pays de résidence.

IEC Central Office
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland
Email: inmail@iec.ch
Web: 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.

- Catalogue of IEC publications: www.iec.ch/searchpub

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 It also gives information on projects, withdrawn and replaced publications.

- IEC Just Published: www.iec.ch/online_news/justpub

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

- Electropedia: www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing more than 20 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary online.

- Customer Service Centre: www.iec.ch/webstore/custserv

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please visit the Customer Service Centre FAQ or contact us:

Email: csc@iec.ch

Tel.: +41 22 919 02 11

Fax: +41 22 919 03 00

A propos de la CEI

La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) 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 CEI

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

- Catalogue des publications de la CEI: www.iec.ch/searchpub/cur_fut-f.htm

Le Catalogue en-ligne de la CEI vous permet d'effectuer des recherches en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...). Il donne aussi des informations sur les projets et les publications retirées ou remplacées.

- Just Published CEI: www.iec.ch/online_news/justpub

Restez informé sur les nouvelles publications de la CEI. Just Published détaille deux fois par mois les nouvelles publications parues. Disponible en-ligne et aussi par email.

- Electropedia: www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne au monde de termes électroniques et électriques. Il contient plus de 20 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans les langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International en ligne.

- Service Clients: www.iec.ch/webstore/custserv/custserv_entry-f.htm

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions, visitez le FAQ du Service clients ou contactez-nous:

Email: csc@iec.ch

Tél.: +41 22 919 02 11

Fax: +41 22 919 03 00

TECHNICAL REPORT

RAPPORT TECHNIQUE

**High-voltage switchgear and controlgear –
Part 208: Methods to quantify the steady state, power-frequency electromagnetic
fields generated by HV switchgear assemblies and HV/LV prefabricated
substations**

**Appareillage à haute tension –
Partie 208: Méthodes de quantification des champs électromagnétiques à
fréquence industrielle en régime établi générés par les ensembles
d'appareillages HT et les postes préfabriqués HT/BT**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX

X

ICS 29.130.10

ISBN 978-2-88910-657-8

CONTENTS

FOREWORD.....	4
INTRODUCTION.....	6
1 Scope.....	7
2 Normative references	7
3 Terms and definitions	8
4 Evaluation requirements	9
4.1 General.....	9
4.2 Methods of evaluation	9
4.3 Evaluation of electric fields.....	10
4.3.1 HV switchgear assemblies.....	10
4.3.2 HV/LV prefabricated substations.....	10
4.4 Evaluation of magnetic fields.....	10
4.4.1 HV switchgear assemblies.....	10
4.4.2 HV/LV prefabricated substations.....	11
5 Measurements.....	12
5.1 General.....	12
5.2 Measuring instruments	12
5.3 Measurement procedures	12
5.3.1 General	12
5.3.2 Electric field	13
5.3.3 Magnetic field	16
5.3.4 Background fields	16
5.3.5 Environmental factors	16
5.4 Measurement set-up.....	17
5.4.1 General	17
5.4.2 Additional provisions for HV/LV prefabricated substations	20
6 Calculations	20
6.1 General.....	20
6.2 Software.....	21
6.3 Calculation procedures.....	21
6.4 Results.....	21
6.5 Validation	22
7 Documentation	22
7.1 Characteristics of the HV switchgear assembly or prefabricated substation	22
7.2 Evaluation method.....	22
7.3 Presentation of the measurement results.....	22
7.4 Presentation of the calculation results	23
Annex A (informative) Presentation of E or B field measurement data – Example for a typical HV/LV pre-fabricated substation	24
Annex B (informative) Examples of analytical solutions to benchmark EMF calculations.....	27
Bibliography.....	45

Figure 1 – Example of test circuits configuration to obtain the maximum external magnetic field of a switchgear assembly and/or a prefabricated substation 11

Figure 2 – Reference surface (RS) for equipment of irregular shape 13

Figure 3 – Scanning areas to find the hot spots	14
Figure 4 – Determination of the field variation as a function of the distance from the hot spot locations (perpendicular to the reference surface)	15
Figure 5 – Test set-up of main components, external cables, hot spot locations and measurement volume.....	18
Figure 6 – Test circuit for electric and magnetic field measurement	19
Figure A.1 – Hot spot locations representing the field maxima	24
Figure A.2 – Graphical presentation of the field variation	25
Figure A.3 – Example diagram for the field variation at hot spots	26
Figure B.1 – Schematic for 3-phase magnetic field calculation	27
Figure B.2 – Variation of resultant magnetic field around 3-phase cable	30
Figure B.3 – Maximum resultant magnetic field around 3-phase cable	31
Figure B.4 – Schematic for 3-phase electric field calculation.....	35
Figure B.5 – Variation of resultant electric field around 3-phase cable	38
Figure B.6 – Maximum resultant electric field around 3-phase cable	40
 Table A.1 – Listing of the hot spot coordinates.....	 25
Table A.2 – Variation of field values for one hot spot	25
Table A.3 – Background fields	26
Table B.1 – Values of H_{res} for spatial angles θ and time angles ωt	30
Table B.2 – Values of maximum H_{res} for spatial angles θ	32
Table B.3 – Values of E_{res} for spatial angles θ and time angles ωt	39
Table B.4 – Values of maximum E for spatial angles θ	40

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

HIGH-VOLTAGE SWITCHGEAR AND CONTROLGEAR –

**Part 208: Methods to quantify the steady state,
power-frequency electromagnetic fields
generated by HV switchgear assemblies
and HV/LV prefabricated substations**

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.

The main task of IEC technical committees is to prepare International Standards. However, a technical committee may propose the publication of a technical report when it has collected data of a different kind from that which is normally published as an International Standard, for example "state of the art".

IEC 62271-208, which is a technical report, has been prepared by subcommittee 17C: High-voltage switchgear and controlgear assemblies, of IEC technical committee 17: Switchgear and controlgear.

In this technical report the word "shall" is used as a conditional "shall", in the event that this technical report is applied.

The text of this technical report is based on the following documents:

Enquiry draft	Report on voting
17C/450/DTR	17C/462/RVC

Full information on the voting for the approval of this technical report 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 the parts in the IEC 62271 series, under the general title *High-voltage switchgear and controlgear*, can be found on the IEC website.

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

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

INTRODUCTION

Manufacturers of electricity supply equipment may be asked to provide information about the electromagnetic field characteristics to enable the user to

- assess the electromagnetic field conditions to assist with planning, installation, operating instructions and service,
- take measures to meet requirements or regulations on electromagnetic fields,
- compare different products as far as their level of electromagnetic fields is concerned.

The purpose of this technical report is to describe a methodology for the evaluation (measurement or calculation) of generated electromagnetic fields.

The electromagnetic field characteristic of the equipment comprises the values of the electric and the magnetic fields around its accessible surfaces.

The electromagnetic field characteristic defined in this technical report refers to a single product as defined in the scope. In real installations, several field sources can superimpose, so the resulting electromagnetic fields on site may differ significantly from the single product characteristics.

This technical report does not define a mandatory test for the products mentioned in the scope.

Neither the establishment of limits for the electromagnetic fields generated by equipment, nor the establishment of assessment methods for the human exposure to electromagnetic fields is within the content or intent of this technical report.

HIGH-VOLTAGE SWITCHGEAR AND CONTROLGEAR –

Part 208: Methods to quantify the steady state, power-frequency electromagnetic fields generated by HV switchgear assemblies and HV/LV prefabricated substations

1 Scope

This part of IEC 62271 gives practical guidance for the evaluation and documentation of the external electromagnetic fields which are generated by HV switchgear assemblies and HV/LV prefabricated substations. Basic requirements to measure or calculate the electric and magnetic fields are summarised for switchgear assemblies covered by IEC 62271-200 and IEC 62271-201, and for prefabricated substations covered by IEC 62271-202.

NOTE 1 The methods described in this technical report refer to three-phase equipment. However, the methodology may be used correspondingly for any single- or multi-phase equipment covered by this technical report.

This technical report applies to equipment rated for voltages up to and including 52 kV and power-frequencies from 15 Hz to 60 Hz. The electromagnetic fields which are generated by harmonics or transients are not considered in this technical report. However, the methods described are equally applicable to the harmonic fields of the power-frequency.

Detailed generic information on requirements and measurements of low-frequency electromagnetic fields is given in IEC 61786.

This technical report covers evaluation under factory or laboratory conditions before installation. The electric and the magnetic fields can be evaluated either by measurements or by calculations.

NOTE 2 Where practicable, the methods described in this technical report may also be used for installations on site.

It is not within the scope of this technical report to specify limit values of electromagnetic fields or methods for the assessment of human exposure.

2 Normative references

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

IEC 61000-6-2, *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 6-2: Generic standards - Immunity for industrial environments*

IEC 61786, *Measurement of low-frequency magnetic and electric fields with regard to exposure of human beings – Special requirements for instruments and guidance for measurements*

IEC 62271-200, *High-voltage switchgear and controlgear – Part 200: AC metal-enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV*

IEC 62271-201, *High-voltage switchgear and controlgear – Part 201: AC insulation-enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV*

IEC 62271-202, *High-voltage switchgear and controlgear – Part 202: High-voltage/low-voltage prefabricated substation*

3 Terms and definitions

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

3.1

EMF

abbreviation for the term “electromagnetic field(s)”

3.2

electric field characteristic

values (r.m.s.) and spatial distribution of the electric field strength at rated voltage and frequency around all accessible surfaces of the equipment. The electric field characteristic is the resultant of the r.m.s. values of the three orthogonal vector components

3.3

magnetic field characteristic

values (r.m.s.) and spatial distribution of the magnetic flux density at rated normal current and frequency around all accessible surfaces of the equipment. The magnetic field characteristic is the resultant of the r.m.s. values of the three orthogonal vector components

NOTE The terms “resultant electric field” and “resultant magnetic field” are defined in IEC 61786.

3.4

accessible surfaces

those parts of the walls and roof of prefabricated substations or HV switchgear assemblies that can be touched with all covers and doors in closed position in normal service conditions

3.5

reference surface

RS

virtual envelope containing the equipment for evaluation purposes

3.6

measurement surface

MS

defined outside the reference surface at 20 cm distance

NOTE This surface is used for measuring the hot spots and the variation of the EMF.

3.7

hot spot

centre of an area of a local maximum of the electric or the magnetic field

3.8

EMF characteristic

spatial distribution of the resultant (modulus) of the r.m.s. electric field strength (E) and the magnetic flux density (B). The spatial distribution is derived from a measurement or calculation grid

3.9 measurement volume MV

virtual space in which the electromagnetic background field must not exceed an appropriate level to permit the uninfluenced measurement of the electric and magnetic fields generated by the equipment

4 Evaluation requirements

4.1 General

The EMF characteristic of HV switchgear assemblies or HV/LV prefabricated substations is the measured or calculated electric field strength and magnetic flux density around all accessible surfaces under the conditions for evaluation described below. These conditions represent the service, where the loading of the switchgear assemblies and, in a substation, of the transformer is at defined values.

As the electric and magnetic fields are dependent on the physical arrangement of incoming and outgoing cables and their loadings, these parameters have to be recorded. The presence of other field sources and shielding or other metallic structures shall be recorded.

The EMF characteristic shall be evaluated for the conditions that would result in the highest levels of electric and magnetic fields in normal, undisturbed service. These conditions include the highest currents and largest loops realistically possible through the assembly working at maximum capacity. EMF caused by switching operations, including interruption of fault currents, or other transient phenomena is deemed to be incidental and shall not be considered.

The highest current on the HV side is the rated normal current given on the nameplate of the switchgear assembly, and on the LV side the rated normal current of the transformer with the highest rating. In a calculation both currents have to be simulated. During a measurement it is preferable to have both currents present.

Electric field strength and magnetic flux density shall be recorded as the resultant of the r.m.s. values of the three orthogonal components.

The evaluation shall be carried out at the rated frequency of the equipment.

However, in the frequency range up to and including 60 Hz the actual value of frequency does not significantly affect the levels of generated E fields for any given values of voltage. Therefore evaluation at any frequency up to and including 60 Hz is considered valid.

Similarly, the difference in attenuation of B fields by metallic enclosures at 50 Hz and 60 Hz can be ignored for the purpose of this technical report. Therefore evaluation at 50 Hz is considered applicable also for 60 Hz and vice versa.

In the power-frequency range covered by this technical report the electric and magnetic fields may be treated separately. When selecting the conditions to obtain the highest level of electric and magnetic fields as realistically as possible in undisturbed service, the following subclauses shall be considered.

4.2 Methods of evaluation

The manufacturer may evaluate the EMF characteristic by measurement or by calculation.

4.3 Evaluation of electric fields

4.3.1 HV switchgear assemblies

The equipment shall be evaluated at the rated voltage of the HV switchgear assembly.

Only if the evaluation cannot be carried out at rated voltage, the results shall be extrapolated to the rated value. Since the electric field strength is a linear function of the voltage, the field strengths for different high voltages may be extrapolated linearly.

4.3.2 HV/LV prefabricated substations

The equipment shall be evaluated at the rated high voltage of the HV/LV transformer(s).

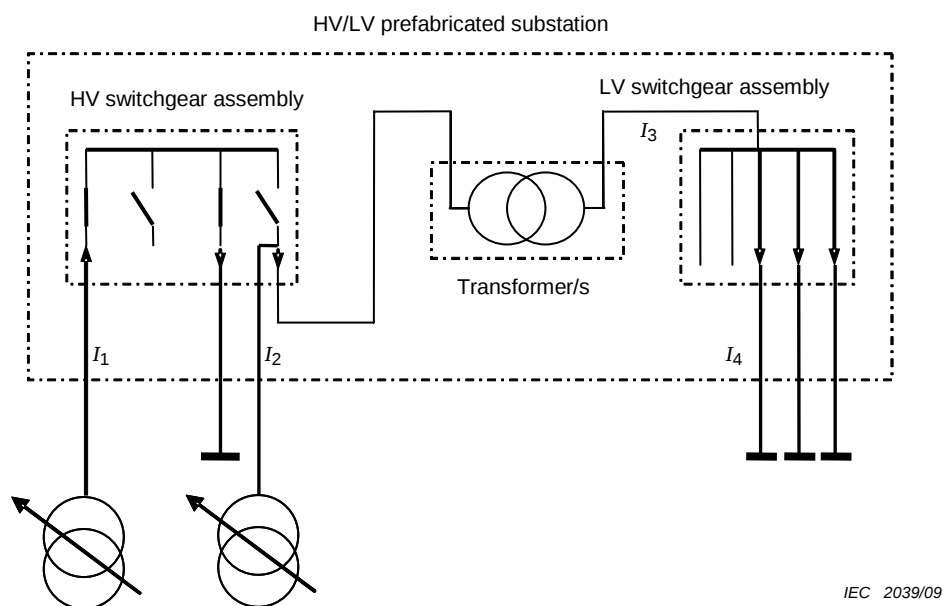
Only if the evaluation cannot be carried out at rated voltage, the results shall be extrapolated to the rated value. Since the electric field strength is a linear function of the voltage, the field strengths for different high voltages may be extrapolated linearly.

4.4 Evaluation of magnetic fields

4.4.1 HV switchgear assemblies

The HV switchgear assembly is loaded with its highest permissible current determined by the rated normal current given on the nameplate. The HV circuit must be selected to form the widest possible current loop between the incoming and outgoing functional units (panels) of the switchgear assembly to obtain the maximum magnetic field by using the smallest number of circuits, taking into account their rated normal current. An example is shown in Figure 1.

If the evaluation cannot be carried out at the rated normal current the results shall be extrapolated to the rated value. Any saturation effect will be less pronounced at lower currents, therefore extrapolation from lower to higher values of current is allowed since it can only result in an overestimate of the B field.



Key

- I_1 = HV switchgear highest loop current
- I_2 = HV/LV loop (HV side) current
- I_3 = HV/LV loop (LV side) highest current
- I_4 = HV/LV (LV outgoing) highest current

Figure 1 – Example of test circuits configuration to obtain the maximum external magnetic field of a switchgear assembly and/or a prefabricated substation

4.4.2 HV/LV prefabricated substations

For the HV switchgear assembly, 4.4.1 applies.

The LV switchgear assembly and the transformer shall be loaded with the highest normal current derived from the maximum rated power of the prefabricated substation for a given LV level. The circuit shall be configured to form the highest concentration of currents to obtain the maximum magnetic field. This can be achieved by using the smallest number of circuits, choosing those located closest to the enclosure of the prefabricated substation and taking into account their rated normal current. An example is shown in Figure 1.

If the design of the HV/LV prefabricated substation admits transformers of different rated power, the manufacturer shall at least provide an evaluation for the transformer with the highest rated power for a given LV level.

NOTE The rated power of the transformer should correspond to the cooling by natural ventilation. EMF evaluation with other means of cooling (for example forced cooling) should be subject to agreement between manufacturer and user.

If the evaluation cannot be carried out at the rated power for a given LV level, the results shall be extrapolated to the rated value. Any saturation effect will be less pronounced at lower currents, therefore extrapolation from lower to higher values of current is allowed since it can only result in an overestimate of the B field.

The extrapolation of magnetic field values is not permitted if the currents on the HV and LV sides of the prefabricated substation vary independently.

5 Measurements

5.1 General

At power-frequency the electric and magnetic field are independent from each other. Hence, magnetic flux density and electric field strength characteristic need not be recorded simultaneously.

The electric field characteristic of the equipment is independent of the load current.

The magnetic field characteristic of the equipment is independent of the voltage.

NOTE General guidance on measurement procedures for electric and magnetic fields can also be found in IEC 62110 and IEC 61786.

5.2 Measuring instruments

Instruments for measuring electric and magnetic fields shall meet the requirements of specification and calibration given by IEC 61786. The calibration report shall be traceable to national or International Standards. These instruments should be used in appropriate conditions, in particular with regard to

- electromagnetic immunity according to IEC 61000-6-2,
- immunity of power-frequency electric field on magnetic field measurement,
- temperature and humidity ranges as recommended by the instrument manufacturer.

A three-axis instrument measures r.m.s. values of resultant field F_r . A single-axis instrument may be used to obtain F_r by measuring F_x , F_y , and F_z , using Equation (1), where F_x , F_y and F_z are r.m.s. values of the orthogonal three-axis components of electric or magnetic field.

$$F_r = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (1)$$

The use of a three-axis instrument with three concentric sensors is preferred. However, if a single-axis instrument is used, special attention should be paid to the orientation of the sensor along three orthogonal directions. The orientation of the sensor shall be changed without moving the position of its centre.

In the case of non-concentric sensors, the locations and orientations of the sensors that are contained within the housings of field meters shall be clearly indicated on the instrument or in the instruction manual.

During the evaluation of the magnetic field generated by HV switchgear assemblies and HV/LV prefabricated substations, the distance between the field source and the measuring instrument is relatively short (in comparison to other AC power equipment like overhead lines). In general, the measurements will be carried out in non-uniform fields. In case of the magnetic field measurement, it is necessary to consider the ratio of distance (d_{sc}) from the field source and sensor radius (a). For measurements with a three-axis instrument, a minimum ratio of 4 is considered suitable.

NOTE When using a probe with radius 5 cm the minimum distance to the field source should be at least 20 cm considering a ratio of 4. More information about this topic can be found in IEC 61786.

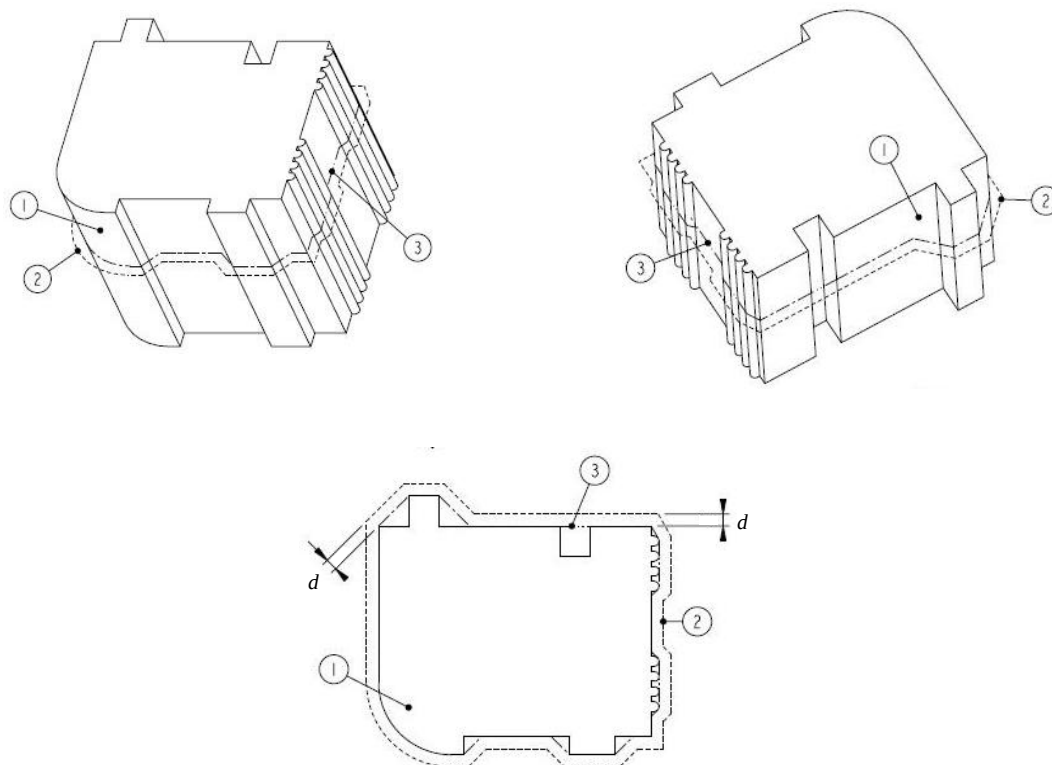
5.3 Measurement procedures

5.3.1 General

To consider equipment of all kinds of shape, a virtual envelope containing the equipment is defined as the reference surface (RS); see Figure 2. The purpose of the RS is to integrate

irregularities and to eliminate abrupt changes in the measurement surface (MS). The MS is defined outside the RS at 20 cm distance.

Protruding elements (for example handles) shall be disregarded.



IEC 2040/09

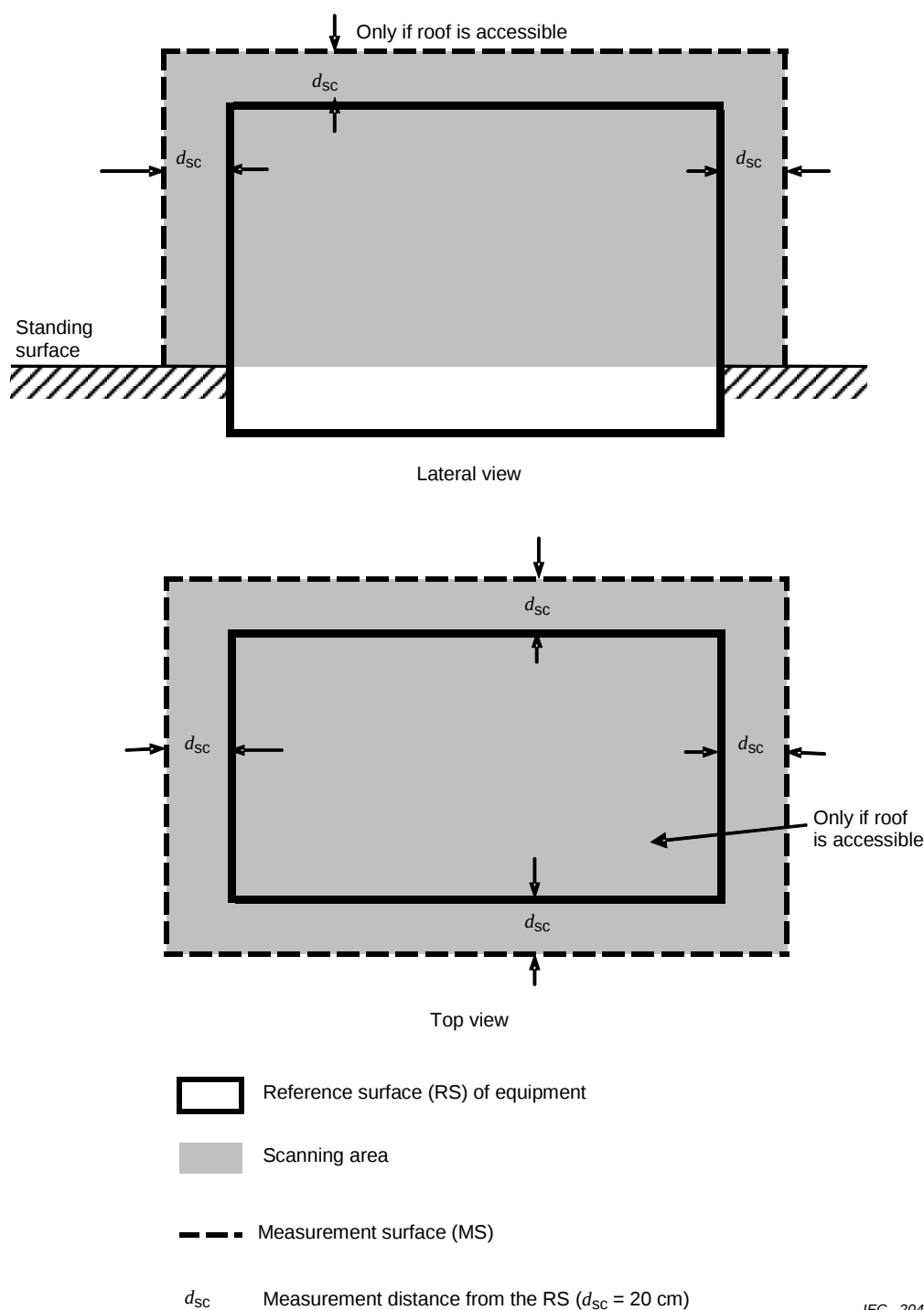
Key

- 1 Equipment surface
- 2 Measurement surface
- 3 Reference surface
- d Distance between equipment and measurement surface (20 cm)

Figure 2 – Reference surface (RS) for equipment of irregular shape

5.3.2 Electric field

The maximum value(s) of the electric field over the accessible measurement surface shall be found by first scanning on a coarse grid to find the regions of maximum field and then refining the grid for the hot spot locations. See also Figure 3.



IEC 2041/09

Figure 3 – Scanning areas to find the hot spots

The variation of the electric field shall be determined as a function of the distance from the MS. Starting at each hot spot, the field values shall be measured along a line perpendicular to the MS until the measured value is lower than 1/10 (–20 dB) of the hot spot value; see Figure 4. Additional measurements may be carried out to fulfil specific requirements (e.g. for a client or country).

NOTE Significant electric fields are not expected for the equipment in the scope of this technical report. However, it is the intention of this technical report to give guidance for the measurement of these fields where manufacturers and users require them.

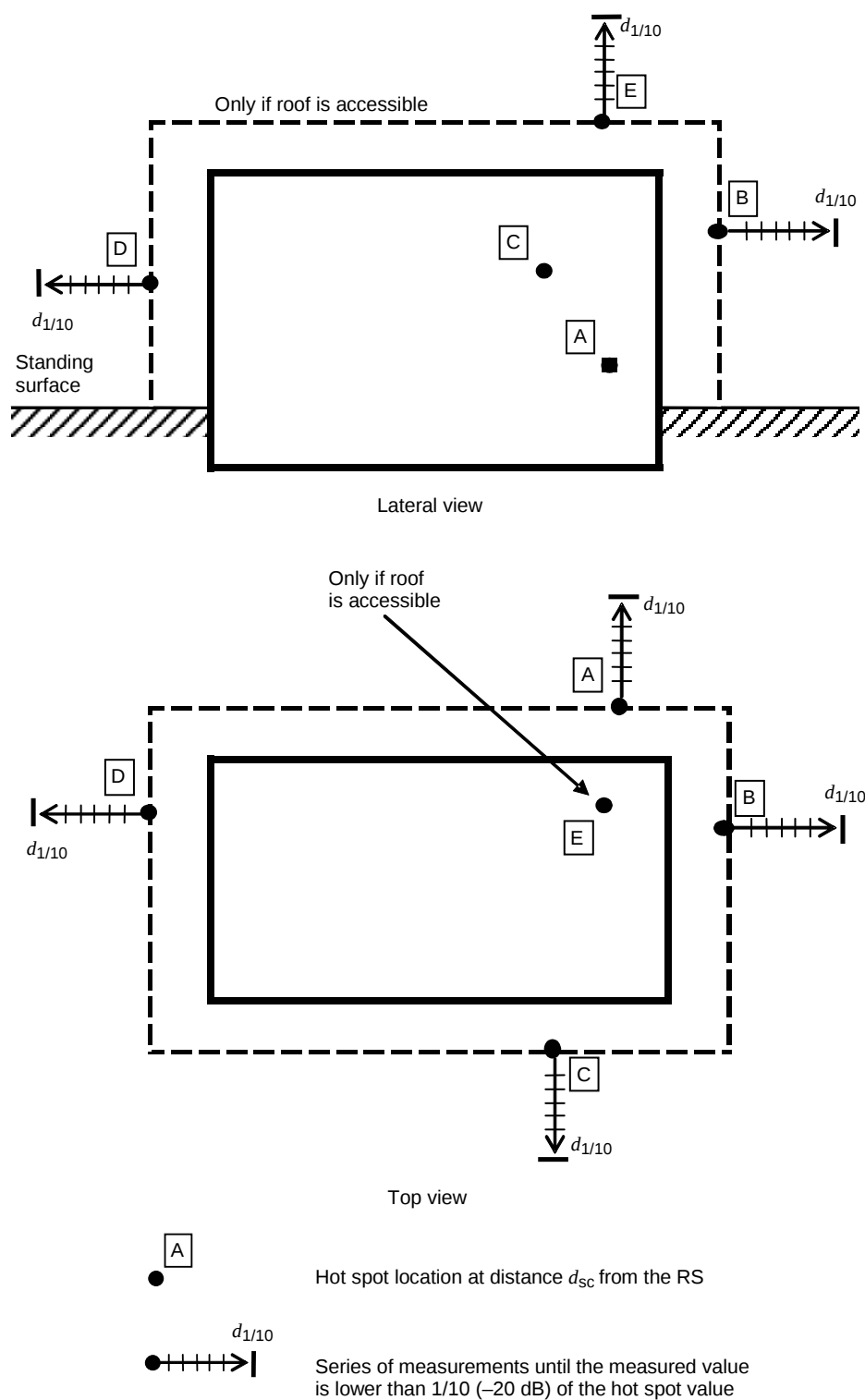


Figure 4 – Determination of the field variation as a function of the distance from the hot spot locations (perpendicular to the reference surface)

5.3.3 Magnetic field

The maximum value(s) of the magnetic field over the MS shall be found by first scanning on a coarse grid to find the regions of maximum field and then refining the grid for the hot spot locations. See also Figure 3.

The variation of the magnetic field shall be determined as a function of the distance from the MS. Starting at each hot spot, the field values shall be measured along a line perpendicular to the MS until the measured value is lower than 1/10 (–20 dB) of the hot spot value; see Figure 4. Additional measurements may be carried out to fulfil specific requirements (e.g. for a client or country).

5.3.4 Background fields

Immediately after the measurements, the equipment shall be switched off and the background field level shall be measured and recorded.

By coarsely scanning the electric or magnetic field within the MV when voltage or current is switched off, it shall be verified that the background field level is below 1/10 (–20 dB) of the lowest value measured at any of the hot spots found during the live measurement.

Guidance on reducing the interfering background fields, caused by the external cables connected to the test specimen, to a minimum, is given in 5.4.1.

5.3.5 Environmental factors

5.3.5.1 Electric field measurement

Environmental factors (e.g. humidity, temperature etc.) have no significant influence on the electric field. However, the electric field measuring instrument can be influenced significantly when the humidity is sufficient to cause condensation on the sensor and the supporting structure. Thus the environmental factors shall be measured to ensure that the measuring instruments are used within their specified environmental limits. Special attention should be paid to humidity.

Acceptable humidity limits for proper measurements are deemed to be

- 60 % relative humidity when using a normal tripod,
- 70 % relative humidity when using an offset tripod
(measuring instrument shifted by 0,50 m from the vertical axis of the tripod).

If those limits are exceeded, the measurements shall be considered as conservative, due to the fact that the values measured in high humidity are higher than those in lower humidity for the same equipment excited with the same voltages.

Likewise, electric field measurements in rain conditions are inappropriate.

5.3.5.2 Magnetic field measurement

Environmental factors (e.g. humidity, temperature etc.) have no significant influence on the magnetic field. However, the environmental factors shall be measured to ensure that the measuring instruments are being used within their specified environmental limits.

5.3.5.3 Other conditions

During electric field measurements, objects or persons shall be kept outside the influence zone of the measuring device.

Only objects containing or consisting of high permeability materials can cause significant distortions of the magnetic field. Persons do not influence the magnetic field, thus measuring instruments may be directly held by persons when making measurements.

The presence of high permeability materials, which are not part of the equipment, in the vicinity of the field source and/or the measuring instruments, shall be stated in the measurement report.

All parts of the equipment intended to be earthed shall be earthed according to the manufacturer's instructions.

5.4 Measurement set-up

5.4.1 General

All measurements shall be carried out with a three-phase voltage or current supply. The test set-up shall meet the following requirements; see also Figure 6.

The equipment under test shall be surrounded by a virtual measurement volume (MV) large enough to allow the decay of the field perpendicular to the reference surface at each hot spot to 1/10 (–20 dB) of its value; see Figure 5.

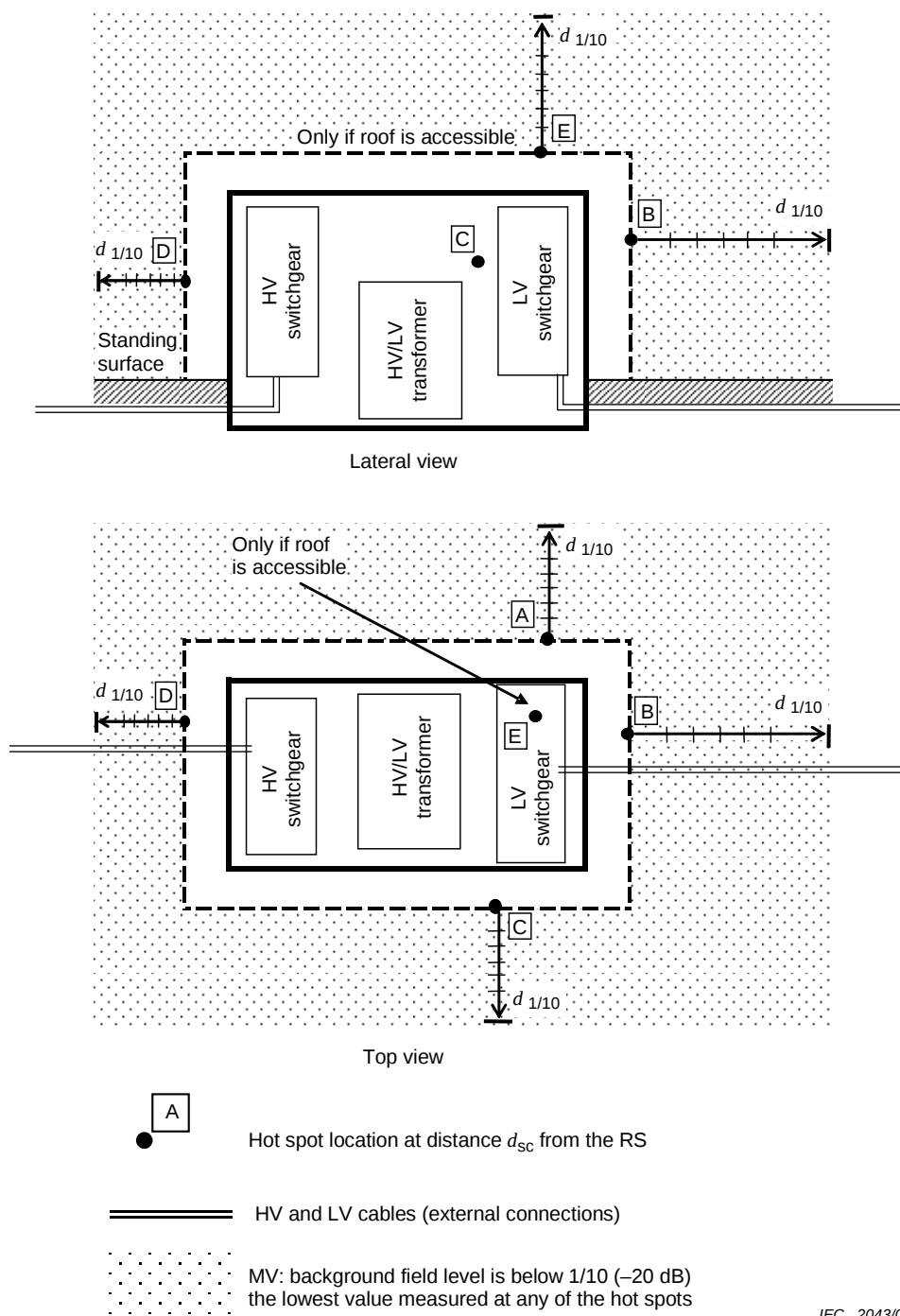


Figure 5 – Test set-up of main components, external cables, hot spot locations and measurement volume

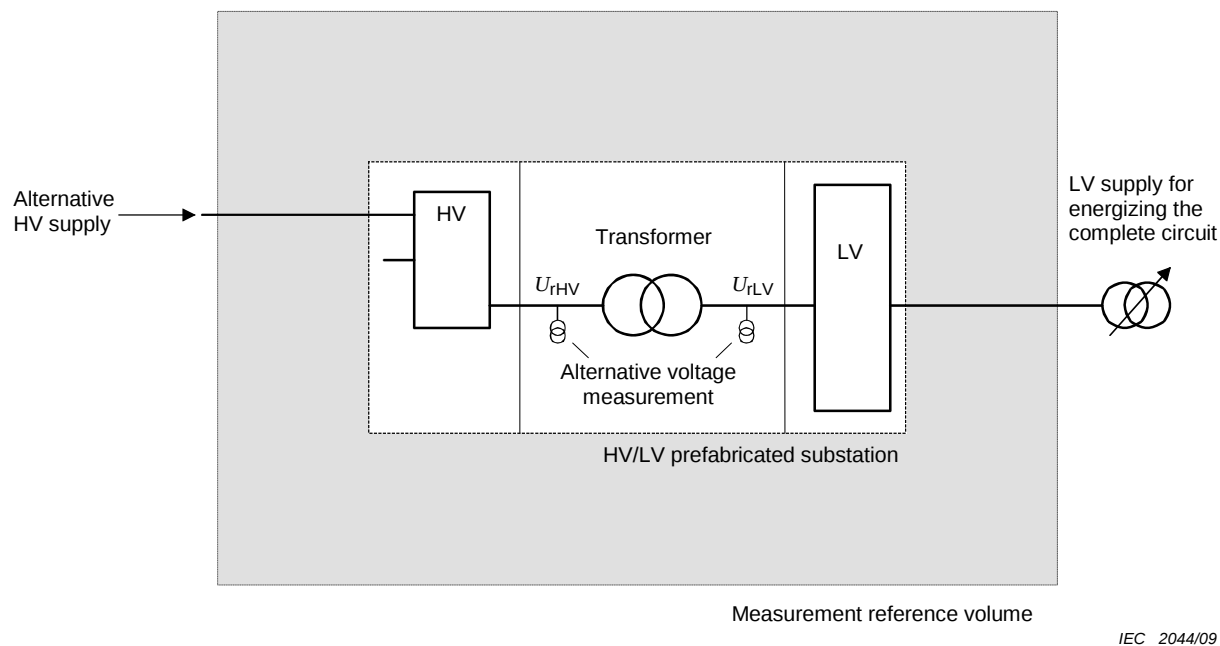
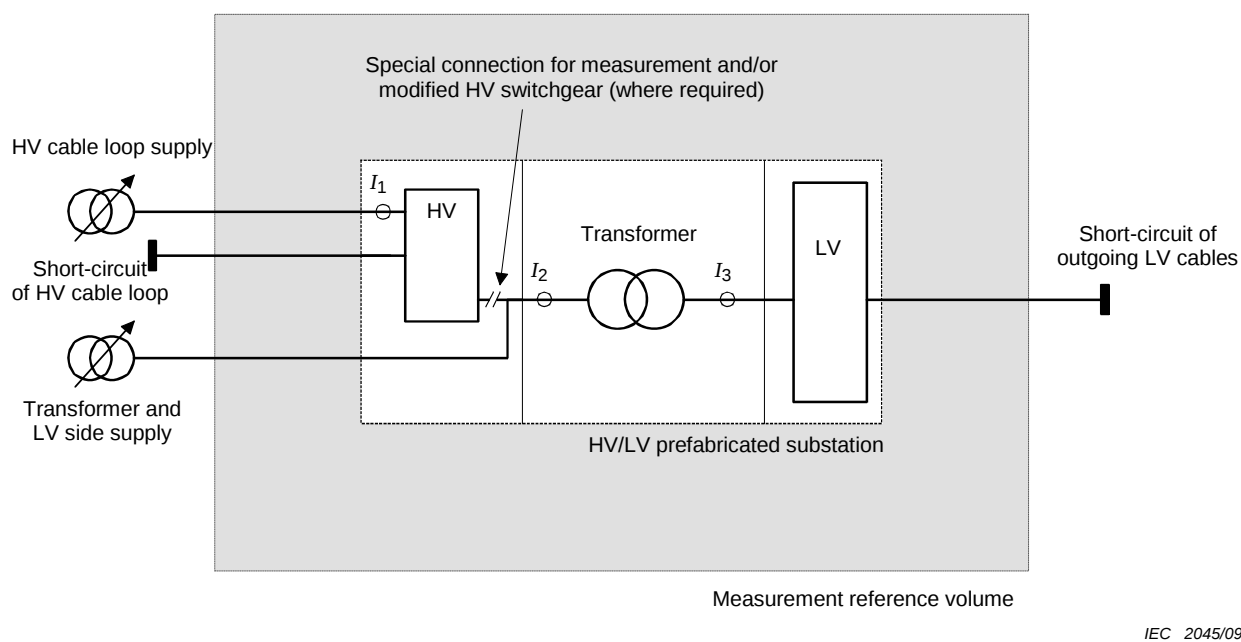


Figure 6a – Test circuit for electric field measurement

**Key**

- I_1 Rated normal current of HV cable loop
- I_2 Rated HV normal current of transformer
- I_3 Rated LV normal current of transformer

Figure 6b – Test circuit for magnetic field measurement

Figure 6 – Test circuit for electric and magnetic field measurement

The objective during the test is to reduce external influence, in order to characterize the equipment rather than the test circuit. To minimize the interfering background fields inside the MV, some provisions are made for the external connections to the test specimen. Preferably three-phase shielded cables on the HV side and 4-core cables on the LV side shall be used. If other cables are used they shall be arranged so that their near field is minimized. This cable arrangement shall be maintained to a sufficient distance outside the MV boundaries so that the background field level inside the MV is not affected.

Where the contribution of the field generated by the external connections is deemed to have significant influence on the measurement results (for example in a single phase system), it is allowed to subtract the field values due to the external connections from the actual measurement results. The method used shall be stated in the test report.

NOTE When no correction is made for the field generated by the external connections, the measured results will be an overestimate.

The type of cables and connections should represent those used in normal service conditions.

The HV cables shall leave the equipment perpendicular to the sides until they reach the boundary of the measurement reference volume.

The field generated by the short-circuit connection of the HV cable loop and the LV (outgoing) cable circuits shall not alter the field level at the boundary of the measurement reference volume. Therefore an appropriate distance shall be kept from the point of short-circuit to the MV boundary.

In the case of HV/LV prefabricated substations, the LV cables shall leave the equipment perpendicular to the sides until they reach the boundary of the measurement reference volume. The field generated by the short-circuit connection of the LV cables shall not alter the field level at the boundary of the measurement reference volume (MRV). Therefore an appropriate distance shall be kept from the point of short-circuit to the MRV boundary.

5.4.2 Additional provisions for HV/LV prefabricated substations

5.4.2.1 Electric field

The test voltage may be supplied from the LV side, as shown in Figure 6a, or alternatively, from the HV side.

5.4.2.2 Magnetic field

The current in the HV cable loop I_1 and the current in the transformer(s) circuit I_2 shall be synchronized; see Figure 6b.

A special arrangement or modified HV switchgear assembly may be required for the connections to perform the test.

6 Calculations

6.1 General

At power frequencies, the electric and magnetic fields are independent of each other. The magnetic flux density and electric field strength characteristics may therefore be calculated in separate studies.

This technical report is intended to give general guidance on the modelling of this equipment for the purpose of comparing one equipment with another. Detailed recommendations on how to execute the calculations are, however, beyond its scope, given the wide variety of

equipment and layouts, solution methods, software, practitioners and computing resources available.

Guidance on these matters is available from software manufacturers, in text books, papers and on-line, although detailed advice on how to model the specific equipment in the scope of this technical report is mainly limited to suppliers of specialist software.

For the purposes of this technical report, calculation is acceptable as an alternative to measurement – it is the responsibility of the customers to satisfy themselves that the calculations have been carried out to an acceptable accuracy (see 6.5).

Validation of calculations against the measurements described in Clause 5 is particularly recommended. Once a calculation has been validated against one equipment, it is generally acceptable to characterize similar equipment by calculation, without the need for measurements.

6.2 Software

Any software that solves the Biot-Savart relationship or Maxwell's equations is potentially suitable for the calculations of the electromagnetic fields for the equipment in the scope of this technical report.

Some software is specialized for this type of equipment, while some is general software for electromagnetic field calculation. It is not the purpose of this technical report to judge whether one software is better (in any sense – accuracy, ease of use, computational economy etc.) than another.

6.3 Calculation procedures

Calculations should be carried out for the evaluation requirements set out in Clause 4. If it is intended to perform measurements as well as calculations, the calculations should include significant components of the test set-up such as supply cables, to allow accurate comparisons.

The equipment in this scope is necessarily three-dimensional and it is recommended that only 3-dimensional models are used for the calculations. The equipment is also complex in layout and it is anticipated that accurate models will require considerable computing resources (memory and speed).

The equipment should be modelled as explicitly and comprehensively as possible, within the constraints of the solution method. In particular all field sources and large components should be included, and more detail will generally (although not always) lead to more accurate models.

In electric field calculations, metallic structures may be modelled as surfaces at a single voltage (zero if earthed), rather than having explicit material properties ascribed to them. By this token, a model of an equipment completely surrounded by a metallic enclosure will necessarily yield a zero external electric field. The cables leading to the equipment will be a source of electric field only if they are not screened and earthed.

6.4 Results

As a minimum, the documented results of the calculations should be those specified for the measurements in 5.3.2 and 5.3.3. Numerical calculations usually yield the field values everywhere in the model, so the calculation provider may agree with the customer to supply additional information such as field contour maps around the equipment.

Since the results described in Clause 5 include the locations of field maxima (hot spots) as well as magnitudes of the fields, the accuracy of the calculation results (see 6.5) should be judged on both these criteria.

In comparison with measurements, the calculated field values should agree to within $\pm 10\%$. Each calculated hot spot should be specified for an area of dimensions 10 % height x 10 % length of the measurement surface on which a measured hot spot is located (see Figure 3, Figure 4 and Figure A.1).

6.5 Validation

There is no accepted method of quantifying calculation error or uncertainty, since it has many components including inherent inaccuracy in the method, approximations in material and structural representations, meshing density and boundary conditions.

It is recommended that providers of calculations be required by the customer to demonstrate their capabilities in the applications covered by this technical report by reproducing benchmark calculations or test measurements.

Benchmark calculations with analytical solutions are particularly useful, because they have no numerical or other approximations, even though they are necessarily simpler than many practical problems. Examples of suitable problems with analytical solutions are given in Annex B.

As stated in 6.4, 90 % accuracy is acceptable. It should be borne in mind that comparisons of calculations with measurements necessarily incorporate the measurement uncertainty.

7 Documentation

The following information shall be given in the EMF evaluation.

7.1 Characteristics of the HV switchgear assembly or prefabricated substation

Type designation and ratings of the main components of prefabricated equipment, i.e.

- transformer/s,
- HV switchgear,
- LV switchgear,
- HV and LV interconnections.

7.2 Evaluation method

The chosen evaluation method shall be stated.

7.3 Presentation of the measurement results

The following information should be provided when measurement results are presented:

- identification of evaluation report;
- date and time of measurements;
- organization and persons who performed the measurement(s) ;
- identification of each measuring instrument: brand name, model (and serial number), calibration date, due date and certificate reference;
- product identification and rated values, including rated power of the substation and transformer connection symbol (vector group) ;

- operating conditions, including configuration of various switching devices and other equipment that may have different settings, earthing of the equipment;
- settings of the measurement equipment (e.g. measurement range, pass band, sampling frequency) ;
- environmental conditions (e.g. temperature or humidity);
- positions and currents of incoming and outgoing HV and LV cables;
- currents, voltages and frequency at each circuit on the product, and spatial disposition,
- background fields;
- location of hot spots, e.g. as shown in Annex A;
- the electric and magnetic field measurements shall be presented separately in the form of tables and graphs of field variation perpendicular to the hot spots;
- drawings or photographs which describe the area and locations where measurements are performed.

7.4 Presentation of the calculation results

The following information should be provided when calculation results are presented:

- identification of evaluation report;
- name, version and manufacturer of calculation software used;
- product identification and rated values, including rated power of the substation and transformer connection symbol (vector group) ;
- operating conditions including configuration of various switching devices and other equipment that may have different settings;
- description of assumptions and boundary conditions including earthing of the equipment;
- sufficient details to enable reproducibility of the calculation results;
- positions and currents of incoming and outgoing HV and LV cables if included in the study;
- description of magnitude, phase and location of all excitation voltages and currents; directions should be included for currents;
- location of hot spots, e.g. as shown in Annex A;
- the electric and magnetic field values shall be presented separately in the form of tables and graphs based on the field variation perpendicular to the hot spots.

Annex A (informative)

Presentation of E or B field measurement data – Example for a typical HV/LV pre-fabricated substation

A.1 General

The presentation method described in this annex may be used likewise for HV switchgear assemblies and HV/LV prefabricated substations.

A.2 Hot spot locations (see Figure A.1)

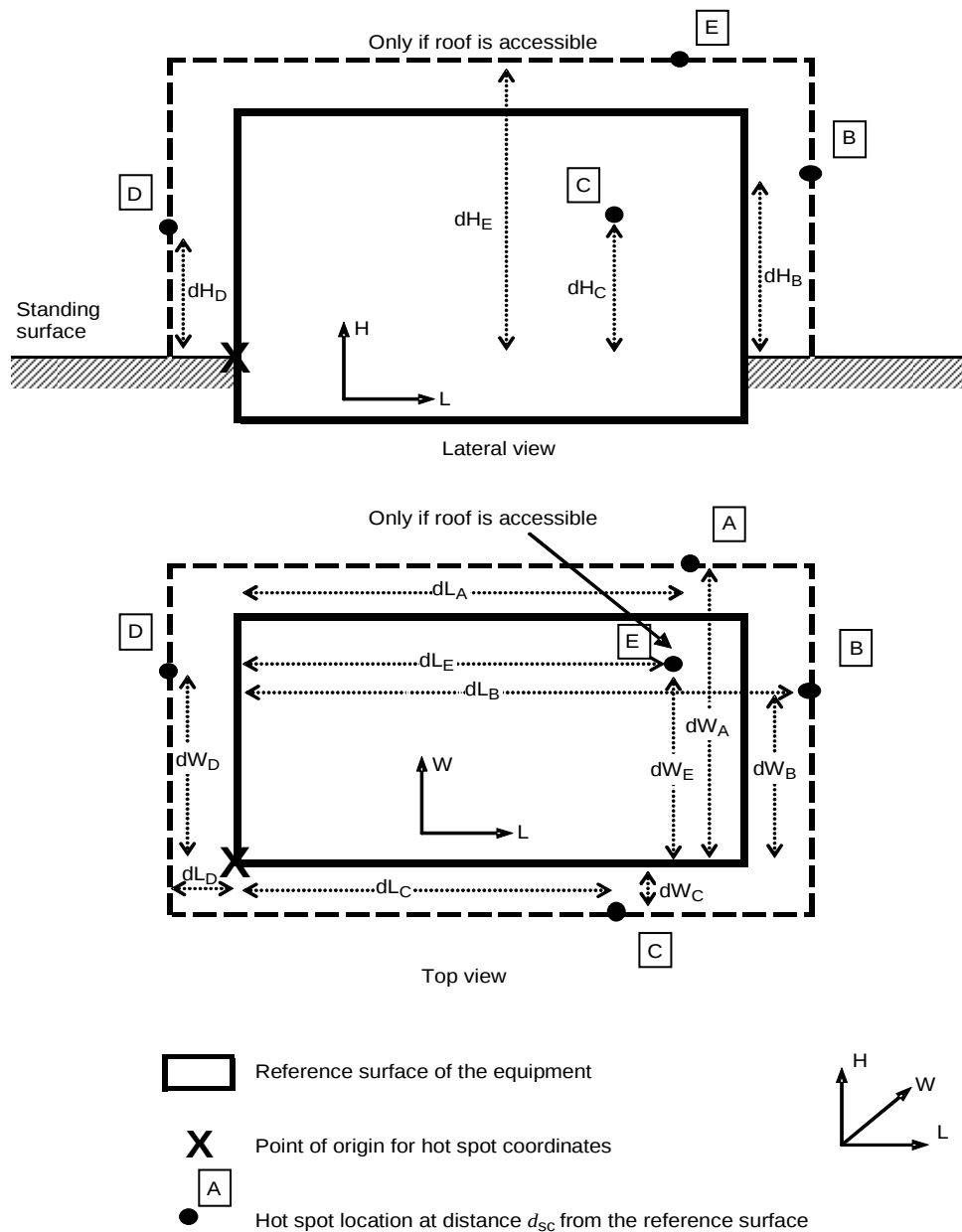


Figure A.1 – Hot spot locations representing the field maxima

A.3 Hot spot locations with its E or B field values

Distance to surface $d_{sc} = 0,2$ m

Table A.1 – Listing of the hot spot coordinates

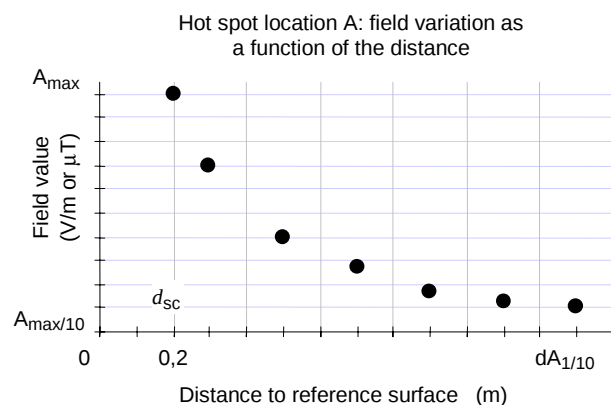
Hot spot location	Distance to reference point			Field value V/m or μ T
	Direction L m	Direction W m	Direction H m	
A	dL_A	dW_A	dH_A	A_{max}
B	dL_B	dW_B	dH_B	B_{max}
C	dL_C	dW_C	dH_C	C_{max}
D	dL_D	dW_D	dH_D	D_{max}
E	dL_E	dW_E	dH_E	E_{max}

A.4 Variation of the E or B field as a function of the distance

Table A.2 lists the field variation perpendicular to the accessible reference surface. The procedure for the other hot spot locations is identical. For graphical presentation, see Figure A.2.

Table A.2 – Variation of field values for one hot spot

Hot spot location	A
Distance to surface m	Field value V/m or μ T
d_{sc}	A_{max}
dA2	A2
dA3	A3
dA4	A4
dA5	A5
dA6	A6
$dA_{1/10}$	$A_{max/10}$



IEC 2047/09

Figure A.2 – Graphical presentation of the field variation

A.5 Field variation around substation at hot spot locations (see Figure A.3)

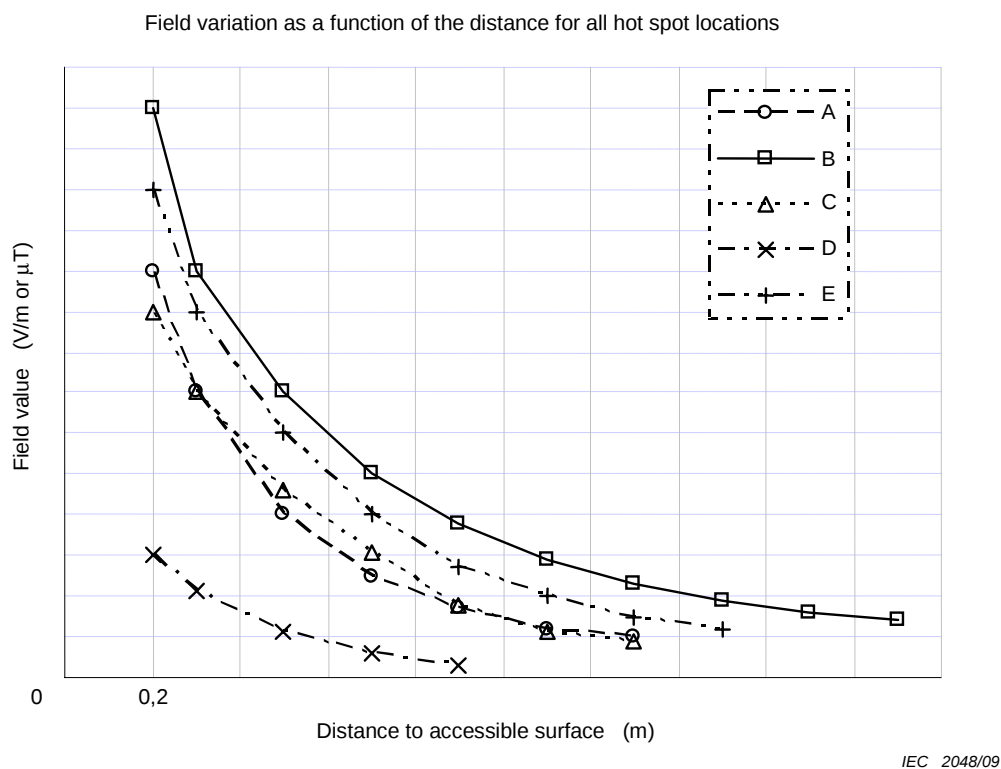


Figure A.3 – Example diagram for the field variation at hot spots

A.6 Background fields

The equipment is completely switched off.

Table A.3 – Background fields

	Field value V/m or μT	Remark
Allowable background field level	–	The maximum allowable background field level = 1/10 the lowest field value measured at the hot spot locations (see Figure A.1)
Measured background field level	–	

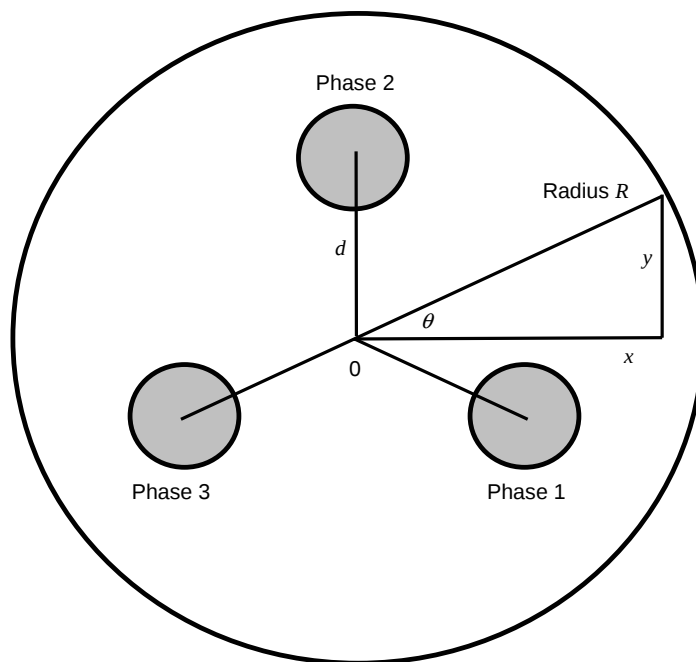
Annex B (informative)

Examples of analytical solutions to benchmark EMF calculations

B.1 Magnetic field

This annex presents the analytical solution of the magnetic field of a set of 3-phase currents in infinitely long lines. This solution is presented as an example of a calculation amenable to both analytical and numerical solution. It can therefore be used to benchmark software used for the calculations described in Clause 6.

The lines carrying the 3-phase currents are arranged symmetrically at a distance d from an origin at (0,0) in the x-y plane as shown in Figure B.1. The currents are flowing in the z-direction (perpendicularly to the plane of the diagram).



IEC 2049/09

Figure B.1 – Schematic for 3-phase magnetic field calculation

The centres of the 3 lines are therefore at $\left(\frac{d\sqrt{3}}{2}, \frac{-d}{2}\right)$, $(0,d)$ and $\left(\frac{-d\sqrt{3}}{2}, \frac{-d}{2}\right)$.

The magnetic field resulting from the 3 currents is calculated outside the cable, that is, at distances greater than $(d + \text{line radius})$ from the origin. In this simple analysis, the lines are considered to be of insignificant radius compared to the distance between them and the distance from the calculation point. In other words, the currents are considered to be flowing at a point at the centre of each line.

Ampère's law gives the magnetic field H at a distance R from a line carrying current I as

$$H = \frac{I}{2\pi R} \quad (\text{B.1})$$

Therefore a line at the origin (0,0) carrying a current $I_{pk}\cos(\omega t)$ would produce a magnetic field $H = \underline{j}H_x + \underline{j}H_y$ such that

$$H_x = \frac{-yI_{pk}\cos(\omega t)}{2\pi(x^2 + y^2)} \quad (\text{B.2a})$$

$$H_y = \frac{xI_{pk}\cos(\omega t)}{2\pi(x^2 + y^2)} \quad (\text{B.2b})$$

for $R = \sqrt{(x^2 + y^2)} > 0$ and $x = R\cos\theta$ and $y = R\sin\theta$.

The lines shown in Figure B.1 are all displaced by a radius d from the origin, so the following derivations are for $R > d$.

The field components for a line I displaced from the origin to coordinates (x_{dis}, y_{dis}) and carrying a current I_{phase} are derived from Equations (B.2a) and (B.2b) as

$$H_{xi} = \frac{-y_{local} I_{phase}}{2\pi((x_{local})^2 + (y_{local})^2)} \quad (\text{B.3a})$$

$$H_{yi} = \frac{x_{local} I_{phase}}{2\pi((x_{local})^2 + (y_{local})^2)} \quad (\text{B.3b})$$

where $x_{local} = x - x_{dis}$ and $y_{local} = y - y_{dis}$.

In this example, phase 1 is at $\left(\frac{d\sqrt{3}}{2}, \frac{-d}{2}\right)$ carrying a current $I_{pk}\cos(\omega t)$. Substituting these coordinates into Equations (B.3a) and (B.3b) gives

$$H_{x1} = \frac{-\left(y + \frac{d}{2}\right) I_{pk} \cos(\omega t)}{2\pi\left(\left(x - \frac{d\sqrt{3}}{2}\right)^2 + \left(y + \frac{d}{2}\right)^2\right)} \quad (\text{B.4a})$$

$$H_{y1} = \frac{\left(x - \frac{d\sqrt{3}}{2}\right) I_{pk} \cos(\omega t)}{2\pi\left(\left(x - \frac{d\sqrt{3}}{2}\right)^2 + \left(y + \frac{d}{2}\right)^2\right)} \quad (\text{B.4b})$$

Similarly, the field components for phase 2 at (0,d) carrying a current $I_{pk}\cos(\omega t - 120^\circ)$ are

$$H_{x2} = \frac{-(y-d) I_{pk} \cos(\omega t - 120^\circ)}{2\pi \left((x)^2 + (y-d)^2 \right)} \quad (\text{B.5a})$$

$$H_{y2} = \frac{(x) I_{pk} \cos(\omega t - 120^\circ)}{2\pi \left((x)^2 + (y-d)^2 \right)} \quad (\text{B.5b})$$

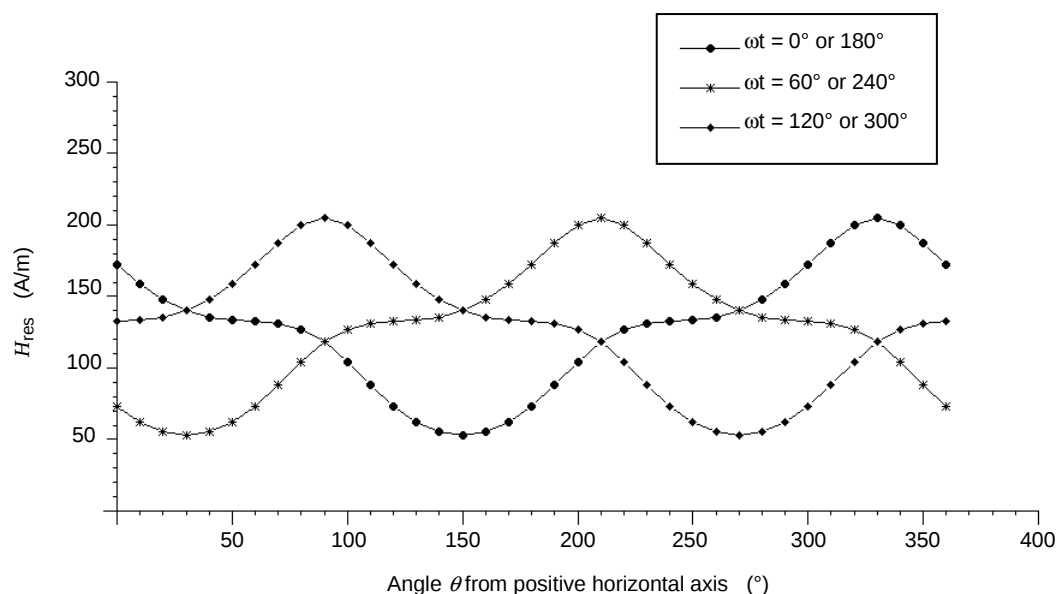
Finally the field components for phase 3 at $\left(\frac{-d\sqrt{3}}{2}, \frac{-d}{2} \right)$ carrying a current $I_{pk} \cos(\omega t + 120^\circ)$ are

$$H_{x3} = \frac{-\left(y + \frac{d}{2} \right) I_{pk} \cos(\omega t + 120^\circ)}{2\pi \left(\left(x + \frac{d\sqrt{3}}{2} \right)^2 + \left(y + \frac{d}{2} \right)^2 \right)} \quad (\text{B.6a})$$

$$H_{y3} = \frac{\left(x + \frac{d\sqrt{3}}{2} \right) I_{pk} \cos(\omega t + 120^\circ)}{2\pi \left(\left(x + \frac{d\sqrt{3}}{2} \right)^2 + \left(y + \frac{d}{2} \right)^2 \right)} \quad (\text{B.6b})$$

Thus the x- and y-components of magnetic field strength for this 3-phase system of currents at any value of time angle ωt are the sums of the individual 3-phase components. The resultant field strength is given by

$$H_{res} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^3 H_{xi} \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^3 H_{yi} \right)^2} \quad (\text{B.7})$$



IEC 2050/09

Figure B.2 – Variation of resultant magnetic field around 3-phase cable

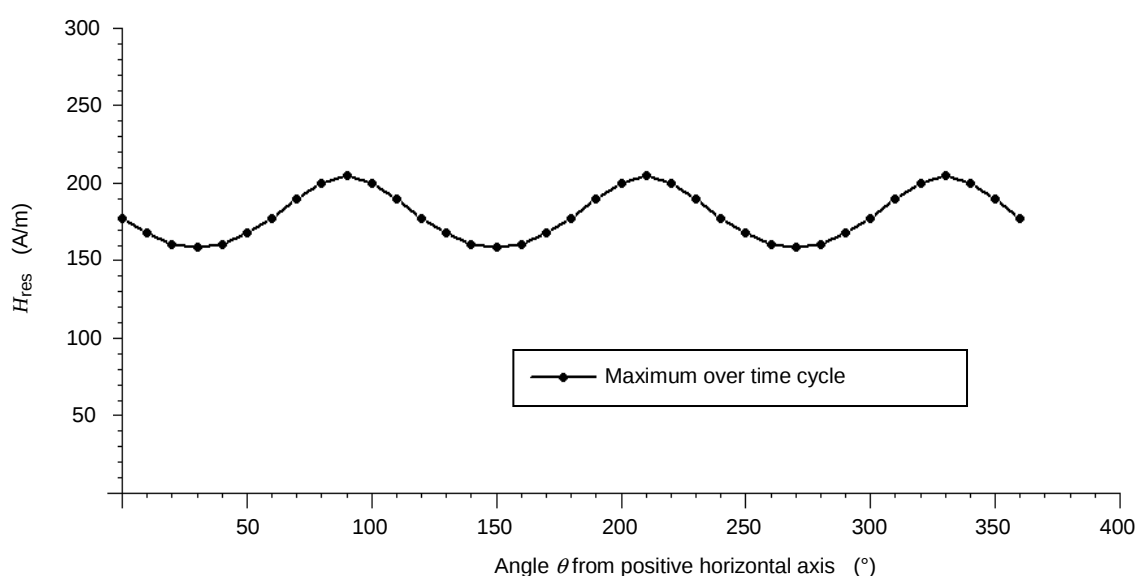
Figure B.2 shows the variation of the resultant magnetic field around the cable shown in Figure B.1 at a radius R of 1 m from the cable centre for various values of ωt , for a distance (d) of 0,5 m of each phase from the cable centre and a balanced 3-phase current with a peak value of 1 000 A. Table B.1 shows the values of the points shown in Figure B.2.

Table B.1 – Values of H_{res} for spatial angles θ and time angles ωt

Angle θ from $y = 0$	$\omega t = 0^\circ$ or 180°	$\omega t = 60^\circ$ or 240°	$\omega t = 120^\circ$ or 300°
0	172,296	73,394 91	132,424 9
10	158,693 8	62,259 55	133,355 6
20	147,946 2	55,377 49	135,683 5
30	140,361 5	53,051 65	140,361 5
40	135,6835	55,377 49	147,946 2
50	133,355 6	62,259 55	158,693 8
60	132,424 9	73,394 91	172,296
70	131,223 3	87,990 68	187,165 4
80	127,237 1	104,051	199,616 2
90	118,141 9	118,141 9	204,627 8
100	104,051	127,237 1	199,616 2
110	87,990 68	131,223 3	187,165 4
120	73,394 91	132,424 9	172,296
130	62,259 55	133,355 6	158,693 8
140	55,377 49	135,683 5	147,946 2
150	53,051 65	140,361 5	140,361 5
160	55,377 49	147,946 2	135,683 5
170	62,259 55	158,693 8	133,355 6
180	73,394 91	172,296	132,424 9

Angle θ from $y = 0$	ωt 0° or 180°	ωt 60° or 240°	ωt 120° or 300°
190	87,990 68	187,165 4	131,223 3
200	104,051	199,616 2	127,237 1
210	118,141 9	204,627 8	118,141 9
220	127,23 1	199,616 2	104,051
230	131,223 3	187,165 4	87,990 68
240	132,424 9	172,296	73,394 91
250	133,355 6	158,693 8	62,259 55
260	135,683 5	147,946 2	55,377 49
270	140,361 5	140,361 5	53,051 65
280	147,946 2	135,683 5	55,377 49
290	158,693 8	133,355 6	62,259 55
300	172,296	132,424 9	73,394 91
310	187,165 4	131,223 3	87,990 68
320	199,616 2	127,237 1	104,051
330	204,627 8	118,141 9	118,141 9
340	199,616 2	104,051	127,237 1
350	187,165 4	87,990 68	131,223 3
360	172,296	73,394 91	132,424 9

The maximum field strength over a time cycle at a given angular position ($H_{\max}$) can be found from the maximum value at that angular position of the family of curves of which Figure B.2 and Table B.1 show a subset. The variation of this maximum with angle θ around the cable is shown in Figure B.3.



IEC 2051/09

Figure B.3 – Maximum resultant magnetic field around 3-phase cable

The values of the points shown in Figure B.3 are given in Table B.2.

Table B.2 – Values of maximum H_{res} for spatial angles θ

Angle θ from $y = 0$	Maximum H_{res}
0	177,666 7
10	167,6491
20	161,303 6
30	159,154 9
40	161,303 6
50	167,649 1
60	177,666 7
70	189,725 3
80	200,293 6
90	204,627 8
100	200,293 6
110	189,725 3
120	177,666 7
130	167,649 1
140	161,303 6
150	159,154 9
160	161,303 6
170	167,649 1
180	177,666 7
190	189,725 3
200	200,293 6
210	204,627 8
220	200,293 6
230	189,725 3
240	177,666 7
250	167,649 1
260	161,303 6
270	159,154 9
280	161,303 6
290	167,649 1
300	177,666 7
310	189,725 3
320	200,293 6
330	204,627 8
340	200,293 6
350	189,725 3
360	177,666 7

The values of the maximum resultant field given in Table B.2 can be calculated directly from Equations (B.4) to (B.7) as shown below.

For phase 1, Equations (B.4a) and (B.4b) can be rewritten:

$$H_{x1} = A \cos(\omega t) \quad (\text{B.8a})$$

where

$$A = \frac{-\left(y + \frac{d}{2}\right) I_{pk}}{2\pi \left(\left(x - \frac{d\sqrt{3}}{2}\right)^2 + \left(y + \frac{d}{2}\right)^2 \right)}$$

and

$$H_{y1} = C \cos(\omega t) \quad (\text{B.8b})$$

where

$$C = \frac{\left(x - \frac{d\sqrt{3}}{2}\right) I_{pk}}{2\pi \left(\left(x - \frac{d\sqrt{3}}{2}\right)^2 + \left(y + \frac{d}{2}\right)^2 \right)}$$

or

phase 2:

$$H_{x2} = E \cos(\omega t) + F \sin(\omega t) \quad (\text{B.9a})$$

where

$$E = \frac{-(y-d) I_{pk} \cos(120^\circ)}{2\pi \left((x)^2 + (y-d)^2 \right)} \quad \text{and} \quad F = \frac{-(y-d) I_{pk} \sin(120^\circ)}{2\pi \left((x)^2 + (y-d)^2 \right)}$$

and

$$H_{y2} = G \cos(\omega t) + H \sin(\omega t) \quad (\text{B.9b})$$

where

$$G = \frac{(x) I_{pk} \cos(120^\circ)}{2\pi \left((x)^2 + (y-d)^2 \right)} \quad \text{and} \quad H = \frac{(x) I_{pk} \sin(120^\circ)}{2\pi \left((x)^2 + (y-d)^2 \right)}$$

phase 3:

$$H_{x3} = K \cos(\omega t) + L \sin(\omega t) \quad (\text{B.10a})$$

where

$$K = \frac{-\left(y + \frac{d}{2}\right) I_{pk} \cos(120^\circ)}{2\pi \left(\left(x + \frac{d\sqrt{3}}{2}\right)^2 + \left(y + \frac{d}{2}\right)^2 \right)} \quad \text{and} \quad L = \frac{\left(y + \frac{d}{2}\right) I_{pk} \sin(120^\circ)}{2\pi \left(\left(x + \frac{d\sqrt{3}}{2}\right)^2 + \left(y + \frac{d}{2}\right)^2 \right)}$$

and

$$H_{y3} = M \cos(\omega t) + N \sin(\omega t) \quad (\text{B.10b})$$

where

$$M = \frac{\left(x + \frac{d\sqrt{3}}{2}\right) I_{pk} \cos(120^\circ)}{2\pi \left(\left(x + \frac{d\sqrt{3}}{2}\right)^2 + \left(y + \frac{d}{2}\right)^2 \right)} \quad \text{and} \quad N = \frac{-\left(x + \frac{d\sqrt{3}}{2}\right) I_{pk} \sin(120^\circ)}{2\pi \left(\left(x + \frac{d\sqrt{3}}{2}\right)^2 + \left(y + \frac{d}{2}\right)^2 \right)}$$

The resultant x-component of H is therefore

$$\begin{aligned} H_x &= H_{x1} + H_{x2} + H_{x3} \\ &= (A + E + K)\cos(\omega t) + (F + L)\sin(\omega t) \\ &= P\cos(\omega t) + Q\sin(\omega t) \end{aligned}$$

where $P = A + E + K$

and $Q = F + L$

while the resultant y-component of H is

$$\begin{aligned} H_y &= H_{y1} + H_{y2} + H_{y3} \\ &= (C + G + M) \cos(\omega t) + (H + N) \sin(\omega t) \\ &= R\cos(\omega t) + S\sin(\omega t) \end{aligned}$$

where $R = C + G + M$

and $S = H + N$

The resultant is H_{res} as in Equation (B.7), so

$$H_{res}^2 = (P \cos(\omega t) + Q \sin(\omega t))^2 + (R \cos(\omega t) + S \sin(\omega t))^2 \quad (\text{B.11})$$

which expands to

$$H_{res}^2 = (P^2 + R^2)\cos^2(\omega t) + (Q^2 + S^2)\sin^2(\omega t) + 2(PQ + RS)\sin(\omega t)\cos(\omega t) \quad (\text{B.12})$$

and thence to

$$H_{res}^2 = \left(\frac{P^2 + R^2 + Q^2 + S^2}{2} \right) + \left(\frac{P^2 + R^2 - Q^2 - S^2}{2} \right) \cos 2(\omega t) + (PQ + RS) \sin 2(\omega t) \quad (B.13)$$

The maximum value of H_{res}^2 is therefore given by

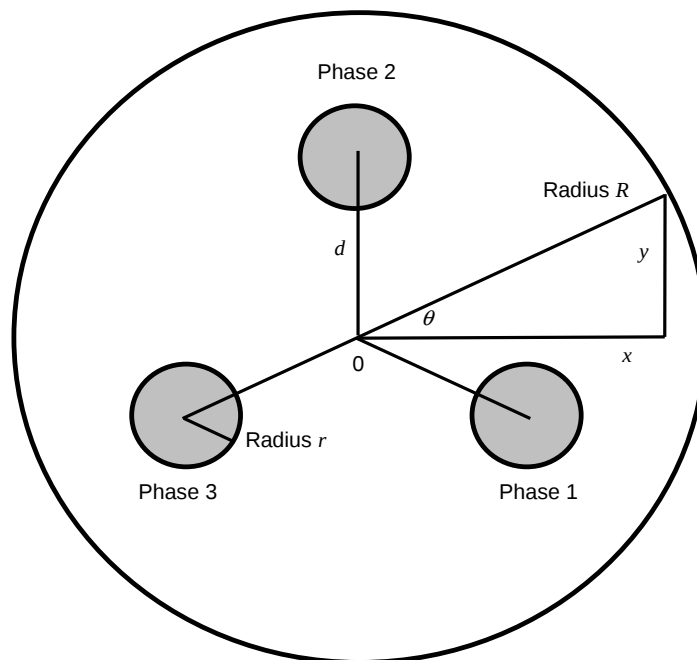
$$(H_{res}^2)_{\max} = \left(\frac{P^2 + R^2 + Q^2 + S^2}{2} \right) + \sqrt{\left(\frac{P^2 + R^2 - Q^2 - S^2}{2} \right)^2 + (PQ + RS)^2} \quad (B.14)$$

and the maximum value of H_{res} itself is therefore the square root of Equation B.14. The graph of $(H_{res})_{\max}$ is Figure B.3 and the corresponding values are given in Table B.2.

B.2 Electric field

This annex presents the analytical solution of the electric field of a set of 3-phase voltages on infinitely long lines. This solution is presented as an example of a calculation amenable to both analytical and numerical solution. It can therefore be used to benchmark software used for the calculations described in Clause 6.

The lines carrying the 3-phase voltages are arranged symmetrically at a distance d from an origin at $(0,0)$ in the x - y plane as shown in Figure B.4. The equivalent charge on each line is distributed in the z -direction (perpendicularly to the plane of the diagram).



IEC 2052/09

Figure B.4 – Schematic for 3-phase electric field calculation

The centres of the 3 lines are therefore at $\left(\frac{d\sqrt{3}}{2}, \frac{-d}{2} \right)$, $(0,d)$ and $\left(\frac{-d\sqrt{3}}{2}, \frac{-d}{2} \right)$.

The electric field resulting from the 3 voltages is calculated outside the cable, that is, at distances R greater than $(d + r)$ from the origin, where r is the line (conductor) radius.

The separation (s) between each pair of lines is given by

$$s = \sqrt{\left(\frac{d\sqrt{3}}{2}\right)^2 + \left(\frac{3d}{2}\right)^2} = \sqrt{3}d \quad (\text{B.15})$$

From Gauss' Law, the electric field E at a distance R from a line carrying charge $\lambda(\text{C/m})$ is

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 R} \quad (\text{B.16})$$

where ϵ_0 is the permittivity of free space $\approx 8,854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$.

Therefore a line at the origin (0,0) carrying a charge $\lambda_{pk}\cos(\omega t)$ would produce an electric field $E = \underline{i}E_x + \underline{j}E_y$ such that

$$E_x = \frac{x\lambda_{pk}\cos(\omega t)}{2\pi\epsilon_0 R^2} \quad (\text{B.17a})$$

$$E_y = \frac{y\lambda_{pk}\cos(\omega t)}{2\pi\epsilon_0 R^2} \quad (\text{B.17b})$$

R is the distance from the centre of the line, so

$$R^2 = x^2 + y^2$$

In most electric field calculations, it is the voltage that is known, not the charge. It can be shown that the relationship between charge and voltage for line i of a balanced 3-phase system can be expressed as

$$\frac{\lambda_i}{2\pi\epsilon_0} = \frac{V_i}{\ln\left(\frac{s}{r}\right)} \quad (\text{B.18})$$

where

r is the line radius:

s is the line separation $= \sqrt{3}d$;

V_i is the voltage of line i to ground.

$$V_i + V_j + V_k = 0$$

$\{i \ j \ k\} = \{1 \ 2 \ 3\}$ then $\{2 \ 3 \ 1\}$ then $\{3 \ 1 \ 2\}$ as usual [1].

The lines shown in Figure B.4 are all displaced by a radius d from the origin, so the following derivations are for $R > (d + r)$.

The field components for a line displaced from the origin to coordinates $(x_{\text{dis}}, y_{\text{dis}})$ and carrying a charge λ_{phase} are derived from Equations (B.17a) and (B.17b) as

$$E_{xi} = \frac{x_{\text{local}} \lambda_{\text{phase}}}{2\pi\epsilon_o R_{\text{local}}^2} \quad (\text{B.19a})$$

$$E_{yi} = \frac{y_{\text{local}} \lambda_{\text{phase}}}{2\pi\epsilon_o R_{\text{local}}^2} \quad (\text{B.19b})$$

where

$i = 1, 2, 3;$

$x_{\text{local}} = x - x_{\text{dis}}$ and $y_{\text{local}} = y - y_{\text{dis}};$

$$R_{\text{local}}^2 = x_{\text{local}}^2 + y_{\text{local}}^2.$$

Substituting Equation (B.18) into Equations (B.19a) and (B.19b) yields expressions for electric field strength in terms of voltage to ground:

$$E_{xi} = \frac{x_{\text{local}} V_i}{\ln\left(\frac{s}{r}\right) R_{\text{local}}^2} \quad (\text{B.20a})$$

$$E_{yi} = \frac{y_{\text{local}} V_i}{\ln\left(\frac{s}{r}\right) R_{\text{local}}^2} \quad (\text{B.20b})$$

In this example, phase 1 is at $x_{\text{dis}} = \left(\frac{d\sqrt{3}}{2}\right)$ $y_{\text{dis}} = \left(\frac{-d}{2}\right)$ at a voltage $V_1 = V_{\text{pk}}\cos(\omega t)$, so

$$x_{\text{local}} = x - \frac{d\sqrt{3}}{2}$$

$$y_{\text{local}} = y + \frac{d}{2}$$

$$R_{\text{local}}^2 = \left(x - \frac{d\sqrt{3}}{2}\right)^2 + \left(y + \frac{d}{2}\right)^2$$

Similarly, phase 2 is at $x_{\text{dis}} = 0$ $y_{\text{dis}} = d$ at a voltage $V_2 = V_{\text{pk}}\cos(\omega t - 120^\circ)$, so

$$x_{\text{local}} = x$$

$$y_{\text{local}} = y - d$$

$$R_{\text{local}}^2 = (x)^2 + (y - d)^2$$

Finally, phase 3 is at $x_{\text{dis}} = \left(\frac{-d\sqrt{3}}{2} \right)$ $y_{\text{dis}} = \left(\frac{-d}{2} \right)$ at a voltage $V_3 = V_{\text{pk}} \cos(\omega t + 120^\circ)$, so

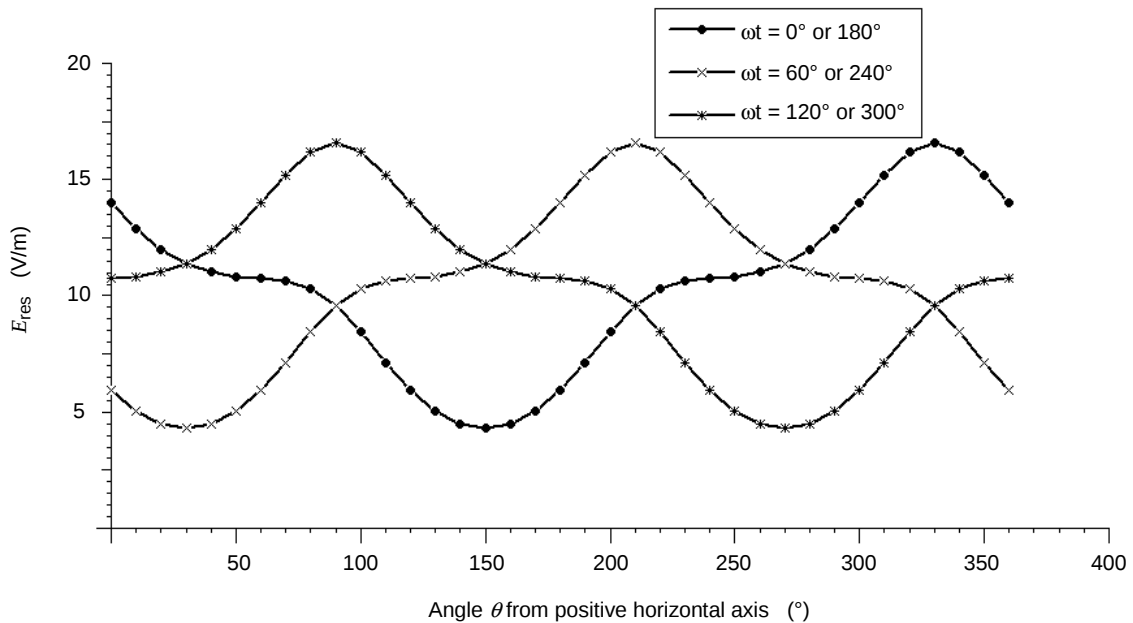
$$x_{\text{local}} = x + \frac{d\sqrt{3}}{2}$$

$$y_{\text{local}} = y + \frac{d}{2}$$

$$R_{\text{local}}^2 = \left(x + \frac{d\sqrt{3}}{2} \right)^2 + \left(y + \frac{d}{2} \right)^2$$

Thus the x - and y -components of electric field strength for this 3-phase system of voltages at any value of time angle ωt are the sums of the individual 3-phase components. The resultant field strength is given by

$$E_{\text{res}} = \sqrt{\left[\left(\sum_{i=1}^3 E_{xi} \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^3 E_{yi} \right)^2 \right]} \quad (\text{B.21})$$



IEC 2053/09

Figure B.5 – Variation of resultant electric field around 3-phase cable

Figure B.5 shows the variation of the resultant electric field around the cable shown in Figure B.4 for various values of ωt . In this case, the parameters are as follows:

$R = 0,04 \text{ m}$ = calculation radius from the cable centre;

$d = 0,02 \text{ m}$ = distance of each phase from the cable centre;

$s = 0,0346 \text{ m}$ = separation of 2 lines;

$r = 0,005 \text{ m}$ = line radius;

$V_{pk} = 1 \text{ V}$.

Table B.3 gives the values of the points shown in Figure B.5.

Table B.3 – Values of E_{res} for spatial angles θ and time angles ωt

Angle θ from $y = 0$	$\omega t 0^\circ$ or 180°	$\omega t 60^\circ$ or 240°	$\omega t 120^\circ$ or 300°
0	13,982 3	5,956 2	10,746 7
10	12,878 5	5,052 5	10,822 2
20	12,006 3	4,494 0	11,011 1
30	11,390 7	4,305 3	11,390 7
40	11,011 1	4,494 0	12,006 3
50	10,822 2	5,052 5	12,878 5
60	10,746 7	5,956 2	13,982 3
70	10,649 2	7,140 7	15,189 0
80	10,325 7	8,444 0	16,199 4
90	9,587 6	9,587 6	16,606 1
100	8,444 0	10,325 7	16,199 4
110	7,140 7	10,649 2	15,189 0
120	5,956 2	10,746 7	13,982 3
130	5,052 5	10,822 2	12,878 5
140	4,494 0	11,011 1	12,006 3
150	4,305 3	11,390 7	11,390 7
160	4,494 0	12,006 3	11,011 1
170	5,052 5	12,878 5	10,822 2
180	5,956 2	13,982 3	10,746 7
190	7,140 7	15,189 0	10,649 2
200	8,444 0	16,199 4	10,325 7
210	9,587 6	16,606 1	9,587 6
220	10,325 7	16,199 4	8,444 0
230	10,649 2	15,189 0	7,140 7
240	10,746 7	13,982 3	5,956 2
250	10,822 2	12,878 5	5,052 5
260	11,011 1	12,006 3	4,494 0
270	11,390 7	11,390 7	4,305 3
280	12,006 3	11,011 1	4,494 0
290	12,878 5	10,822 2	5,052 5
300	13,982 3	10,746 7	5,956 2
310	15,189 0	10,649 2	7,140 7
320	16,199 4	10,325 7	8,444 0
330	16,606 1	9,587 6	9,587 6
340	16,199 4	8,444 0	10,325 7
350	15,189 0	7,140 7	10,649 2
360	13,982 3	5,956 2	10,746 7

The maximum field strength over a time cycle at a given angular position (E_{max}) can be found

from the maximum value at that angular position of the family of curves of which Figure B.6 and Table B.3 show a subset. The variation of this maximum with angle θ around the cable is shown in Figure B.6.

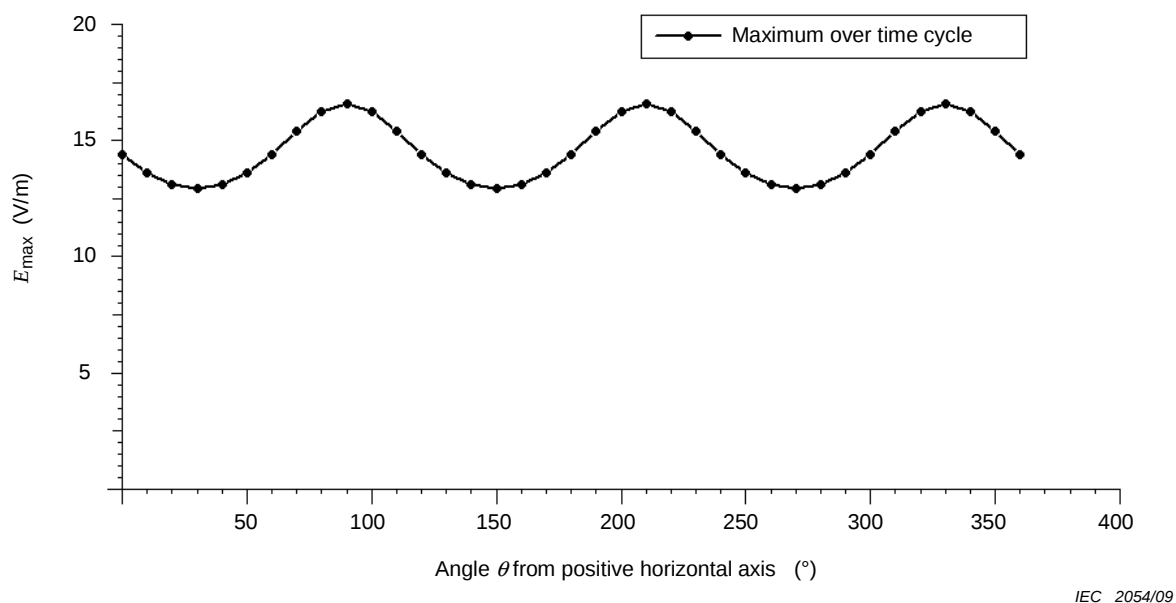


Figure B.6 – Maximum resultant electric field around 3-phase cable

The values of the points shown in Figure B.6 are given in Table B.4.

Table B.4 – Values of maximum E for spatial angles θ

Angle θ from $y = 0$	Maximum E V/m
0	14,418 2
10	13,605 2
20	13,090 3
30	12,915 9
40	13,090 3
50	13,605 2
60	14,418 2
70	15,396 8
80	16,254 4
90	16,606 1
100	16,254 4
110	15,396 8
120	14,418 2
130	13,605 2
140	13,090 3
150	12,915 9
160	13,090 3
170	13,605 2

Angle θ from $y = 0$	Maximum E V/m
180	14,418 2
190	15,396 8
200	16,254 4
210	16,606 1
220	16,254 4
230	15,396 8
240	14,418 2
250	13,605 2
260	13,090 3
270	12,915 9
280	13,090 3
290	13,605 2
300	14,418 2
310	15,396 8
320	16,254 4
330	16,606 1
340	16,254 4
350	15,396 8
360	14,418 2

The values of maximum resultant field given in Table B.4 can be calculated directly from Equations B.20a, B.20b and B.21 as shown below.

For phase 1, Equations (B.20a) and (B.20b) can be rewritten:

$$E_{x1} = A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t) \quad (\text{B.22a})$$

where

$$A = \frac{x_{\text{local}} V_{\text{pk}}}{\ln\left(\frac{s}{r}\right) R_{\text{local}}^2}$$

$B=0$

and

$$E_{y1} = C \cos(\omega t) + D \sin(\omega t) \quad (\text{B.22b})$$

where

$$C = \frac{y_{\text{local}} V_{\text{pk}}}{\ln\left(\frac{s}{r}\right) R_{\text{local}}^2}$$

$D = 0$

For phase 2, Equations (B.20a) and (B.20b) can be rewritten:

$$E_{x2} = E \cos(\omega t) + F \sin(\omega t) \quad (\text{B.23a})$$

where

$$E = \frac{x_{\text{local}} V_{\text{pk}} \cos(120^\circ)}{\ln\left(\frac{s}{r}\right) R_{\text{local}}^2}$$

$$F = \frac{x_{\text{local}} V_{\text{pk}} \sin(120^\circ)}{\ln\left(\frac{s}{r}\right) R_{\text{local}}^2}$$

and

$$E_{y2} = G \cos(\omega t) + H \sin(\omega t) \quad (\text{B.23b})$$

where

$$G = \frac{y_{\text{local}} V_{\text{pk}} \cos(120^\circ)}{\ln\left(\frac{s}{r}\right) R_{\text{local}}^2}$$

$$H = \frac{y_{\text{local}} V_{\text{pk}} \sin(120^\circ)}{\ln\left(\frac{s}{r}\right) R_{\text{local}}^2}$$

For phase 3, Equations (B.20a) and (B.20b) can be rewritten:

$$E_{x3} = K \cos(\omega t) + L \sin(\omega t) \quad (\text{B.24a})$$

where

$$K = \frac{x_{\text{local}} V_{\text{pk}} \cos(120^\circ)}{\ln\left(\frac{s}{r}\right) R_{\text{local}}^2}$$

$$L = -\frac{x_{\text{local}} V_{\text{pk}} \sin(120^\circ)}{\ln\left(\frac{s}{r}\right) R_{\text{local}}^2}$$

and

$$E_{y3} = M \cos(\omega t) + N \sin(\omega t) \quad (\text{B.24b})$$

where

$$M = \frac{y_{local} V_{pk} \cos(120^\circ)}{\ln\left(\frac{s}{r}\right) R_{local}^2}$$

$$N = -\frac{y_{local} V_{pk} \sin(120^\circ)}{\ln\left(\frac{s}{r}\right) R_{local}^2}$$

The resultant x-component of E is therefore

$$\begin{aligned} E_x &= E_{x1} + E_{x2} + E_{x3} \\ &= (A + E + K)\cos(\omega t) + (B + F + L)\sin(\omega t) \\ &= P\cos(\omega t) + Q\sin(\omega t) \end{aligned}$$

where $P = A + E + K$

and $Q = B + F + L$

while the resultant y-component of E is

$$\begin{aligned} E_y &= E_{y1} + E_{y2} + E_{y3} \\ &= (C + G + M)\cos(\omega t) + (D + H + N)\sin(\omega t) \\ &= R\cos(\omega t) + S\sin(\omega t) \end{aligned}$$

where $R = C + G + M$

and $S = D + H + N$

The resultant is E_{res} as in Equation (B.21), so

$$E_{res}^2 = (P\cos(\omega t) + Q\sin(\omega t))^2 + (R\cos(\omega t) + S\sin(\omega t))^2 \quad (B.25)$$

which expands to

$$E_{res}^2 = (P^2 + R^2)\cos^2(\omega t) + (Q^2 + S^2)\sin^2(\omega t) + 2(PQ + RS)\sin(\omega t)\cos(\omega t) \quad (B.26)$$

and thence to

$$E_{res}^2 = \left(\frac{P^2 + R^2 + Q^2 + S^2}{2} \right) + \left(\frac{P^2 + R^2 - Q^2 - S^2}{2} \right) \cos 2(\omega t) + (PQ + RS) \sin 2(\omega t) \quad (B.27)$$

The maximum value of E_{res}^2 is therefore given by

$$(E_{res}^2)_{max} = \left(\frac{P^2 + R^2 + Q^2 + S^2}{2} \right) + \sqrt{\left(\frac{P^2 + R^2 - Q^2 - S^2}{2} \right)^2 + (PQ + RS)^2} \quad (B.28)$$

and the $E_{\max}$ is therefore the square root of Equation (B.28). The graph of $E_{\max}$ is Figure B.6 and the corresponding values are given in Table B.4.

Bibliography

- [1] J.D. Kraus
Electromagnetics
McGraw-Hill, New York 1984

 - [2] IEC 62110, *Electric and magnetic field levels generated by AC power systems – Measurement procedures with regard to public exposure*
-

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	48
INTRODUCTION.....	50
1 Domaine d'application	51
2 Références normatives.....	51
3 Termes and définitions	52
4 Exigences pour les évaluations	53
4.1 Généralités.....	53
4.2 Méthodes d'évaluation.....	54
4.3 Evaluation des champs électriques.....	54
4.3.1 Ensembles d'appareillages HT	54
4.3.2 Postes préfabriqués HT/BT.....	54
4.4 Evaluation des champs magnétiques.....	54
4.4.1 Ensembles d'appareillages HT	54
4.4.2 Postes préfabriqués HT/BT.....	55
5 Mesures	56
5.1 Généralités.....	56
5.2 Instruments de mesure	56
5.3 Procédures de mesure	57
5.3.1 Généralités.....	57
5.3.2 Champ électrique	57
5.3.3 Champ magnétique	60
5.3.4 Champ de bruit de fond	60
5.3.5 Facteurs d'environnement	60
5.4 Organisation des mesures.....	61
5.4.1 Généralités.....	61
5.4.2 Dispositions complémentaires pour les postes préfabriqués HT/BT	64
6 Calculs	64
6.1 Généralités.....	64
6.2 Logiciels.....	65
6.3 Procédures de calcul.....	65
6.4 Résultats.....	66
6.5 Validation	66
7 Documentation	66
7.1 Caractéristiques de l'ensemble d'appareillages HT ou du poste préfabriqué.....	66
7.2 Méthode d'évaluation	66
7.3 Présentation des résultats de mesure.....	67
7.4 Présentation des résultats de calcul	67
Annexe A (informative) Présentation des valeurs de mesures de champ E ou B – Exemple pour un poste préfabriqué HT/BT typique	68
Annexe B (informative) Exemple de résolution analytique pour l'évaluation de la performance des calculs de champ électromagnétiques.....	71
Bibliographie.....	89
Figure 1 – Exemple de configuration des circuits d'essai permettant d'obtenir le champ magnétique externe maximum pour un ensemble d'appareillages et/ou un poste préfabriqué.....	55

Figure 2 – Surface de référence (SR) d'un équipement de forme irrégulière	57
Figure 3 – Zones de balayage pour trouver les points chauds	58
Figure 4 – Détermination des variations de champ en fonction de la distance aux localisations de points chauds (perpendiculairement à la surface de référence)	59
Figure 5 – Organisation, pour les essais, des composants principaux, des câbles externes, des endroits de points chauds et du volume de mesure	62
Figure 6 – Circuits d'essai pour les mesures de champ électrique et magnétique	63
Figure A.1 – Localisation des points chauds représentant les maximum de champ sur les faces accessibles	68
Figure A.2 – Présentation graphique de la variation de champ	69
Figure A.3 – Exemple de diagramme pour la variation de champ aux points chauds	70
Figure B.1 – Schéma pour le calcul des champs magnétiques triphasés	71
Figure B.2 – Variation de la résultante du champ magnétique autour d'un câble triphasé	74
Figure B.3 – Valeur maximum du champ magnétique résultant autour d'un câble triphasé	75
Figure B.4 – Schéma pour le calcul des champs électriques triphasés	79
Figure B.5 – Variation de la résultante du champ électrique autour d'un câble triphasé	82
Figure B.6 – Valeur maximum du champ électrique résultant autour d'un câble triphasé	84
Tableau A.1 – Liste des coordonnées des points chauds	69
Tableau A.2 – Variation des valeurs de champ pour un point chaud	69
Tableau A.3 – Champs de bruit de fond	70
Tableau B.1 – Valeurs du champ magnétique résultant pour phases θ et phases instantanées ωt	74
Tableau B.2 – Valeurs de maximum de champ magnétique résultant en fonction de la phase θ	76
Tableau B.3 – Valeurs du champ électrique résultant pour phases θ et phases instantanées ωt	83
Tableau B.4 – Valeurs de maximum de champ électrique résultant en fonction de la phase θ	85

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

APPAREILLAGE À HAUTE TENSION –

Partie 208: Méthodes de quantification des champs électromagnétiques à fréquence industrielle en régime établi générés par les ensembles d'appareillages HT et les postes préfabriqués HT/BT

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de la CEI"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de la CEI intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de la CEI se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de la CEI. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que la CEI s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; la CEI ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de la CEI dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de la CEI et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) La CEI 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 la CEI. La CEI 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 la CEI, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de la CEI, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de la CEI ou de toute autre Publication de la CEI, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de la CEI peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La tâche principale des comités d'études de la CEI est l'élaboration des Normes internationales. Toutefois, un comité d'études peut proposer la publication d'un rapport technique lorsqu'il a réuni des données de nature différente de celles qui sont normalement publiées comme Normes internationales, cela pouvant comprendre, par exemple, des informations sur l'état de la technique.

Le rapport technique CEI 62271-208 a été établie par le sous-comité 17C: Ensembles d'appareillages à haute tension, du comité d'études 17 de la CEI: Appareillage.

Dans ce rapport technique, le mot "devoir" est utilisé dans un sens conditionnel, pour le cas où ce rapport technique est appliqué.

Le texte de ce rapport technique est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
17C/450/FDIS	17C/462/RVD

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

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/CEI, Partie 2.

Une liste de toutes les parties de la série CEI 62271, présentée sous le titre général *Appareillage à haute tension*, peut être consultée sur le site web de la CEI.

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

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

INTRODUCTION

Les constructeurs de matériels de réseaux d'alimentation électrique peuvent être amenés à fournir de la documentation à propos des caractéristiques de champ électromagnétique pour permettre aux utilisateurs

- d'évaluer les conditions de champ électromagnétique et ainsi aider à la planification, l'installation, la rédaction des instructions d'utilisation, et l'entretien,
- de prendre des mesures pour se conformer aux exigences ou réglementations à propos des champs électromagnétiques,
- de comparer différents produits pour autant que leur niveau de champ électromagnétique soit concerné.

Le but de ce rapport technique est de décrire une méthodologie pour l'évaluation (mesures ou calculs) des champs électromagnétiques générés.

Les caractéristiques du champ électromagnétique d'un équipement comprennent les valeurs de champs électrique et magnétique autour de ses surfaces accessibles.

Les caractéristiques de champ électromagnétique définies dans ce rapport technique se rapportent à un seul produit comme défini dans le domaine d'application. Dans des installations réelles, plusieurs sources peuvent se superposer, ainsi, sur site, les champs électromagnétiques résultants peuvent varier de manière significative par rapport aux caractéristiques du seul produit.

Ce rapport technique ne définit pas un essai obligatoire pour les produits mentionnés dans le domaine d'application.

Ce rapport technique ne contient pas et n'a pas l'intention d'établir des limites de champ électromagnétique généré par des équipements, ni d'établir des méthodes d'évaluation de l'exposition humaine à des champs électromagnétiques.

APPAREILLAGE À HAUTE TENSION –

Partie 208: Méthodes de quantification des champs électromagnétiques à fréquence industrielle en régime établi générés par les ensembles d'appareillages HT et les postes préfabriqués HT/BT

1 Domaine d'application

La présente partie de la CEI 62271 donne des conseils pratiques pour évaluer et documenter les champs électromagnétiques externes générés par des appareillages HT et des postes HT/BT préfabriqués. Les exigences de base pour mesurer ou calculer les champs électrique et magnétique sont résumées pour des appareillages couverts par la CEI 62271-200 et la CEI 62271-201 et pour les postes préfabriqués couverts par la CEI 62271-202.

NOTE 1 Les méthodes décrites dans ce rapport technique se réfèrent aux équipements triphasés. Cependant, la méthodologie peut être utilisée de manière similaire pour tout équipement monophasé ou multiphasé couvert par ce rapport technique.

Ce rapport technique s'applique aux équipements assignés pour des tensions jusqu'à et y compris 52 kV et des fréquences réseau de 15 Hz à 60 Hz. Les champs électromagnétiques générés par des harmoniques ou des transitoires ne sont pas considérés dans ce rapport technique. Cependant, les méthodes décrites sont également applicables aux champs harmoniques de la fréquence réseau.

Des informations génériques détaillées sur les exigences et mesures des champs électromagnétiques basse fréquence sont données dans la CEI 61786.

Le présente rapport technique couvre l'évaluation dans des conditions d'usine ou de laboratoire avant installation. Les champs électrique et magnétique peuvent être évalués soit par mesures soit par calculs.

NOTE 2 Lorsque cela est possible, les méthodes décrites dans ce rapport technique peuvent aussi être utilisées pour l'installation sur site.

L'établissement de valeurs limites de champs électromagnétiques ou de méthodes pour l'évaluation de l'exposition des êtres humains ne sont pas dans le domaine d'application de ce rapport technique.

2 Références normatives

CEI 61000-6-2, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 6-2: Normes génériques – Immunité pour les environnements industriels*

CEI 61786, *Mesure de champs magnétiques et électriques à basse fréquence dans leur rapport à l'exposition humaine – Prescriptions spéciales applicables aux instruments et recommandations pour les procédures de mesure*

CEI 62271-200, *Appareillage à haute tension – Partie 200: Appareillage sous enveloppe métallique pour courant alternatif de tensions assignées supérieures à 1 kV et inférieures ou égales à 52 kV*

CEI 62271-201, *Appareillage à haute tension – Partie 201: Appareillage sous enveloppe isolante pour courant alternatif de tensions assignées supérieures à 1 kV et inférieures ou égales à 52 kV*

CEI 62271-202, *Appareillage à haute tension – Partie 202: Postes préfabriqués haute tension/ basse tension*

3 Termes and définitions

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

3.1

CEM

abréviation du terme « champ(s) électromagnétique(s) »

3.2

caractéristique du champ électrique

valeurs efficaces (r.m.s) et distribution spatiale du champ électrique aux tension et fréquence assignées autour de toute surface accessible de l'équipement. La caractéristique du champ électrique est la résultante des valeurs efficaces (r.m.s.) des trois composantes vectorielles orthogonales

3.3

caractéristique du champ magnétique

valeurs efficaces (r.m.s) et distribution spatiale de la densité de flux magnétique au courant assigné normal et fréquence assignée autour de toute surface accessible de l'équipement. La caractéristique du champ magnétique est la résultante des valeurs efficaces (r.m.s.) des trois composantes vectorielles orthogonales

NOTE Les termes "résultante de champ électrique" et "résultante de champ magnétique" sont définis dans la CEI 61786.

3.4

surfaces accessibles

parties des murs et du toit du poste préfabriqué ou des appareillages HT qui peuvent être touchées avec tous les couvercles et portes en position fermée en condition de service normal

3.5

surface de référence

SR

enveloppe virtuelle contenant l'équipement à évaluer

3.6

surface de mesure

SM

la surface de mesure est délimitée à l'extérieur de la surface de référence à une distance de 20 cm

NOTE Cette surface est utilisée pour mesurer les points chauds et la variation du CEM.

3.7

point chaud

centre d'une surface d'un maximum local du champ électrique ou magnétique

3.8

caractéristiques du CEM

distribution spatiale de la résultante (module) de la valeur efficace (r.m.s.) de l'intensité du champ électrique (E) et du flux magnétique (B). La distribution spatiale est dérivée d'une mesure ou d'une grille de calcul

3.9

volume de mesure

VM

espace virtuel dans lequel il ne faut pas que le champ électromagnétique résiduel (bruit de fond) dépasse un niveau approprié pour permettre la mesure non influencée des champs électrique et magnétique générés par l'équipement

4 Exigences pour les évaluations

4.1 Généralités

Les caractéristiques de CEM des ensembles d'appareillage HT ou des postes préfabriqués HT/BT sont les valeurs mesurées ou calculées d'intensité de champ électrique et de densité de flux magnétique autour de toutes les surfaces accessibles dans les conditions d'évaluation décrites ci-dessous. Ces conditions représentent l'état d'utilisation pour lequel la charge de l'ensemble d'appareillage et, dans le cas d'un poste, du transformateur ont des valeurs définies.

Puisque les champs électriques et magnétiques sont dépendants de la disposition physique des câbles d'arrivée et de départ ainsi que de leur charge, ces paramètres doivent être enregistrés. La présence d'autres sources, d'écrans et autres structures métalliques doit être enregistrée.

Les caractéristiques de CEM doivent être évaluées pour les conditions qui conduisent aux plus hauts niveaux de champs électrique et magnétique dans les conditions de service normales non perturbées. Ces conditions comprennent les courants les plus élevés et les boucles réalistes les plus larges possibles pour l'ensemble fonctionnant au maximum de sa capacité. Un CEM produit par les opérations de coupure incluant l'interruption de courants de défaut ou tout autre phénomène transitoire est sensé être d'importance secondaire et ne doit pas être considéré.

Le courant le plus élevé côté HT est le courant nominal assigné indiqué sur la plaque signalétique de l'ensemble d'appareillages, et côté BT le courant nominal du transformateur avec la valeur assignée la plus élevée. Pour un calcul les deux courants doivent être simulés. Lors de mesures il est préférable d'avoir simultanément les deux courants présents.

L'intensité de champ électrique et la densité de flux magnétique doivent être enregistrées comme la résultante des valeurs efficaces des trois composantes orthogonales.

L'évaluation doit être réalisée à la fréquence assignée de l'équipement.

Cependant, dans la gamme de fréquences inférieures ou égales à 60 Hz, la valeur effective de la fréquence n'impacte pas significativement les niveaux de champ E générés quelle soit la valeur de la tension. En conséquence une évaluation à toute fréquence inférieure ou égale à 60 Hz est considérée comme valable.

De même, pour les besoins de le présent rapport technique, il est possible de ne pas tenir compte de la différence d'atténuation du champ B par des enveloppes métalliques à 50 Hz ou 60 Hz. C'est pourquoi une évaluation à 50 Hz est considérée comme étant applicable aussi pour 60 Hz et vice versa.

Dans la gamme de fréquences couvertes par le présent rapport technique, les champs électriques et magnétiques peuvent être traités séparément. Lors de la sélection des conditions permettant d'obtenir les valeurs des champs électrique et magnétique les plus élevées aussi réalistes que possible dans des conditions non perturbées, les paragraphes suivants doivent être pris en compte.

4.2 Méthodes d'évaluation

Le constructeur peut évaluer les caractéristiques des CEM par mesure ou calcul.

4.3 Evaluation des champs électriques

4.3.1 Ensembles d'appareillages HT

L'équipement doit être évalué à la tension nominale de l'ensemble d'appareillages HT.

Seulement si l'évaluation ne peut être réalisée à la tension nominale, les résultats doivent être extrapolés à la valeur nominale de la tension. Puisque l'intensité de champ électrique est une fonction linéaire de la tension, les intensités de champ pour différentes valeurs de tension peuvent être extrapolées linéairement.

4.3.2 Postes préfabriqués HT/BT

L'équipement doit être évalué aux tensions nominales du ou des transformateurs HT/BT.

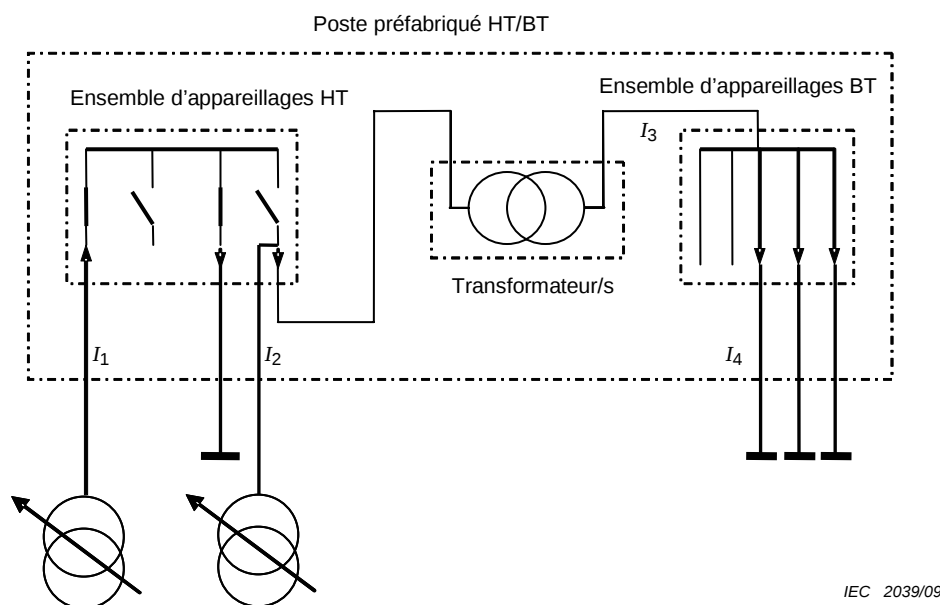
Seulement si l'évaluation ne peut être réalisée à la tension nominale, les résultats doivent être extrapolés à la valeur nominale de la tension. Puisque l'intensité de champ électrique est une fonction linéaire de la tension, les intensités de champ pour différentes valeurs de tension peuvent être extrapolées linéairement.

4.4 Evaluation des champs magnétiques

4.4.1 Ensembles d'appareillages HT

L'ensemble d'appareillages HT est alimenté avec la valeur de courant la plus élevée déterminée par le courant nominal assigné indiqué sur la plaque signalétique. Il faut que le circuit HT soit choisi pour former la boucle de courant la plus large possible entre les unités fonctionnelles (cellules) arrivée et départ de l'ensemble d'appareillages afin d'obtenir le champ magnétique le plus élevé en utilisant le plus petit nombre de circuits tout en tenant compte de leur courant nominal assigné. Un exemple est montré à la Figure 1.

Si l'évaluation ne peut être réalisée au courant nominal assigné, les résultats doivent être extrapolés à la valeur nominale assignée. Tout effet de saturation sera moins prononcé à des valeurs de courants plus faibles, en conséquence une extrapolation de valeurs plus faibles à valeurs plus élevées de courant est autorisée dans la mesure où il en résulte une surestimation du champ B.



Légende

- I_1 = Courant de boucle maximum de l'appareillage HT
- I_2 = Courant de boucle HT/BT
- I_3 = Courant de boucle HT/BT maximum (côté BT)
- I_4 = Courant HT/BT maximum (départ BT)

Figure 1 – Exemple de configuration des circuits d'essai permettant d'obtenir le champ magnétique externe maximum pour un ensemble d'appareillages et/ou un poste préfabriqué

4.4.2 Postes préfabriqués HT/BT

Pour l'ensemble d'appareillages HT, 4.4.1 est applicable.

L'ensemble d'appareillages BT et le transformateur doivent être alimentés avec le courant nominal le plus élevé déterminé par la puissance assignée maximum du poste préfabriqué pour un niveau de tension BT donné. Le circuit doit être configuré pour former la plus grande concentration de courants pour obtenir le maximum de champ magnétique. Cela peut être réalisé en utilisant le plus petit nombre de circuits, choisissant ceux situés le plus près de l'enveloppe du poste préfabriqué et tenant compte de leur courant nominal assigné. Un exemple est montré à la Figure 1.

Si la conception du poste préfabriqué HT/BT accepte des transformateurs de différentes puissances assignées, le constructeur doit au minimum fournir une évaluation avec la puissance assignée maximum pour un niveau de tension BT donné.

NOTE Il convient que la puissance nominale assignée d'un transformateur corresponde à un refroidissement par ventilation naturelle. Il convient que l'évaluation des CEM avec d'autres moyens de refroidissement (par exemple ventilation forcée) fasse l'objet d'un accord entre constructeur et utilisateur.

Si l'évaluation ne peut être réalisée à la puissance nominale assignée pour un niveau de tension BT donné, les résultats doivent être extrapolés pour la valeur nominale assignée. Tout effet de saturation sera moins prononcé à des valeurs de courants plus faibles, en conséquence une extrapolation de valeurs plus faibles à valeurs plus élevées de courant est autorisée dans la mesure où il en résulte une surestimation du champ B.

L'extrapolation des valeurs de champ magnétique n'est pas autorisée si les courants sur les côtés HT et BT du poste préfabriqué varient indépendamment.

5 Mesures

5.1 Généralités

Aux fréquences industrielles, les champs électriques et magnétiques sont indépendants l'un de l'autre. Les caractéristiques de densité de flux magnétique et d'intensité de champ électrique peuvent en conséquence être mesurées séparément.

Les caractéristiques du champ électrique d'un équipement sont indépendantes du courant de charge.

Les caractéristiques du champ magnétique d'un équipement sont indépendantes de la tension.

NOTE Des informations générales sur les procédures de mesure des champs électriques et magnétiques peuvent aussi être trouvées dans les CEI 62110 et 61786.

5.2 Instruments de mesure

Les instruments pour la mesure des champs électriques et magnétiques doivent satisfaire aux exigences de spécification et de calibration de la CEI 61786. La traçabilité du rapport de calibration doit être réalisée selon les Normes nationales ou internationales. Il convient que ces instruments soient utilisés dans des conditions appropriées, en particulier en considérant

- l'immunité électromagnétique selon la CEI 61000-6-2,
- l'immunité des mesures de champ magnétique face aux champs électriques à fréquence industrielle,
- les plages de température et d'humidité telles que recommandées par les constructeurs des instruments.

Un instrument triaxial mesure les valeurs efficaces du champ résultant F_r . Un instrument monoaxial peut être utilisé pour obtenir F_r en mesurant F_x , F_y , et F_z , et en utilisant l'Equation (1), où F_x , F_y , et F_z sont les valeurs efficaces des composantes orthogonales triaxiales du champ électrique ou magnétique.

$$F_r = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (1)$$

L'utilisation d'un instrument triaxial à trois capteurs concentriques est préférable. Cependant, si un instrument monoaxial est utilisé, une attention particulière doit être portée à l'orientation du capteur le long de trois directions orthogonales. L'orientation du capteur doit être changée sans modifier la position de son centre.

Dans le cas de capteurs non concentriques, la position et l'orientation des capteurs contenus dans l'enveloppe des instruments de mesure de champ doivent être clairement indiquées sur l'instrument ou dans son manuel d'utilisation.

Pendant l'évaluation du champ magnétique généré par les ensembles d'appareillages HT et les postes préfabriqués HT/BT, la distance entre la source de champ et l'instrument de mesure est relativement faible (en comparaison à d'autres équipements de puissance pour courant alternatif tels que les lignes aériennes). En général, les mesures seront réalisées dans des champs non uniformes. Pour la mesure des champs magnétiques, il est nécessaire de considérer le rapport entre la distance (d_{sc}) depuis la source de champ et le rayon du capteur (a). Pour les mesures avec un instrument triaxial, un ratio minimum de 4 est considéré comme adapté.

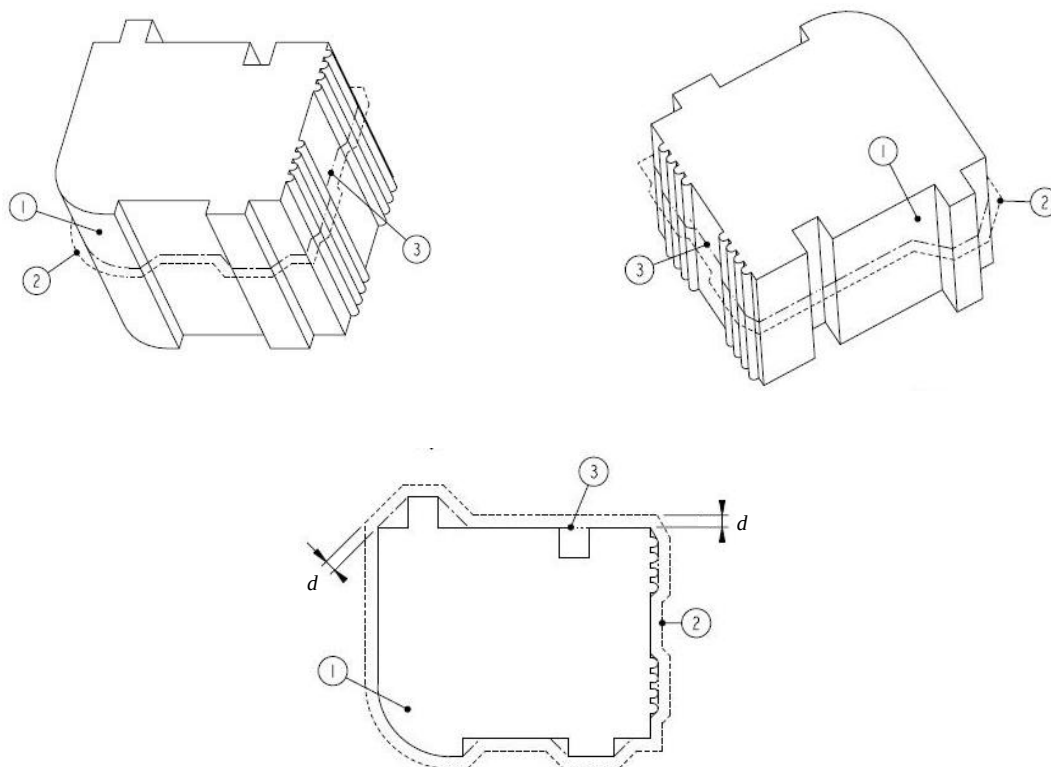
NOTE Lors de l'utilisation d'un capteur de rayon 5 cm, il convient que la distance minimum à la source de champ soit au moins de 20 cm en considérant un ratio de 4. Plus d'information à ce sujet peut être trouvée dans la CEI 61786.

5.3 Procédures de mesure

5.3.1 Généralités

Pour prendre en compte tous les équipements de tout type de formes, une enveloppe virtuelle contenant l'équipement est définie en tant que surface de référence (SR); voir Figure 2. Le but de cette SR est d'intégrer les irrégularités et d'éliminer les changements brusques de la surface de mesure (SM). La SM est définie à l'extérieur de la SR à une distance de 20 cm.

Les éléments protubérants (par exemple les poignées) doivent être ignorés.



IEC 2040/09

Légende

- 1 surface de l'équipement
- 2 surface de mesure
- 3 surface de référence
- d distance entre la surface de référence et la surface de mesure (20 cm)

Figure 2 – Surface de référence (SR) d'un équipement de forme irrégulière

5.3.2 Champ électrique

La ou les valeurs maximum du champ électrique sur la surface de mesure doivent être trouvées par un premier balayage sur une grille grossière pour localiser les régions de champ maximum, puis en affinant la grille pour la localisation des points chauds. Voir aussi la Figure 3.

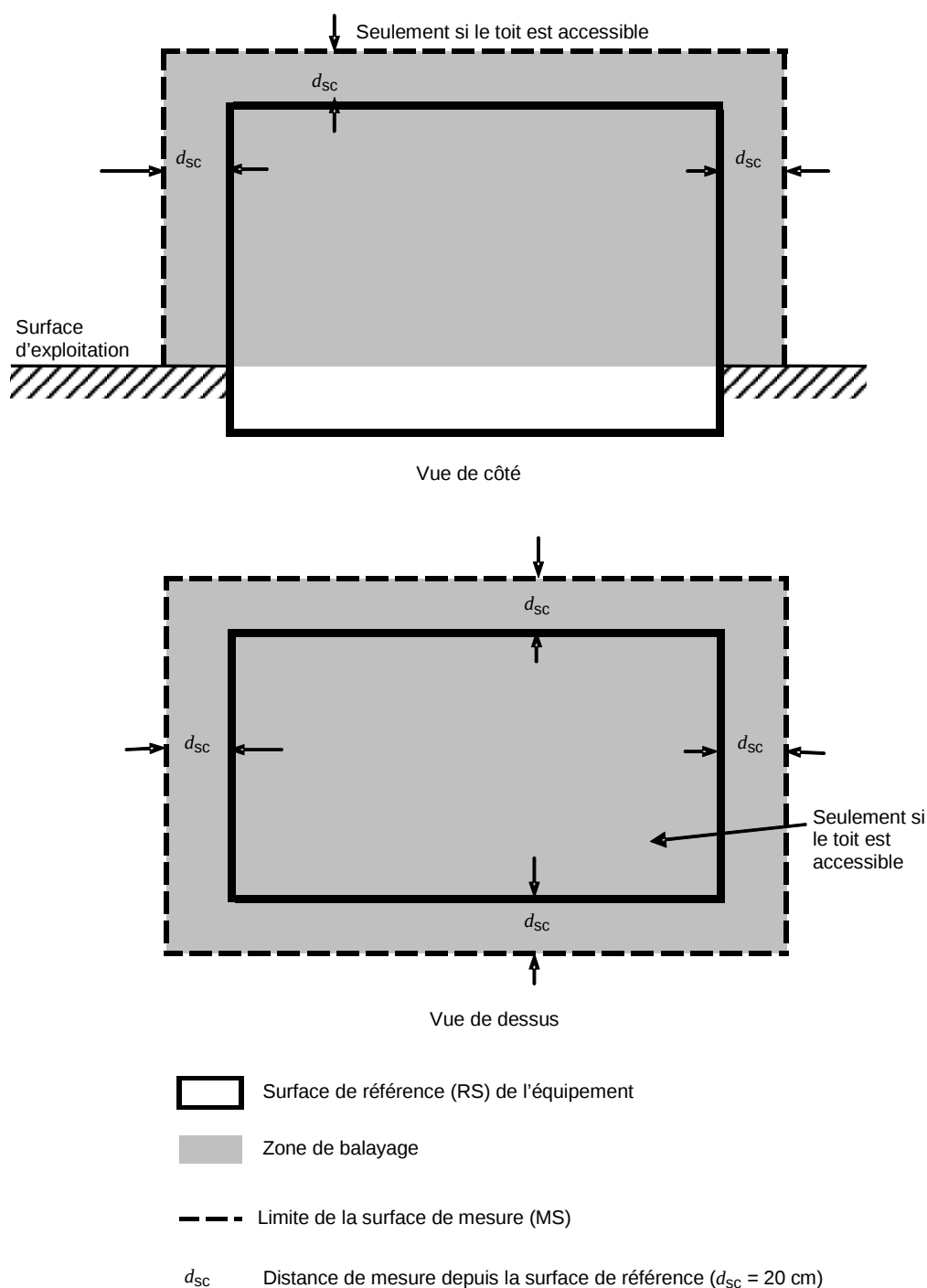
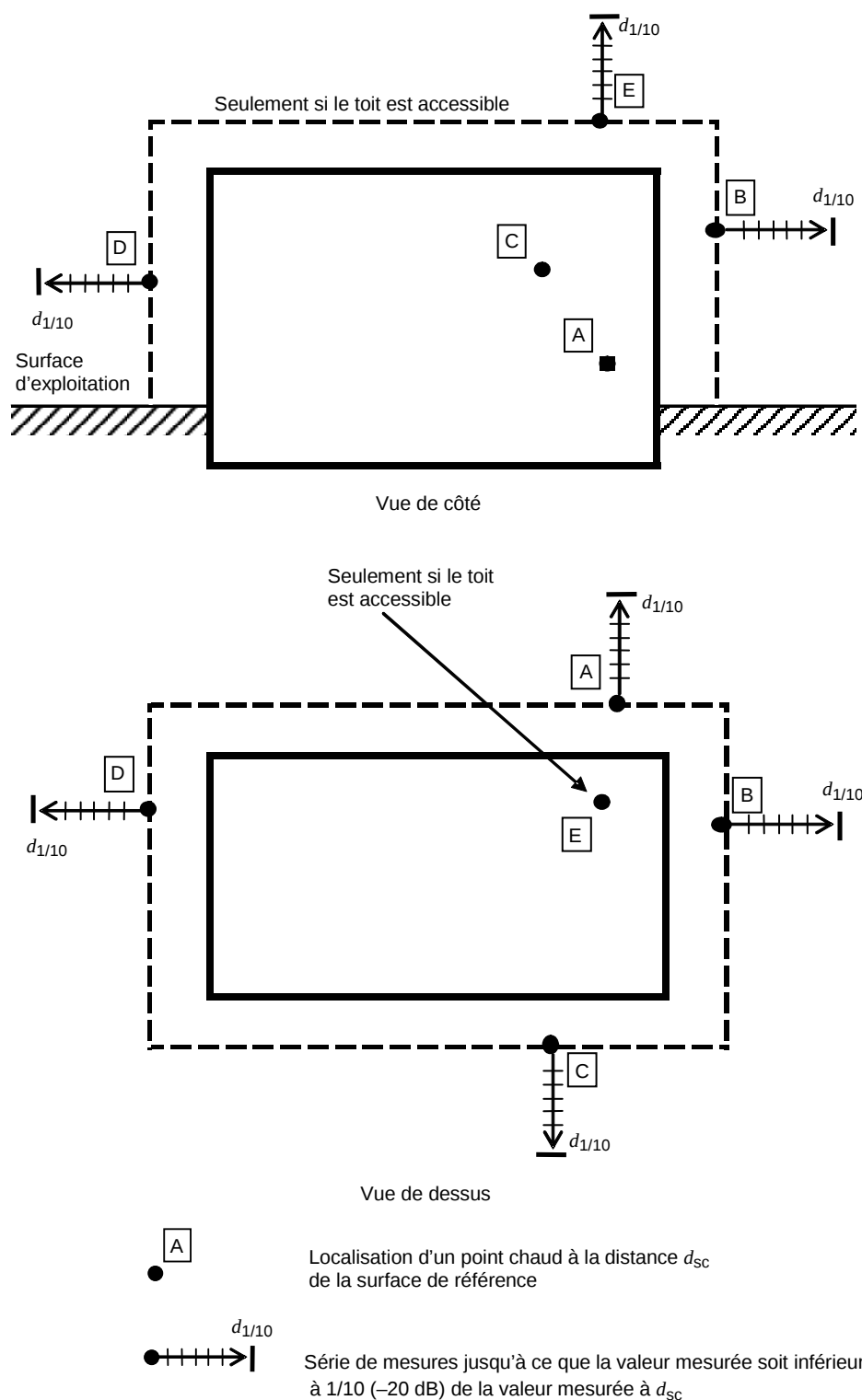


Figure 3 – Zones de balayage pour trouver les points chauds

La variation de champ électrique doit être déterminée comme une fonction de la distance à la SM. Partant de chaque point chaud, les valeurs de champ doivent être mesurées le long d'une ligne perpendiculaire à la MS jusqu'à ce que la valeur mesurée soit inférieure à 1/10 (-20 dB) de la valeur du point chaud; voir Figure 4. Des mesures complémentaires peuvent être réalisées pour satisfaire à des demandes particulières (par exemple pour un client ou un pays).

NOTE Des champs électriques importants ne sont pas attendus des équipements relevant du domaine d'application de ce rapport technique. Cependant, un des buts de ce rapport technique est de donner des indications pour mesurer ces champs lorsque les constructeurs et les utilisateurs le demandent.



IEC 2042/09

Figure 4 – Détermination des variations de champ en fonction de la distance aux localisations de points chauds (perpendiculairement à la surface de référence)

5.3.3 Champ magnétique

La ou les valeurs maximum du champ magnétique sur la surface de mesure doivent être trouvées par un premier balayage sur une grille grossière pour localiser les régions de champ maximum, puis en affinant la grille pour la localisation des points chauds. Voir aussi la Figure 3.

La variation de champ magnétique doit être déterminée comme une fonction de la distance à la SM. Partant de chaque point chaud, les valeurs de champ doivent être mesurées le long d'une ligne perpendiculaire à la MS jusqu'à ce que la valeur mesurée soit inférieure à 1/10 (–20 dB) de la valeur du point chaud; voir Figure 4. Des mesures complémentaires peuvent être réalisées pour satisfaire à des demandes particulières (par exemple pour un client ou un pays).

5.3.4 Champ de bruit de fond

Immédiatement après les mesures l'équipement doit être déconnecté et le niveau de champ de bruit de fond mesuré et enregistré.

En balayant grossièrement à l'intérieur du VM et en mesurant le champ électrique ou magnétique quand la tension ou le courant sont interrompus, il doit être vérifié que le niveau de champ de bruit de fond est inférieur à 1/10 (–0 dB) de la valeur la plus faible mesurée aux points chauds durant les mesures avec tension ou courant appliqués.

Des conseils pour réduire à un minimum les interférences des champs de bruit de fond dues aux câbles externes connectés à l'équipement en essai sont donnés en 5.4.1.

5.3.5 Facteurs d'environnement

5.3.5.1 Mesure du champ électrique

Les facteurs d'environnement (par exemple humidité, température etc.) n'ont pas d'influence significative sur le champ électrique. Cependant, les équipements de mesure de champ électrique peuvent être influencés de manière significative quand l'humidité est suffisante pour provoquer de la condensation sur le capteur et sa structure de support. En conséquence les facteurs d'environnement doivent être mesurés pour s'assurer que les équipements de mesure sont utilisés dans leurs limites d'environnement spécifiées. Une attention spéciale doit être portée à l'humidité.

On considère que les limites acceptables d'humidité pour des mesures correctes sont

- 60 % d'humidité relative pour l'utilisation d'un tripode normal,
- 70 % d'humidité relative pour l'utilisation d'un tripode compensé (instrument de mesure déplacé de 0,50 m de l'axe vertical du tripode).

Si ces limites sont dépassées, les mesures effectuées doivent être considérées comme une évaluation prudente en raison du fait que les valeurs mesurées sous importante humidité sont plus grandes que celles mesurées sous faible humidité pour le même équipement soumis à une même tension.

En outre, les mesures de champ magnétique sous la pluie ne sont pas adaptées.

5.3.5.2 Mesure du champ magnétique

Les facteurs d'environnement (par exemple humidité, température etc.) n'ont pas d'influence significative sur le champ magnétique. Cependant les facteurs d'environnement doivent être mesurés pour s'assurer du fait que les équipements de mesure sont utilisés dans leurs limites d'environnement spécifiées.

5.3.5.3 Autres conditions

Pendant les mesures des champs électriques, tout objet ou personne doit être tenu en dehors de la zone d'influence de l'instrument de mesure.

Les objets contenant ou constitués de matériaux à haute perméabilité peuvent causer d'importantes distorsions du champ magnétique. Les personnes n'influencent pas le champ magnétique, en conséquence les instruments de mesure peuvent directement être tenus par des personnes pendant les mesures.

La présence de matériaux à haute perméabilité, qui ne font pas partie de l'équipement, au voisinage de la source de champ et/ou des instruments de mesure, doit être notée dans le rapport de mesure.

Toutes les parties de l'équipement qui sont prévues pour être mises à la terre doivent être connectées à la terre selon les instructions du constructeur.

5.4 Organisation des mesures

5.4.1 Généralités

Toutes les mesures doivent être réalisées avec une alimentation en tension ou courant triphasée. L'organisation des essais doit respecter les conditions suivantes; voir aussi la Figure 6.

L'équipement en essais doit être entouré d'un volume de mesure virtuel (VM) suffisamment grand pour permettre la décroissance du champ perpendiculairement à la surface de référence à chaque point chaud jusqu'à 1/10 (-20 dB) de sa valeur; voir Figure 5.

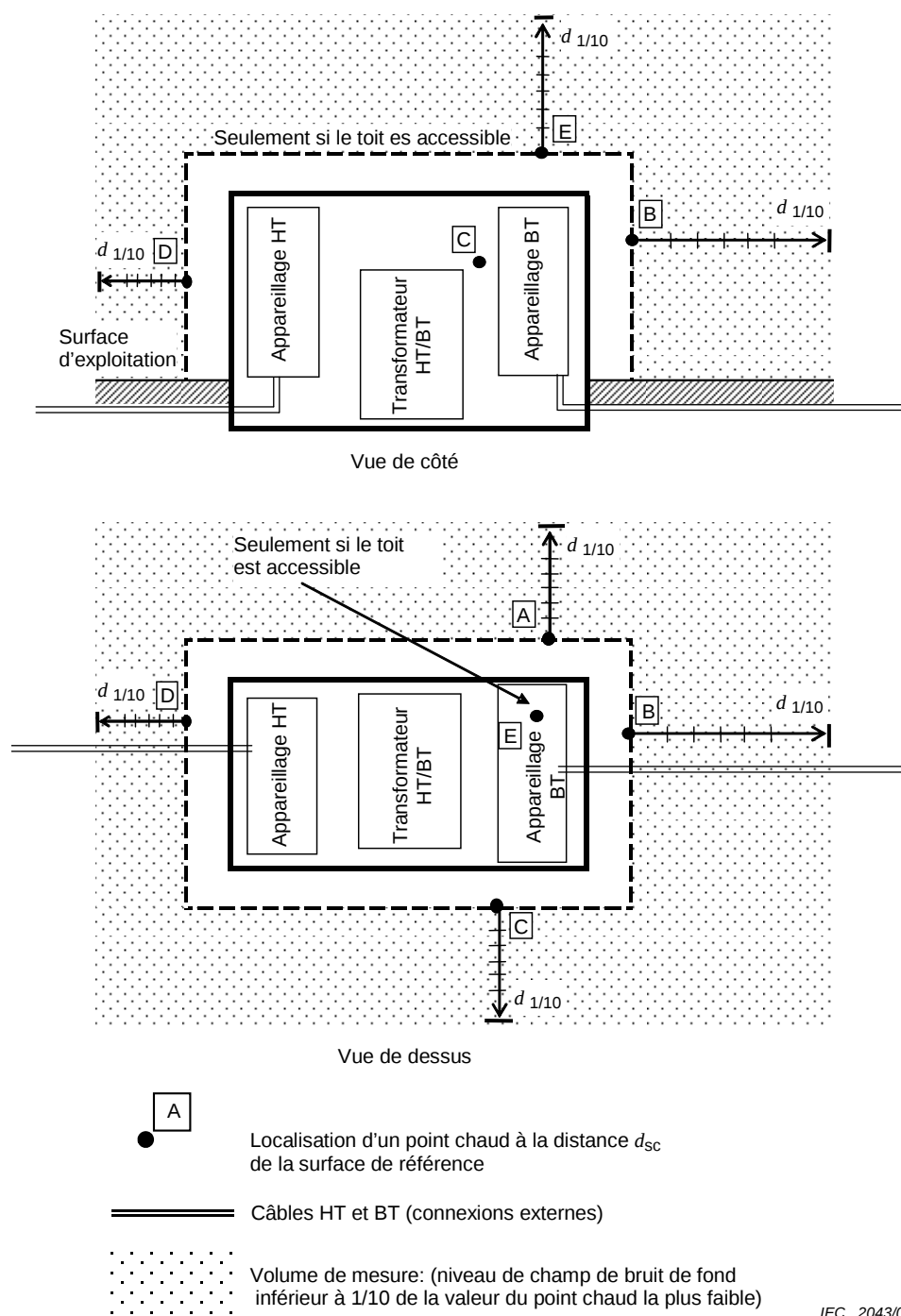
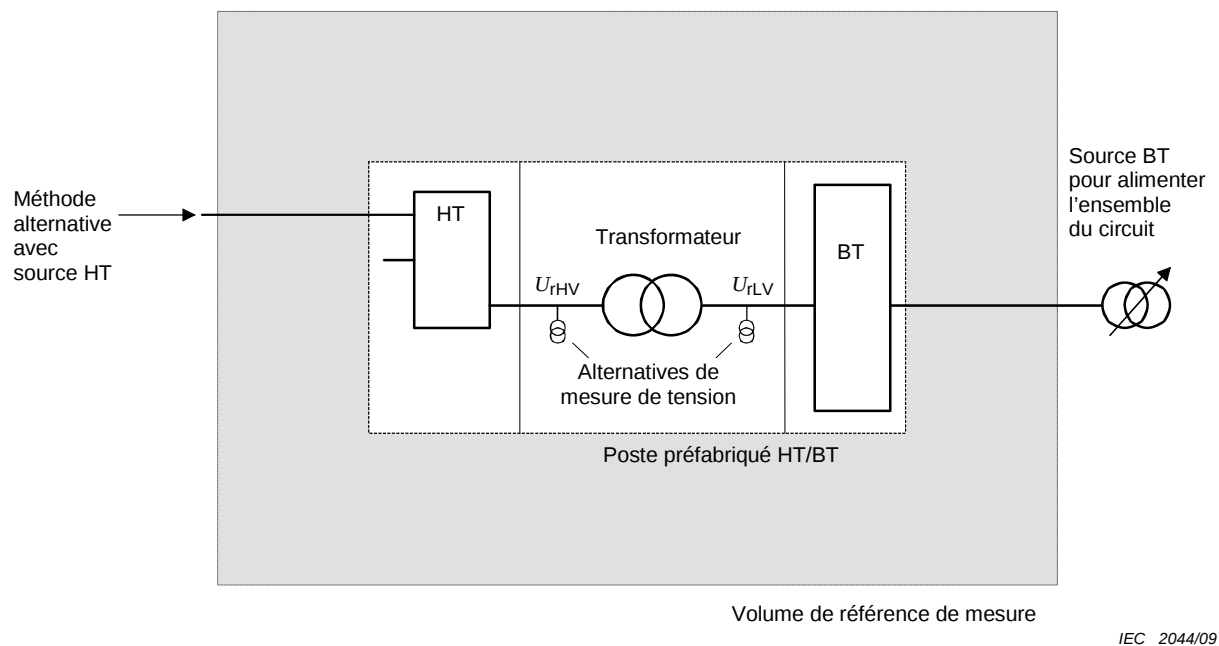
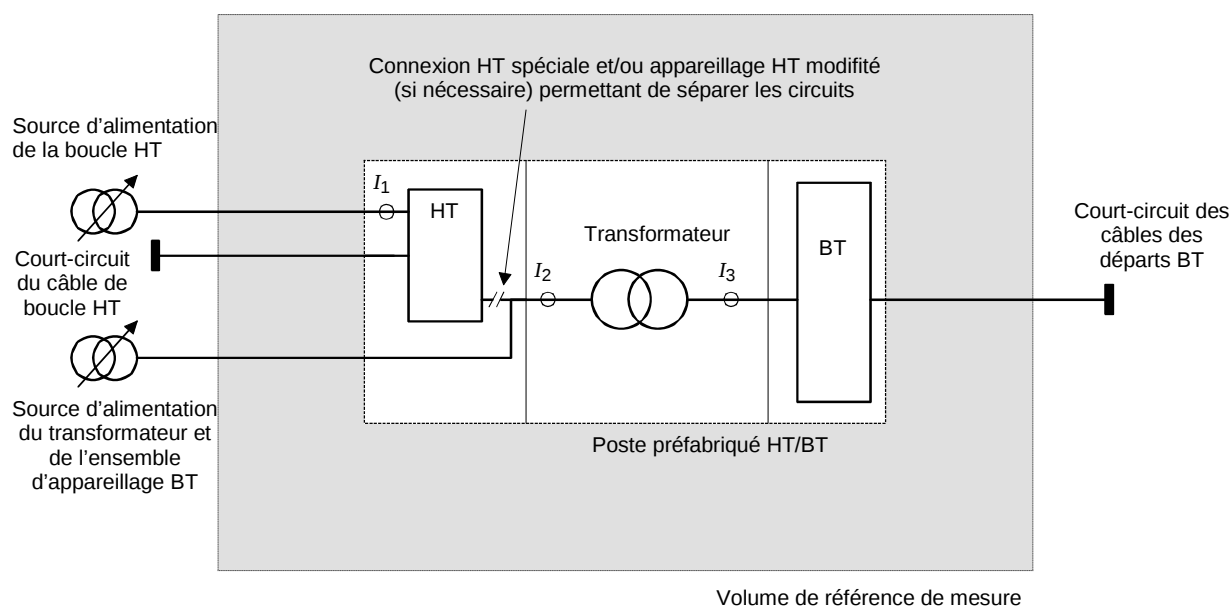


Figure 5 – Organisation, pour les essais, des composants principaux, des câbles externes, des endroits de points chauds et du volume de mesure



IEC 2044/09

Figure 6a – Circuit d'essai pour les mesures de champ électrique



IEC 2045/09

Légende

- I_1 Courant permanent assigné de la boucle d'alimentation HT
- I_2 Courant permanent assigné HT du transformateur
- I_3 Courant permanent assigné BT du transformateur

Figure 6b – Circuits d'essai pour les mesures de champ magnétique

Figure 6 – Circuits d'essai pour les mesures de champ électrique et magnétique

Le but, pendant le test, est de réduire les influences extérieures afin de caractériser l'équipement plutôt que le circuit d'essai. Pour minimiser les interférences des champs de bruit de fond dans le VM, des dispositions sont prises pour la connexion des câbles externes au spécimen en essai. Il doit être utilisé de préférence des câbles triphasés à écran pour la partie HT et des câbles quadripolaires côté BT. Si d'autres câbles sont utilisés, leur disposition doit être telle que leur champ proche soit minimisé. Ces dispositions doivent être maintenues à une distance suffisante à l'extérieur des limites du VM afin que le champ de bruit de fond à l'intérieur du VM ne soit pas affecté.

Dans le cas où il est considéré que la contribution des champs générés par les connexions externes a une influence significative sur les résultats de mesure (par exemple pour un système monophasé), il est permis de soustraire les valeurs de champ dues aux connexions externes des résultats de mesure réalisés. La méthode utilisée doit être précisée dans le rapport d'essais.

NOTE Quand il n'est pas fait de correction pour les champs générés par les connexions externes, les résultats de mesure seront des surestimations.

Il convient que le type de câbles et de connexions représente ceux utilisés dans les conditions normales de service.

Les câbles HT doivent quitter l'équipement perpendiculairement à ses faces jusqu'à ce qu'ils atteignent les limites du volume de mesure.

Le champ créé par le court-circuit de la bouclée HT et les circuits (départs) câbles BT ne doit pas modifier le niveau du champ à la limite du volume de référence pour la mesure. Par conséquent, une distance appropriée doit être maintenue entre le point de court-circuit et la limite de la MT.

Dans le cas de postes préfabriqués HT/BT, les câbles BT doivent quitter l'équipement perpendiculairement à ses faces jusqu'à ce qu'ils atteignent les limites du volume de référence pour la mesure. Le champ créé par le court-circuit des câbles BT ne doit pas altérer le niveau de champ à la limite du volume de mesure. En conséquence, une distance appropriée doit être maintenue entre le point de court-circuit et la limite du volume de référence pour la mesure.

5.4.2 Dispositions complémentaires pour les postes préfabriqués HT/BT

5.4.2.1 Champ électrique

La tension d'essai doit être appliquée côté BT comme indiqué à la Figure 6a, ou en alternative, côté HT.

5.4.2.2 Champ magnétique

Le courant dans la boucle HT I_1 et le courant dans le circuit du transformateur I_2 doivent être synchronisés; voir Figure 6b.

Une disposition spéciale ou un appareillage HT modifié peut être nécessaire pour les connexions afin de réaliser les tests.

6 Calculs

6.1 Généralités

Aux fréquences industrielles, les champs électriques et magnétiques sont indépendants l'un de l'autre. Les caractéristiques de densité de flux magnétique et d'intensité de champ électrique peuvent en conséquence être calculées séparément.

Ce rapport technique est prévue pour donner des instructions relatives à la modélisation d'un équipement dans le but de comparer cet équipement avec un autre. Des recommandations détaillées portant sur la manière de réaliser les calculs sont, cependant, hors du domaine d'application de ce rapport technique, étant donné la grande variété des équipements et des implantations, des méthodes de résolution, logiciels, praticiens et ressources informatiques disponibles.

Des instructions relatives à ces sujets sont disponibles auprès des constructeurs de logiciels, dans la littérature, en format papier et en ligne, quoique les conseils détaillés portant sur la réalisation de la modélisation des équipements spécifiques, objets du domaine d'application de ce rapport technique, sont principalement limités à des fournisseurs de logiciels spécialisés.

Pour les objectifs de ce rapport technique, les calculs sont une alternative acceptable aux mesures – il est de la responsabilité des clients de s'assurer du fait que les calculs ont été effectués avec une précision acceptable (voir 6.5).

La validation des calculs par comparaison avec les mesures décrites à l'Article 5 est particulièrement recommandée. Dès qu'un calcul a été validé pour un équipement, il est généralement acceptable de caractériser des équipements similaires par calcul sans avoir besoin de réaliser des mesures.

6.2 Logiciels

Tout logiciel qui résout la relation de Biot-Savart ou les équations de Maxwell est potentiellement acceptable pour les calculs des champs électromagnétiques des équipements du domaine d'application de ce rapport technique.

Certains logiciels sont spécialisés pour ce type d'équipement alors que d'autres sont des logiciels d'usage général pour les calculs de champs électromagnétiques. Il n'est pas dans les objectifs de ce rapport technique de juger si un logiciel est meilleur (de quelque façon – précision, facilité d'utilisation, intérêt économique, etc.) qu'un autre.

6.3 Procédures de calcul

Il convient de réaliser les calculs selon les conditions d'évaluation établies à l'Article 4. S'il est prévu de réaliser à la fois des calculs et des mesures, il convient que les calculs prennent en compte les éléments importants de la procédure d'essai tels que les câbles d'alimentation, afin de permettre des comparaisons précises.

Les équipements inclus dans le domaine d'application sont nécessairement tridimensionnels et il est recommandé que seulement les modèles tridimensionnels soient utilisés pour les calculs. Les équipements sont aussi complexes dans leur implantation et il est prévisible que des modèles précis demanderont des ressources informatiques considérables (mémoire et vitesse).

Il convient que les équipements soient modélisés aussi explicitement et complètement que possible, dans la limite des contraintes de la méthode de résolution. En particulier, il convient que toutes les sources de champ et les gros composants soient inclus, et plus de détails va généralement (quoique pas toujours) conduire à des modèles plus précis.

Pour le calcul des champs électriques, les structures métalliques peuvent être modélisées comme des surfaces de potentiel unique (zéro si mises à la terre) plutôt que de se voir attribuer des propriétés de matériau explicites. En l'occurrence un modèle d'équipement complètement entouré par une enveloppe métallique conduira nécessairement à un champ électrique externe nul. Les câbles menant à l'équipement seront une source de champ électrique uniquement s'ils ne sont pas avec écran et mis à la terre.

6.4 Résultats

A minima, il convient que les résultats documentés des calculs soient ceux indiqués pour les mesures en 5.3.2 et 5.3.3. Les calculs numériques produisent habituellement des valeurs de champ partout dans le modèle; en conséquence le fournisseur de calculs peut, en accord avec le client, fournir des informations complémentaires telles que des cartes d'iso-champ autour des équipements.

Puisque les résultats décrits à l'Article 5 comprennent à la fois les localisations des maxima de valeur de champ (points chauds) et les intensités des champs, il convient que la précision des résultats de calcul (voir 6.5) soit jugée sur ces deux critères.

Pour la comparaison avec les mesures, il convient que les valeurs de champ calculées soient en accord dans la limite de $\pm 10\%$. Il convient que chaque point chaud calculé soit localisé dans une surface de dimensions 10 % en hauteur par 10 % en longueur de la surface de mesure qui contient un point chaud mesuré (voir la Figure 3, la Figure 4 et la Figure A.1).

6.5 Validation

Il n'y a pas de méthode admise pour la quantification de l'erreur de calcul ou de l'incertitude, puisqu'elle a beaucoup de composantes comprenant les incertitudes inhérentes à la méthode, aux approximations des caractérisations des matériaux et des représentations des structures, à la densité de maillage et aux conditions aux limites.

Il est recommandé aux clients de demander à leur fournisseur de calculs de démontrer leur capacité dans les applications couvertes par ce rapport technique Internationale en produisant des calculs de comparaison de performance ou des mesures.

Les calculs de comparaison de performance avec des résolutions analytiques sont particulièrement utiles, parce qu'ils n'ont aucune approximation numérique ou autre, bien qu'ils soient nécessairement plus simples que beaucoup de problèmes pratiques. Des exemples de problèmes appropriés avec les résolutions analytiques sont donnés à l'Annexe B.

Comme indiqué en 6.4, une précision de 90 % est acceptable. Il convient de considérer que les comparaisons des calculs avec des mesures d'essai incorporent nécessairement l'incertitude de mesure.

7 Documentation

Les informations suivantes doivent être fournies pour l'évaluation des CEM.

7.1 Caractéristiques de l'ensemble d'appareillages HT ou du poste préfabriqué

Désignation de type et caractéristiques assignées des principaux composants de l'équipement préfabriqué, c'est-à-dire

- transformateur/s,
- appareillage HT,
- appareillage BT,
- interconnexions HT et BT.

7.2 Méthode d'évaluation

La méthode d'évaluation choisie doit être indiquée.

7.3 Présentation des résultats de mesure

Il convient de fournir les informations suivantes pour la présentation des résultats de mesure:

- l'identification du rapport d'évaluation;
- les date et heure des mesures;
- l'organisation et les noms des personnes qui ont réalisé les mesures;
- l'identification de chaque instrument de mesure: marque, modèle (et numéro de série), date de calibration, date d'échéance et référence du certificat;
- l'identification du produit et ses caractéristiques assignées, comprenant la puissance assignée du poste préfabriqué et le symbole de connexion du transformateur (couplage) ;
- les conditions de mise en œuvre, comprenant la configuration des différents dispositifs de coupure et des autres équipements qui peuvent avoir différents réglages, la mise à la terre de l'équipement;
- les réglages de l'équipement de mesure (par exemple gamme de mesure, bande passante, fréquence d'échantillonnage) ;
- les conditions environnementales (par exemple température ou humidité) ;
- la position des câbles d'arrivée et de départ HT et BT, et les valeurs des courants;
- les courants, tensions et fréquence de chaque circuit du produit, et leur disposition spatiale;
- les champs résiduels (bruit de fond) ;
- la localisation des points chauds, par exemple comme indiqué à l' Annexe A;
- les mesures des champs électrique et magnétique qui doivent être présentées séparément sous la forme de tableaux et graphiques de variation de champ perpendiculairement aux points chauds;
- les plans ou photographies qui décrivent les zones et localisations où les mesures ont été réalisées.

7.4 Présentation des résultats de calcul

Il convient de fournir les informations suivantes pour la présentation des résultats de calcul:

- l'identification du rapport d'évaluation;
- le nom, la version et le constructeur du logiciel utilisé;
- l'identification du produit et ses caractéristiques assignées, comprenant la puissance assignée du poste préfabriqué et le symbole de connexion du transformateur (couplage) ;
- les conditions de fonctionnement, comprenant la configuration des différents dispositifs de coupure et des autres équipements qui peuvent avoir différents réglages;
- la description des hypothèses et des conditions aux limites incluant la mise à la terre de l'équipement;
- les détails suffisants pour permettre la reproductibilité des résultats de calcul;
- la position des câbles d'arrivée et de départ HT et BT inclus dans l'étude, et les valeurs des courants, s'ils sont inclus dans l'étude;
- la description des valeur, phase et localisation de toutes les tensions et tous les courants d'excitation; il convient que les directions soient précisées pour les courants;
- la localisation des points chauds calculés, par exemple comme indiqué à l'Annexe A;
- les valeurs des champs électrique et magnétique qui doivent être présentées séparément sous la forme de tableaux et graphiques de variation de champ perpendiculairement aux points chauds.

Annexe A (informative)

Présentation des valeurs de mesures de champ E ou B – Exemple pour un poste préfabriqué HT/BT typique

A.1 Généralités

La méthode de présentation décrite dans cette annexe peut être utilisée indifféremment pour un ensemble d'appareillages HT et pour un poste préfabriqué HT/BT.

A.2 Localisation des points chauds (voir Figure A.1)

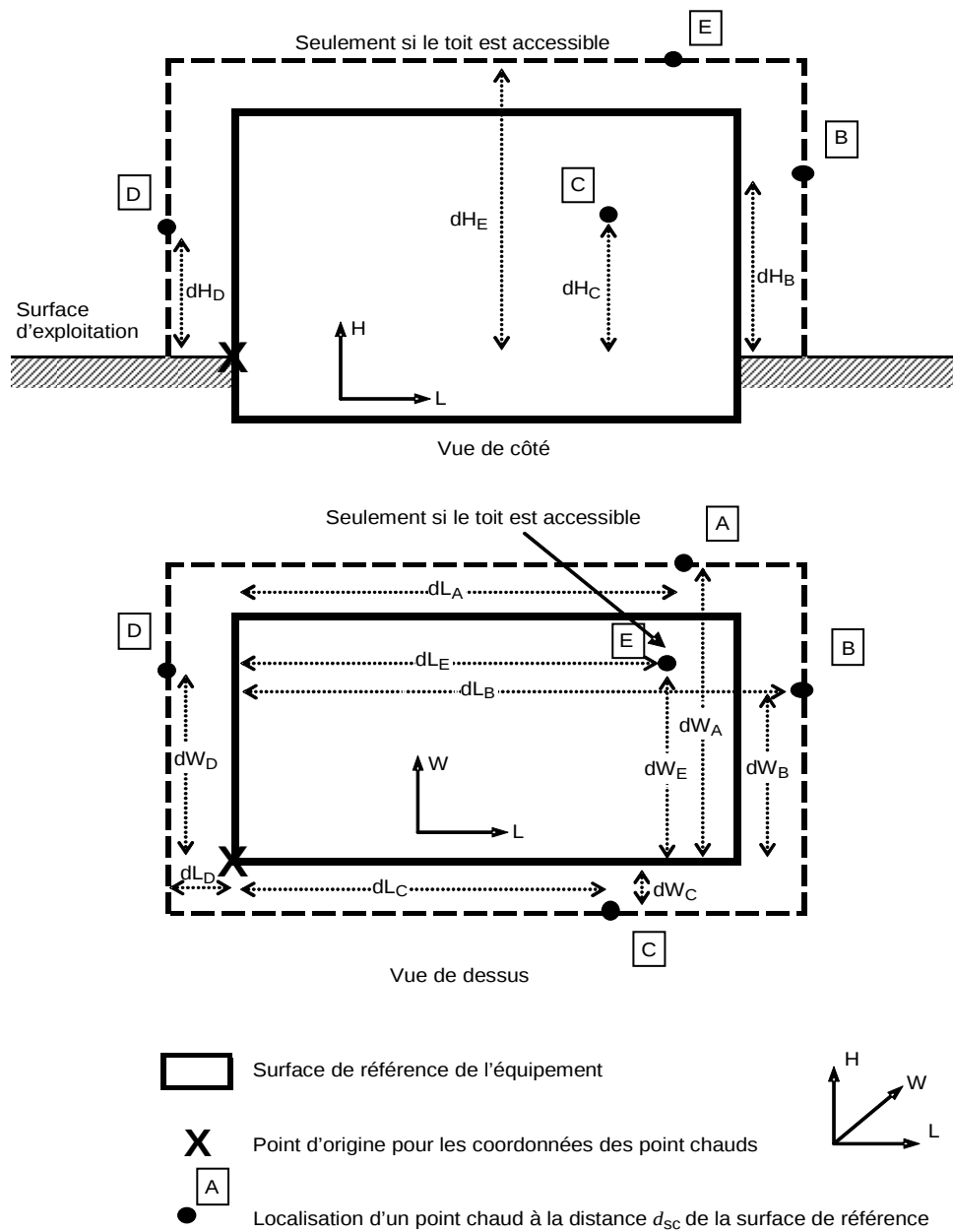


Figure A.1 – Localisation des points chauds représentant les maximum de champ sur les faces accessibles

A.3 Localisations et valeurs de champ E ou B aux points chauds

Distance à la surface de référence $d_{sc} = 0,2$ m

Tableau A.1 – Liste des coordonnées des points chauds

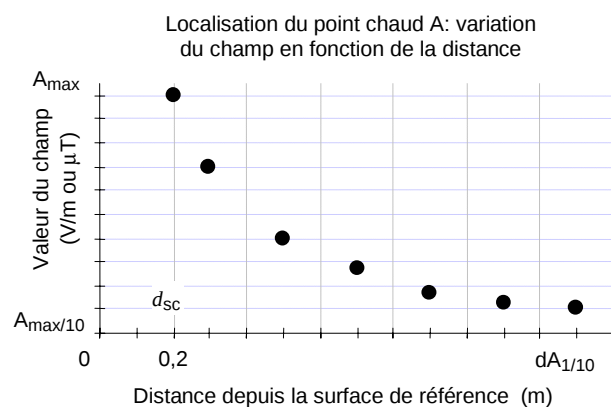
Localisation du point chaud	Distance depuis le point de référence			Valeur de champ V/m ou μ T
	Direction L m	Direction W m	Direction H m	
A	dL_A	dW_A	dH_A	A_{max}
B	dL_B	dW_B	dH_B	B_{max}
C	dL_C	dW_C	dH_C	C_{max}
D	dL_D	dW_D	dH_D	D_{max}
E	dL_E	dW_E	dH_E	E_{max}

A.4 Variation du champ E ou B en fonction de la distance

Le Tableau A.2 donne la variation du champ perpendiculairement à la surface de référence accessible. La procédure pour les autres points chauds est identique. Pour la représentation graphique, voir la Figure A.2.

Tableau A.2 – Variation des valeurs de champ pour un point chaud

Localisation du point chaud	A
Distance depuis la surface de référence m	Valeur du champ V/m ou μ T
d_{sc}	A_{max}
dA2	A2
dA3	A3
dA4	A4
dA5	A5
dA6	A6
$dA_{1/10}$	$A_{max/10}$



IEC 2047/09

Figure A.2 – Présentation graphique de la variation de champ

A.5 Variation du champ autour du poste préfabriqué aux points chauds (voir Figure A.3)

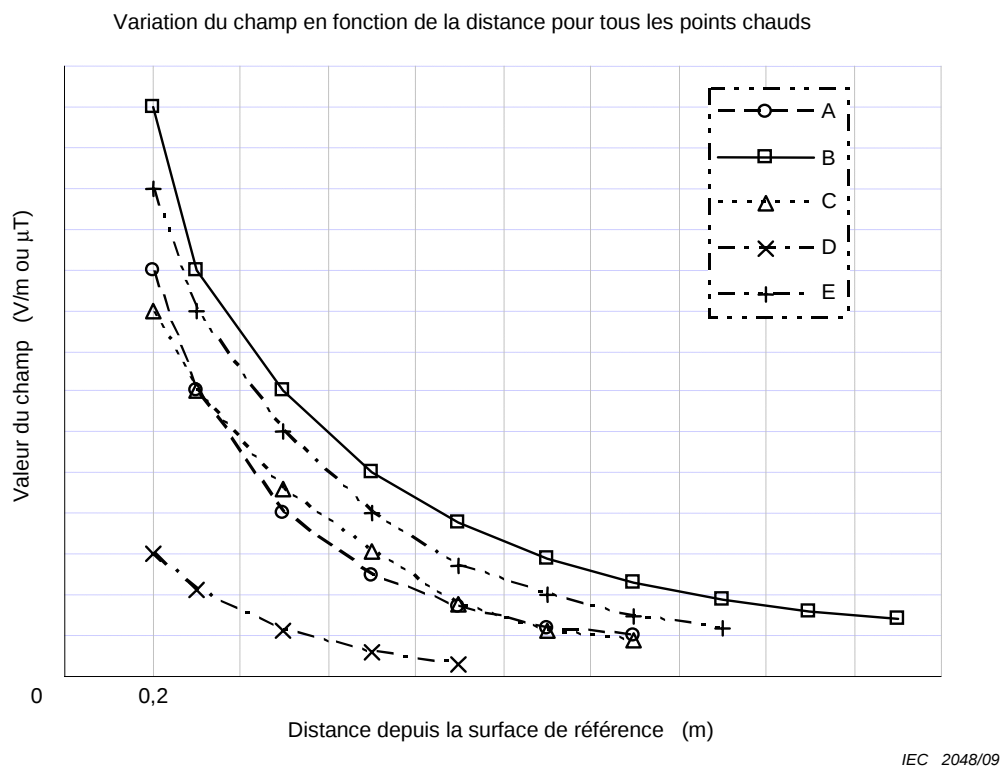


Figure A.3 – Exemple de diagramme pour la variation de champ aux points chauds

A.6 Champs de bruit de fond

L'équipement est totalement non alimenté.

Tableau A.3 – Champs de bruit de fond

	Valeur de champ V/m ou μT	Remarque
Niveau de champ de bruit de fond permis	–	La valeur maximum permissible pour le champ de bruit de fond = 1/10 de la plus faible des valeurs de champ mesurées aux points chauds (voir Figure A.1)
Niveau de champ de bruit de fond mesuré	–	

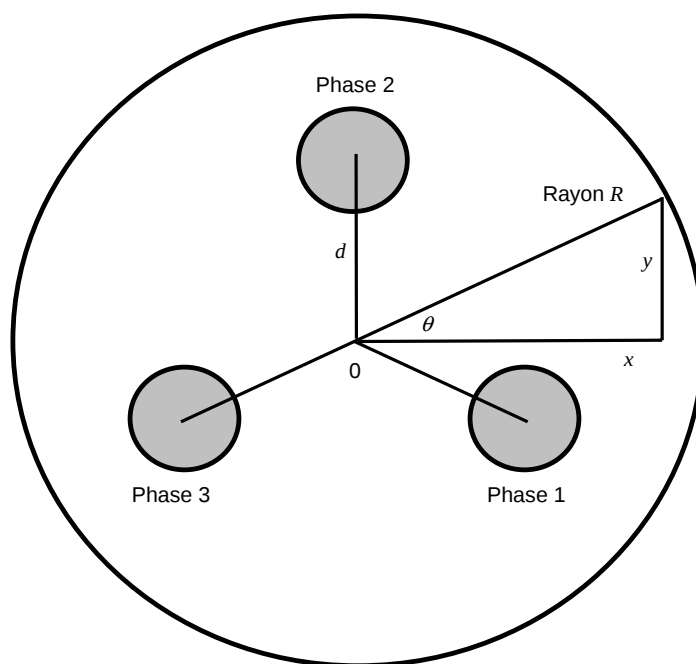
Annexe B (informative)

Exemple de résolution analytique pour l'évaluation de la performance des calculs de champ électromagnétiques

B.1 Champ magnétique

Cette annexe présente la résolution analytique d'un champ magnétique produit par un ensemble de courants triphasés dans des conducteurs de longueur infinie. Cette résolution est proposée comme un exemple de calcul convenant à la fois aux calculs analytiques et numériques. Elle peut donc être utilisée pour évaluer la performance des logiciels utilisés pour les calculs décrits à l'Article 6.

Les conducteurs parcourus par les courants triphasés sont disposés symétriquement à une distance d de l'origine (0,0) dans le plan x-y comme illustré à la Figure B.1. Les courants circulent selon l'axe z (perpendiculairement au plan de la figure).



IEC 2049/09

Figure B.1 – Schéma pour le calcul des champs magnétiques triphasés

Les centres des trois conducteurs sont donc situés à $\left(\frac{d\sqrt{3}}{2}, \frac{-d}{2}\right)$, $(0, d)$ et $\left(\frac{-d\sqrt{3}}{2}, \frac{-d}{2}\right)$.

Le champ magnétique résultant des trois courants est calculé à l'extérieur des câbles, c'est-à-dire à des distances supérieures à $(d + \text{rayon du conducteur})$ de l'origine. Pour ce calcul simple, il est considéré que le rayon des conducteurs est négligeable par rapport à la distance entre ces conducteurs et à la distance au point de calcul. Autrement dit, il est considéré que les courants circulent en des points situés au centre de chaque conducteur.

La loi d'Ampère donne le champ magnétique H à une distance R d'un conducteur parcouru par un courant I par la relation

$$H = \frac{I}{2\pi R} \quad (\text{B.1})$$

Donc, un conducteur situé à l'origine (0,0) parcouru par un courant $I_{pk}\cos(\omega t)$ produirait un champ magnétique $\underline{H} = iH_x + jH_y$ tel que

$$H_x = \frac{-yI_{pk}\cos(\omega t)}{2\pi(x^2 + y^2)} \quad (\text{B.2a})$$

$$H_y = \frac{xI_{pk}\cos(\omega t)}{2\pi(x^2 + y^2)} \quad (\text{B.2b})$$

pour $R = \sqrt{(x^2 + y^2)} > 0$ et $x = R\cos\theta$ et $y = R\sin\theta$.

Les conducteurs présentés à la Figure B.1 sont tous à la distance d de l'origine, donc les formules suivantes sont valables pour $R > d$.

Les composantes du champ pour un conducteur situé par rapport à l'origine au point de coordonnées (x_{dis}, y_{dis}) et parcouru par un courant I_{phase} sont déduites des Equations (B.2a) et (B.2b) comme

$$H_{xi} = \frac{-y_{local} I_{phase}}{2\pi((x_{local})^2 + (y_{local})^2)} \quad (\text{B.3a})$$

$$H_{y1} = \frac{x_{local} I_{phase}}{2\pi((x_{local})^2 + (y_{local})^2)} \quad (\text{B.3b})$$

ou $x_{local} = x - x_{dis}$ et $y_{local} = y - y_{dis}$.

Dans cet exemple, la phase 1 est située à $\left(\frac{d\sqrt{3}}{2}, \frac{-d}{2}\right)$ et parcourue par un courant $I_{pk}\cos(\omega t)$. En utilisant ces données dans les Equations (B.3a) et (B.3b), on obtient

$$H_{x1} = \frac{-\left(y + \frac{d}{2}\right) I_{pk} \cos(\omega t)}{2\pi\left(\left(x - \frac{d\sqrt{3}}{2}\right)^2 + \left(y + \frac{d}{2}\right)^2\right)} \quad (\text{B.4a})$$

$$H_{y1} = \frac{\left(x - \frac{d\sqrt{3}}{2}\right) I_{pk} \cos(\omega t)}{2\pi\left(\left(x - \frac{d\sqrt{3}}{2}\right)^2 + \left(y + \frac{d}{2}\right)^2\right)} \quad (\text{B.4b})$$

De même, les composantes de champ pour la phase 2 située à (0,d) et parcourue par un courant $I_{pk}\cos(\omega t-120^\circ)$ sont

$$H_{x2} = \frac{-(y-d) I_{pk} \cos(\omega t-120^\circ)}{2\pi((x)^2 + (y-d)^2)} \quad (\text{B.5a})$$

$$H_{y2} = \frac{(x) I_{pk} \cos(\omega t-120^\circ)}{2\pi((x)^2 + (y-d)^2)} \quad (\text{B.5b})$$

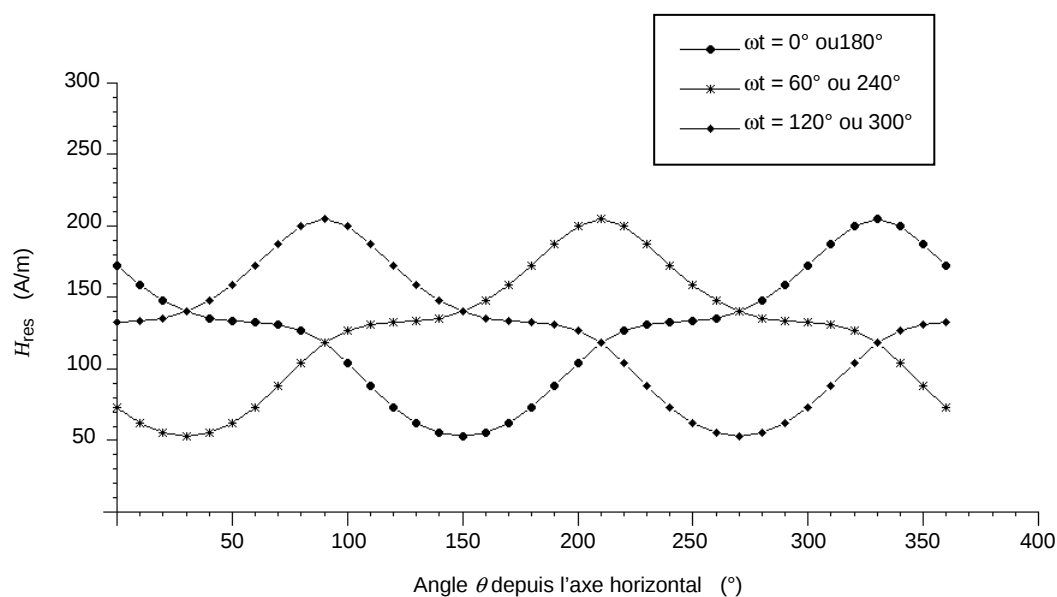
Enfin, les composantes de champ pour la phase 3 située à $\left(-\frac{d\sqrt{3}}{2}, -\frac{d}{2}\right)$ et parcourue par un courant $I_{pk}\cos(\omega t+120^\circ)$ sont

$$H_{x3} = \frac{-\left(y + \frac{d}{2}\right) I_{pk} \cos(\omega t+120^\circ)}{2\pi\left(\left(x + \frac{d\sqrt{3}}{2}\right)^2 + \left(y + \frac{d}{2}\right)^2\right)} \quad (\text{B.6a})$$

$$H_{y3} = \frac{\left(x + \frac{d\sqrt{3}}{2}\right) I_{pk} \cos(\omega t+120^\circ)}{2\pi\left(\left(x + \frac{d\sqrt{3}}{2}\right)^2 + \left(y + \frac{d}{2}\right)^2\right)} \quad (\text{B.6b})$$

En conséquence, les composantes x et y de l'intensité du champ magnétique pour ce système de courants triphasés, quelle que soit la valeur d'angle ωt , sont égales respectivement à la somme des composantes individuelles des trois phases. L'intensité du champ magnétique résultant est donnée par

$$H_{res} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^3 H_{xi}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^3 H_{yi}\right)^2} \quad (\text{B.7})$$



IEC 2050/09

Figure B.2 – Variation de la résultante du champ magnétique autour d'un câble triphasé

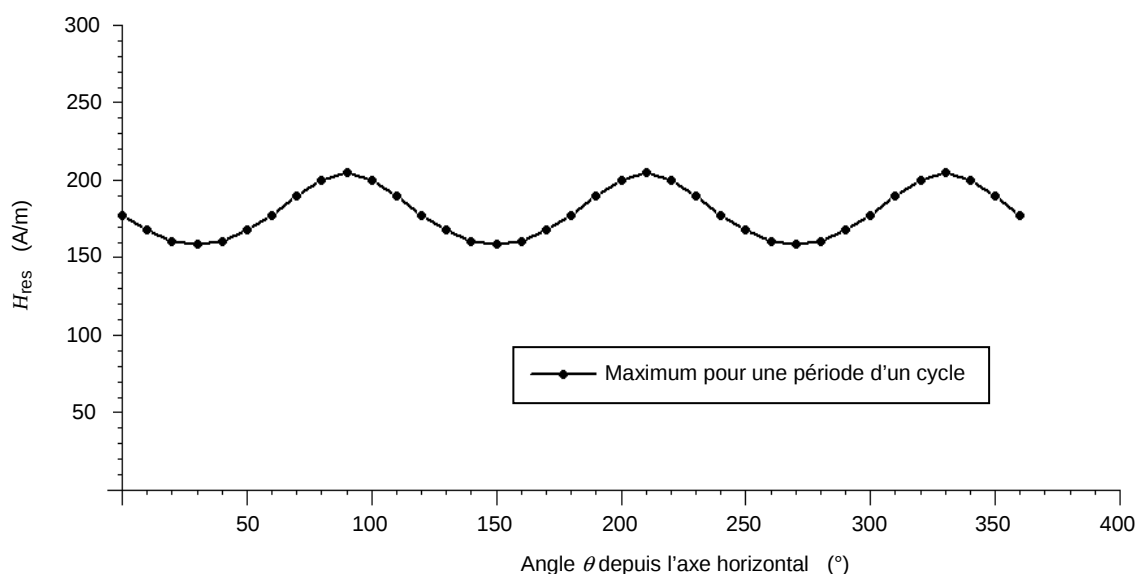
La Figure B.2 montre la variation de la résultante du champ magnétique autour du câble décrit à la Figure B.1 à un rayon R de 1 m du centre du câble pour différentes valeurs de ωt , pour une distance (d) de 0,5 m entre chaque phase et le centre du câble et un courant équilibré triphasé de valeur d'intensité crête de 1 000 A. Le Tableau B.1 donne les valeurs pour les points présentés à la Figure B.2.

Tableau B.1 – Valeurs du champ magnétique résultant pour phases θ et phases instantanées ωt

Angle θ depuis $y = 0$	ωt 0° ou 180°	ωt 60° ou 240°	ωt 120° ou 300°
0	172,296	73,394 91	132,424 9
10	158,693 8	62,259 55	133,355 6
20	147,946 2	55,377 49	135,683 5
30	140,361 5	53,051 65	140,361 5
40	135,683 5	55,377 49	147,946 2
50	133,355 6	62,259 55	158,693 8
60	132,424 9	73,394 91	172,296
70	131,223 3	87,990 68	187,165 4
80	127,237 1	104,051	199,616 2
90	118,141 9	118,141 9	204,627 8
100	104,051	127,237 1	199,616 2
110	87,990 68	131,223 3	187,165 4
120	73,394 91	132,424 9	172,296
130	62,259 55	133,355 6	158,693 8
140	55,377 49	135,683 5	147,946 2
150	53,051 65	140,361 5	140,361 5
160	55,377 49	147,946 2	135,683 5
170	62,259 55	158,693 8	133,355 6
180	73,394 91	172,296	132,424 9

Angle θ depuis $y = 0$	ωt 0° ou 180°	ωt 60° ou 240°	ωt 120° ou 300°
190	87,990 68	187,165 4	131,223 3
200	104,051	199,616 2	127,237 1
210	118,141 9	204,627 8	118,141 9
220	127,237 1	199,616 2	104,051
230	131,223 3	187,165 4	87,990 68
240	132,424 9	172,296	73,394 91
250	133,355 6	158,693 8	62,259 55
260	135,683 5	147,946 2	55,377 49
270	140,361 5	140,361 5	53,051 65
280	147,946 2	135,683 5	55,377 49
290	158,693 8	133,355 6	62,259 55
300	172,296	132,424 9	73,394 91
310	187,165 4	131,223 3	87,990 68
320	199,616 2	127,237 1	104,051
330	204,627 8	118,141 9	118,141 9
340	199,616 2	104,051	127,237 1
350	187,165 4	87,9906 8	131,223 3
360	172,296	73,394 91	132,424 9

L'intensité maximum du champ pour une période d'un cycle à une position angulaire définie ($H_{\max}$) peut être trouvée à partir de la valeur maximum à cette position angulaire de la famille de courbes dont la Figure B.2 et le Tableau B.1 donnent un aperçu. La variation de ce maximum avec l'angle θ autour du câble est donnée à la Figure B.3.



IEC 2051/09

Figure B.3 – Valeur maximum du champ magnétique résultant autour d'un câble triphasé

Les valeurs aux points figurant à la Figure B.3 sont données dans la Tableau B.2.

Tableau B.2 – Valeurs de maximum de champ magnétique résultant en fonction de la phase θ

Angle θ depuis $y = 0$	Maximum H_{res}
0	177,666 7
10	167,649 1
20	161,303 6
30	159,154 9
40	161,303 6
50	167,649 1
60	177,666 7
70	189,725 3
80	200,293 6
90	204,627 8
100	200,293 6
110	189,725 3
120	177,666 7
130	167,649 1
140	161,303 6
150	159,154 9
160	161,303 6
170	167,649 1
180	177,666 7
190	189,725 3
200	200,293 6
210	204,627 8
220	200,293 6
230	189,725 3
240	177,666 7
250	167,649 1
260	161,303 6
270	159,154 9
280	161,303 6
290	167,649 1
300	177,666 7
310	189,725 3
320	200,293 6
330	204,627 8
340	200,293 6
350	189,725 3
360	177,666 7

Les valeurs de maximum de champ résultant données au Tableau B.2 peuvent être calculés directement à partir des Équations (B.4) à (B.7) comme indiqué ci-dessous.

Pour la phase 1, les Equations (B.4a) and (B.4b) peuvent être réécrites:

$$H_{x1} = A \cos(\omega t) \quad (\text{B.8a})$$

où

$$A = \frac{-\left(y + \frac{d}{2}\right) I_{pk}}{2\pi \left(\left(x - \frac{d\sqrt{3}}{2}\right)^2 + \left(y + \frac{d}{2}\right)^2 \right)}$$

et

$$H_{y1} = C \cos(\omega t) \quad (\text{B.8b})$$

où

$$C = \frac{\left(x - \frac{d\sqrt{3}}{2}\right) I_{pk}}{2\pi \left(\left(x - \frac{d\sqrt{3}}{2}\right)^2 + \left(y + \frac{d}{2}\right)^2 \right)}$$

ou

phase 2:

$$H_{x2} = E \cos(\omega t) + F \sin(\omega t) \quad (\text{B.9a})$$

où

$$E = \frac{-(y-d) I_{pk} \cos(120^\circ)}{2\pi \left((x)^2 + (y-d)^2 \right)} \quad \text{et} \quad F = \frac{-(y-d) I_{pk} \sin(120^\circ)}{2\pi \left((x)^2 + (y-d)^2 \right)}$$

et

$$H_{y2} = G \cos(\omega t) + H \sin(\omega t) \quad (\text{B.9b})$$

où

$$G = \frac{(x) I_{pk} \cos(120^\circ)}{2\pi \left((x)^2 + (y-d)^2 \right)} \quad \text{et} \quad H = \frac{(x) I_{pk} \sin(120^\circ)}{2\pi \left((x)^2 + (y-d)^2 \right)}$$

phase 3:

$$H_{x3} = K \cos(\omega t) + L \sin(\omega t) \quad (\text{B.10a})$$

où

$$K = \frac{-\left(y + \frac{d}{2}\right) I_{pk} \cos(120^\circ)}{2\pi \left(\left(x + \frac{d\sqrt{3}}{2}\right)^2 + \left(y + \frac{d}{2}\right)^2 \right)} \quad \text{et} \quad L = \frac{\left(y + \frac{d}{2}\right) I_{pk} \sin(120^\circ)}{2\pi \left(\left(x + \frac{d\sqrt{3}}{2}\right)^2 + \left(y + \frac{d}{2}\right)^2 \right)}$$

et

$$H_{y3} = M \cos(\omega t) + N \sin(\omega t) \quad (\text{B.10b})$$

où

$$M = \frac{\left(x + \frac{d\sqrt{3}}{2}\right) I_{pk} \cos(120^\circ)}{2\pi \left(\left(x + \frac{d\sqrt{3}}{2}\right)^2 + \left(y + \frac{d}{2}\right)^2 \right)} \quad \text{et} \quad N = \frac{-\left(x + \frac{d\sqrt{3}}{2}\right) I_{pk} \sin(120^\circ)}{2\pi \left(\left(x + \frac{d\sqrt{3}}{2}\right)^2 + \left(y + \frac{d}{2}\right)^2 \right)}$$

La résultante de la composante x du champ H est alors la suivante:

$$\begin{aligned} H_x &= H_{x1} + H_{x2} + H_{x3} \\ &= (A + E + K) \cos(\omega t) + (F + L) \sin(\omega t) \\ &= P \cos(\omega t) + Q \sin(\omega t) \end{aligned}$$

$$\text{où } P = A + E + K$$

$$\text{et } Q = F + L$$

Alors que la résultante de la composante y du champ H est la suivante:

$$\begin{aligned} H_y &= H_{y1} + H_{y2} + H_{y3} \\ &= (C + G + M) \cos(\omega t) + (H + N) \sin(\omega t) \\ &= R \cos(\omega t) + S \sin(\omega t) \end{aligned}$$

$$\text{où } R = C + G + M$$

$$\text{et } S = H + N$$

La résultante est H_{res} comme dans l'Equation (B.7), alors

$$H_{res}^2 = (P \cos(\omega t) + Q \sin(\omega t))^2 + (R \cos(\omega t) + S \sin(\omega t))^2 \quad (\text{B.11})$$

qui se transforme en

$$H_{res}^2 = (P^2 + R^2) \cos^2(\omega t) + (Q^2 + S^2) \sin^2(\omega t) + 2(PQ + RS) \sin(\omega t) \cos(\omega t) \quad (\text{B.12})$$

et finalement en

$$H_{res}^2 = \left(\frac{P^2 + R^2 + Q^2 + S^2}{2} \right) + \left(\frac{P^2 + R^2 - Q^2 - S^2}{2} \right) \cos 2(\alpha) + (PQ + RS) \sin 2(\alpha) \quad (B.13)$$

La valeur maximum de H_{res}^2 est alors donnée par

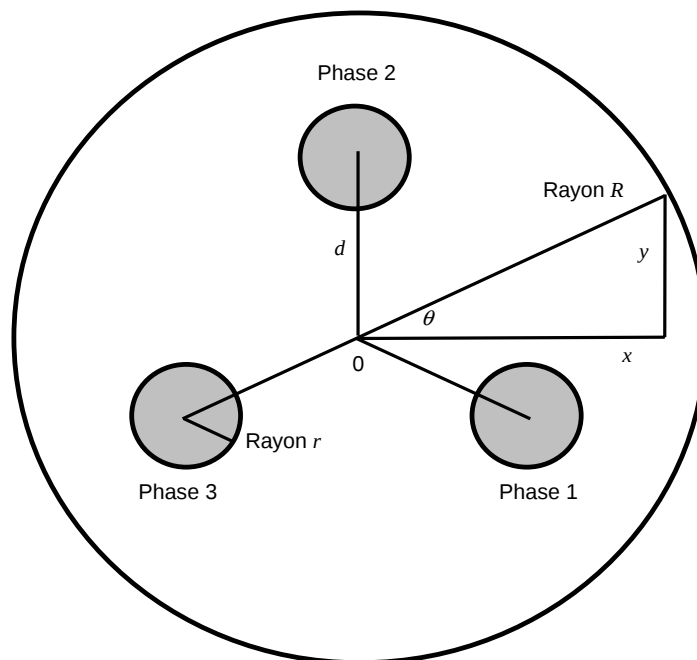
$$(H_{res}^2)_{max} = \left(\frac{P^2 + R^2 + Q^2 + S^2}{2} \right) + \sqrt{\left(\frac{P^2 + R^2 - Q^2 - S^2}{2} \right)^2 + (PQ + RS)^2} \quad (B.14)$$

et la valeur maximum de H_{res} elle-même est alors la racine carrée de l'Equation B.14. La représentation graphique de $(H_{res})_{max}$ est donnée dans la Figure B.3 et les valeurs correspondantes sont données dans le Tableau B.2.

B.2 Champ électrique

Cette annexe présente la résolution analytique d'un champ électrique produit par un ensemble de tensions triphasées dans des conducteurs de longueur infinie. Cette résolution est proposée comme un exemple de calcul convenant à la fois aux calculs analytiques et numériques. Elle peut donc être utilisée pour évaluer la performance des logiciels utilisés pour les calculs décrits à l'Article 6.

Les conducteurs soumis à des tensions triphasées sont disposés symétriquement à une distance d de l'origine (0,0) dans le plan x-y comme illustré à la Figure B.4. Les charges équivalentes sur chaque ligne sont distribuées selon l'axe z (perpendiculairement au plan de la figure).



IEC 2052/09

Figure B.4 – Schéma pour le calcul des champs électriques triphasés

Les centres des trois conducteurs sont donc situés à $\left(\frac{d\sqrt{3}}{2}, \frac{-d}{2}\right)$, $(0,d)$ et $\left(\frac{-d\sqrt{3}}{2}, \frac{-d}{2}\right)$.

Le champ électrique résultant des trois tensions est calculé à l'extérieur des câbles, c'est-à-dire à des distances R supérieures à $(d + r)$ de l'origine, où r est le rayon des câbles (conducteurs).

La distance (s) entre deux conducteurs est la suivante:

$$s = \sqrt{\left(\frac{d\sqrt{3}}{2}\right)^2 + \left(\frac{3d}{2}\right)^2} = \sqrt{3}d \quad (\text{B.15})$$

La loi de Gauss donne le champ électrique E à une distance R d'un conducteur portant une charge λ (C/m) par la relation

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 R} \quad (\text{B.16})$$

ou ϵ_0 est la permittivité de l'air $\approx 8,854 \times 10^{-12}$ F/m.

Donc, un conducteur situé à l'origine $(0,0)$ portant une charge $\lambda_{pk}\cos(\omega t)$ produit un champ électrique $E = \underline{i}E_x + \underline{j}E_y$ tel que

$$E_x = \frac{x\lambda_{pk}\cos(\omega t)}{2\pi\epsilon_0 R^2} \quad (\text{B.17a})$$

$$E_y = \frac{y\lambda_{pk}\cos(\omega t)}{2\pi\epsilon_0 R^2} \quad (\text{B.17b})$$

R est la distance depuis le centre du conducteur et

$$R^2 = x^2 + y^2$$

Dans la plupart des cas de calculs de champs électriques, c'est la tension qui est connue, pas la charge. Il peut être démontré que la relation entre la charge et la tension pour le conducteur i d'un système triphasé équilibré peut être donné par la relation

$$\frac{\lambda_i}{2\pi\epsilon_0} = \frac{V_i}{\ln\left(\frac{s}{r}\right)} \quad (\text{B.18})$$

où

r est le rayon du conducteur;

s est la distance entre conducteurs $= \sqrt{3}d$;

V_i est la tension du conducteur i par rapport à la terre.

$$V_i + V_j + V_k = 0$$

[i j k] = [1 2 3] puis [2 3 1] puis [3 1 2] usuellement [1].

Les conducteurs présentés à la Figure B.4 sont tous à la distance d de l'origine, donc les formules suivantes sont valables pour $R > (d + r)$.

Les composantes du champ pour un conducteur déplacé par rapport à l'origine au point de coordonnées $(x_{\text{dis}}, y_{\text{dis}})$ et portant une charge λ_{phase} sont déduites des Equations (B.17a) et (B.17b) comme suit:

$$E_{xi} = \frac{x_{\text{local}} \lambda_{\text{phase}}}{2\pi\epsilon_o R_{\text{local}}^2} \quad (\text{B.19a})$$

$$E_{yi} = \frac{y_{\text{local}} \lambda_{\text{phase}}}{2\pi\epsilon_o R_{\text{local}}^2} \quad (\text{B.19b})$$

où

$i = 1, 2, 3;$

$$x_{\text{local}} = x - x_{\text{dis}} \text{ et } y_{\text{local}} = y - y_{\text{dis}};$$

$$R_{\text{local}}^2 = x_{\text{local}}^2 + y_{\text{local}}^2.$$

En remplaçant l'Equation (B.18) dans les Equations (B.19a) et (B.19b), on obtient les expressions de l'intensité du champ électrique en terme de tensions à la terre:

$$E_{xi} = \frac{x_{\text{local}} V_i}{\ln\left(\frac{s}{r}\right) R_{\text{local}}^2} \quad (\text{B.20a})$$

$$E_{yi} = \frac{y_{\text{local}} V_i}{\ln\left(\frac{s}{r}\right) R_{\text{local}}^2} \quad (\text{B.20b})$$

Dans cet exemple, la phase 1 est située à $x_{\text{dis}} = \left(\frac{d\sqrt{3}}{2}\right)$ $y_{\text{dis}} = \left(\frac{-d}{2}\right)$ et à la tension $V_1 = V_{pk}\cos(\omega t)$ donc

$$x_{\text{local}} = x - \frac{d\sqrt{3}}{2}$$

$$y_{\text{local}} = y + \frac{d}{2}$$

$$R_{\text{local}}^2 = \left(x - \frac{d\sqrt{3}}{2}\right)^2 + \left(y + \frac{d}{2}\right)^2$$

De même, la phase 2 est située à $x_{\text{dis}} = 0$ $y_{\text{dis}} = d$ à la tension $V_2 = V_{pk}\cos(\omega t - 120^\circ)$, donc

$$x_{\text{local}} = x$$

$$y_{\text{local}} = y - d$$

$$R_{\text{local}}^2 = (x)^2 + (y - d)^2$$

Finalement, la phase 3 est située à $x_{\text{dis}} = \left(\frac{-d\sqrt{3}}{2} \right)$ $y_{\text{dis}} = \left(\frac{-d}{2} \right)$ à la tension $V_3 = V_{\text{pk}}\cos(\omega t + 120^\circ)$, donc

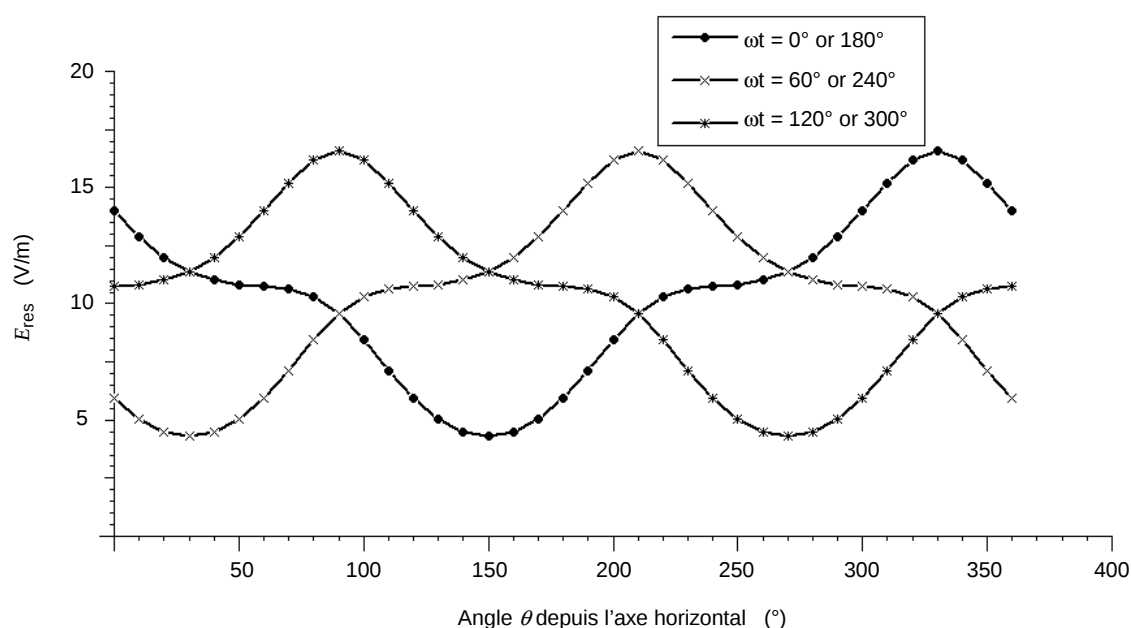
$$x_{\text{local}} = x + \frac{d\sqrt{3}}{2}$$

$$y_{\text{local}} = y + \frac{d}{2}$$

$$R_{\text{local}}^2 = \left(x + \frac{d\sqrt{3}}{2} \right)^2 + \left(y + \frac{d}{2} \right)^2$$

En conséquence, les composantes x et y de l'intensité du champ électrique pour ce système de tensions triphasées, quelle que soit la valeur d'angle ωt , sont égales respectivement à la somme des composantes individuelles des trois phases. L'intensité du champ électrique résultant est donné par

$$E_{\text{res}} = \sqrt{\left[\left(\sum_{i=1}^3 E_{xi} \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^3 E_{yi} \right)^2 \right]} \quad (\text{B.21})$$



IEC 2053/09

Figure B.5 – Variation de la résultante du champ électrique autour d'un câble triphasé

La Figure B.5 montre la variation de la résultante du champ électrique autour du câble décrit à la Figure B.4 pour différentes valeurs de ωt . Dans le cas présent, les paramètres choisis sont les suivants :

$R = 0,04 \text{ m}$ = rayon de calcul depuis le centre du câble;

$d = 0,02 \text{ m}$ = distance entre chaque conducteur et le centre du câble;

$s = 0,0346 \text{ m}$ = distance entre deux conducteurs;

$r = 0,005 \text{ m}$ = rayon du conducteur;

$V_{pk} = 1 \text{ V}$.

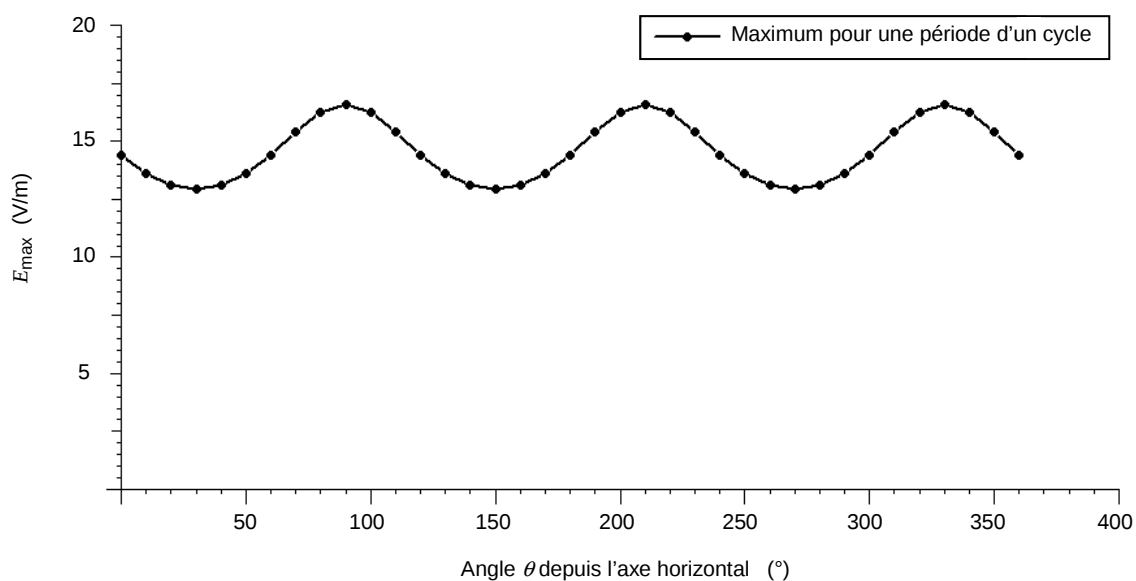
Le Tableau B.3 contient les valeurs des points figurant à la Figure B.5.

Tableau B.3 – Valeurs du champ électrique résultant pour phases θ et phases instantanées ωt

Angle θ depuis $y = 0$	$\omega t \text{ } 0^\circ \text{ ou } 180^\circ$	$\omega t \text{ } 60^\circ \text{ ou } 240^\circ$	$\omega t \text{ } 120^\circ \text{ ou } 300^\circ$
0	13,982 3	5,956 2	10,7467
10	12,878 5	5,052 5	10,822 2
20	12,006 3	4,494 0	11,011 1
30	11,390 7	4,305 3	11,390 7
40	11,011 1	4,494 0	12,006 3
50	10,822 2	5,052 5	12,878 5
60	10,746 7	5,956 2	13,982 3
70	10,649 2	7,140 7	15,189 0
80	10,325 7	8,444 0	16,199 4
90	9,587 6	9,587 6	16,606 1
100	8,444 0	10,325 7	16,199 4
110	7,140 7	10,649 2	15,189 0
120	5,956 2	10,746 7	13,98 3
130	5,052 5	10,822 2	12,878 5
140	4,494 0	11,011 1	12,006 3
150	4,305 3	11,390 7	11,390 7
160	4,494 0	12,006 3	11,011 1
170	5,052 5	12,878 5	10,822 2
180	5,956 2	13,982 3	10,746 7
190	7,140 7	15,189 0	10,649 2
200	8,444 0	16,199 4	10,325 7
210	9,587 6	16,606 1	9,587 6
220	10,325 7	16,199 4	8,444 0
230	10,649 2	15,189 0	7,140 7
240	10,746 7	13,982 3	5,956 2
250	10,822 2	12,878 5	5,052 5
260	11,011 1	12,006 3	4,494 0
270	11,390 7	11,390 7	4,305 3

Angle θ depuis $y = 0$	ωt 0° ou 180°	ωt 60° ou 240°	ωt 120° ou 300°
280	12,006 3	11,011 1	4,494 0
290	12,878 5	10,822 2	5,052 5
300	13,982 3	10,746 7	5,956 2
310	15,189 0	10,649 2	7,140 7
320	16,199 4	10,325 7	8,444 0
330	16,606 1	9,587 6	9,587 6
340	16,199 4	8,444 0	10,325 7
350	15,189 0	7,140 7	10,649 2
360	13,982 3	5,956 2	10,746 7

L'intensité maximum du champ pour une période d'un cycle à une position angulaire définie ($E_{\max}$) peut être trouvée à partir de la valeur maximum à cette position angulaire de la famille de courbes dont la Figure B.6 et le Tableau B.3 donnent un aperçu. La variation de ce maximum avec l'angle θ autour du câble est donnée à la Figure B.6.



IEC 2054/09

Figure B.6 – Valeur maximum du champ électrique résultant autour d'un câble triphasé

Les valeurs des points figurant à la Figure B.6 sont données dans le Tableau B.4.

Tableau B.4 – Valeurs de maximum de champ électrique résultant en fonction de la phase θ

Angle θ depuis $y = 0$	Maximum E V/m
0	14,418 2
10	13,605 2
20	13,090 3
30	12,915 9
40	13,090 3
50	13,605 2
60	14,418 2
70	15,396 8
80	16,254 4
90	16,606 1
100	16,254 4
110	15,396 8
120	14,418 2
130	13,605 2
140	13,090 3
150	12,915 9
160	13,090 3
170	13,605 2
180	14,418 2
190	15,396 8
200	16,254 4
210	16,606 1
220	16,254 4
230	15,396 8
240	14,418 2
250	13,605 2
260	13,090 3
270	12,915 9
280	13,090 3
290	13,605 2
300	14,418 2
310	15,396 8
320	16,254 4
330	16,606 1
340	16,254 4
350	15,396 8
360	14,418 2

Les valeurs de maximum de champ résultant données au Tableau B.4 peuvent être calculées directement à partir des Equations (B.20a), (B.20b) et (B.21) comme indiqué ci-dessous:

Pour la phase 1, les Equations (B.20a) et (B.20b) peuvent être réécrites:

$$E_{x1} = A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t) \quad (\text{B.22a})$$

où

$$A = \frac{x_{\text{local}} V_{\text{pk}}}{\ln\left(\frac{s}{r}\right) R_{\text{local}}^2}$$

$$B = 0$$

et

$$E_{y1} = C \cos(\omega t) + D \sin(\omega t) \quad (\text{B.22b})$$

où

$$C = \frac{y_{\text{local}} V_{\text{pk}}}{\ln\left(\frac{s}{r}\right) R_{\text{local}}^2}$$

$$D = 0$$

Pour la phase 2, les Equations (B.20a) and (B.20b) peuvent être réécrites:

$$E_{x2} = E \cos(\omega t) + F \sin(\omega t) \quad (\text{B.23a})$$

où

$$E = \frac{x_{\text{local}} V_{\text{pk}} \cos(120^\circ)}{\ln\left(\frac{s}{r}\right) R_{\text{local}}^2}$$

$$F = \frac{x_{\text{local}} V_{\text{pk}} \sin(120^\circ)}{\ln\left(\frac{s}{r}\right) R_{\text{local}}^2}$$

et

$$E_{y2} = G \cos(\omega t) + H \sin(\omega t) \quad (\text{B.23b})$$

où

$$G = \frac{y_{\text{local}} V_{\text{pk}} \cos(120^\circ)}{\ln\left(\frac{s}{r}\right) R_{\text{local}}^2}$$

$$H = \frac{y_{\text{local}} V_{\text{pk}} \sin(120^\circ)}{\ln\left(\frac{s}{r}\right) R_{\text{local}}^2}$$

Pour la phase 3, les Equations (B.20a) et (B.20b) peuvent être réécrites:

$$E_{x3} = K \cos(\omega t) + L \sin(\omega t) \quad (\text{B.24a})$$

où

$$K = \frac{x_{\text{local}} V_{\text{pk}} \cos(120^\circ)}{\ln\left(\frac{s}{r}\right) R_{\text{local}}^2}$$

$$L = -\frac{x_{\text{local}} V_{\text{pk}} \sin(120^\circ)}{\ln\left(\frac{s}{r}\right) R_{\text{local}}^2}$$

et

$$E_{y3} = M \cos(\omega t) + N \sin(\omega t) \quad (\text{B.24b})$$

où

$$M = \frac{y_{\text{local}} V_{\text{pk}} \cos(120^\circ)}{\ln\left(\frac{s}{r}\right) R_{\text{local}}^2}$$

$$N = -\frac{y_{\text{local}} V_{\text{pk}} \sin(120^\circ)}{\ln\left(\frac{s}{r}\right) R_{\text{local}}^2}$$

La résultante de la composante x du champ E est alors

$$E_x = E_{x1} + E_{x2} + E_{x3}$$

$$= (A + E + K) \cos(\omega t) + (B + F + L) \sin(\omega t)$$

$$= P \cos(\omega t) + Q \sin(\omega t)$$

$$\text{où } P = A + E + K$$

$$\text{et } Q = B + F + L$$

alors que la résultante de la composante y du champ E est

$$E_y = E_{y1} + E_{y2} + E_{y3}$$

$$= (C + G + M) \cos(\omega t) + (D + H + N) \sin(\omega t)$$

$$= R\cos(\omega t) + S\sin(\omega t)$$

$$\text{où } R = C + G + M$$

$$\text{et } S = D + H + N$$

La résultante est E_{res} comme dans l'Equation (B.21), alors

$$E_{\text{res}}^2 = (P \cos(\omega t) + Q \sin(\omega t))^2 + (R \cos(\omega t) + S \sin(\omega t))^2 \quad (\text{B.25})$$

qui se transforme en

$$E_{\text{res}}^2 = (P^2 + R^2) \cos^2(\omega t) + (Q^2 + S^2) \sin^2(\omega t) + 2(PQ + RS) \sin(\omega t) \cos(\omega t) \quad (\text{B.26})$$

et finalement en

$$E_{\text{res}}^2 = \left(\frac{P^2 + R^2 + Q^2 + S^2}{2} \right) + \left(\frac{P^2 + R^2 - Q^2 - S^2}{2} \right) \cos 2(\omega t) + (PQ + RS) \sin 2(\omega t) \quad (\text{B.27})$$

La valeur maximum value de E_{res}^2 est alors donnée par

$$(E_{\text{res}}^2)_{\text{max}} = \left(\frac{P^2 + R^2 + Q^2 + S^2}{2} \right) + \sqrt{\left(\frac{P^2 + R^2 - Q^2 - S^2}{2} \right)^2 + (PQ + RS)^2} \quad (\text{B.28})$$

et la valeur maximum de E_{max} lui-même est alors la racine carrée de l'Equation (B.28). La représentation graphique de E_{max} est donnée à la Figure B.6 et les valeurs correspondantes sont données dans le Tableau B.4

Bibliographie

- [1] J.D. Kraus
Electromagnetics
McGraw-Hill, New York 1984

 - [2] CEI 62110, *Champs électriques et magnétiques générés par les systèmes d'alimentation à courant alternatif – Procédures de mesure des niveaux d'exposition du public*
-

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

3, rue de Varembé
PO Box 131
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel: + 41 22 919 02 11
Fax: + 41 22 919 03 00
info@iec.ch
www.iec.ch